

SENSORIAMENTO REMOTO DAS FORMAS DE URBANIZAÇÃO EM AGLOMERAÇÕES DO LITORAL AMAZÔNICO : ELABORAÇÃO DE UM ÍNDICE DE DENSIDADE POPULACIONAL

JEAN-FRANÇOIS FAURE¹

ANNELISE TRAN²

ANTOINE GARDEL²

LAURENT POLIDORI²

¹Núcleo de Altos Estudos Amazônicos – Universidade Federal do Pará
Av Perimetral s/n - Campus Profissional - cep 66075-650 - Belém PA, Brasil
jffaure@caramail.com

²Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM) – Centro de Caiena
Caixa postal 165 - 97323 - Cayenne - Guyane Française
tran@cayenne.ird.fr; gardel@cayenne.ird.fr; polidori@cayenne.ird.fr

Abstract. On the Amazonian coast, cities grow at high rates and few data sets are available on urban dynamics, turning urban monitoring a challenging task. In this context, remote sensing is a powerful tool for socio-urban mapping. In order to extract relevant information from satellite imagery, we defined demographic density indices based on SPOT and LANDSAT texture analysis. These indices proved to be meaningful in terms of urbanization shape and intensity. Their accuracy was assessed on the basis on aerial photography analysis and field knowledge. They were tested on two cities located in Pará (Belém) and French Guiana (Caiena). These cities were selected to provide different sizes and shapes in order to make the validation more generic. The resulting indices show high correlation rates with census data.

Keywords: remote sensing, urban density, demography, coastal Amazon, Belém, Caiena.

1. Introdução

O monitoramento das áreas urbanas implica um conhecimento atualizado da distribuição espacial da população. Censos demográficos produzem avaliações quantitativas caracterizando populações dentro de unidades geográficas determinadas. Mapas de densidade populacional podem ser derivados destes censos para informar sobre a pressão demográfica e as necessidades em termos de infraestrutura.

Em muitas cidades das regiões tropicais, o crescimento demográfico é muito rápido e as estruturas urbanas desordenadas são muito complexas, dificultando sensivelmente a realização dos censos demográficos.

As ferramentas do sensoriamento remoto permitem contornar parcialmente essas dificuldades ; fotografias aéreas foram utilizadas há muito tempo neste sentido (Park 1926, Henderson & Utano 1975). Mais recentemente, recorre-se a imagens de satélite para visualizar a extensão espacial de cidades e as suas evoluções (Assako Assako, 2000 ; Chen et al., 2000 ; Marques & Foresti, 2001), e também para caracterizar a urbanização através de índices quantitativos (Dureau, 1997 ; Tran et al., 2002). Numerosos estudos tentaram avaliar e mapear a densidade populacional de áreas urbanas com base a análise de imagens de satélite (Iisaka & Hegedus, 1982 ; Funso Olorunfemi, 1984 ; Lo, 1995 ; Harvey, 2002).

Neste artigo, propomos um índice de densidade populacional baseado na textura de imagens orbitais. Este índice foi calculado para duas cidades da região costeira amazônica : Caiena (Guiana francesa) e Belém (Pará). Depois de contextualizar as dinâmicas de urbanização dessas cidades, descrevemos os dados utilizados e o método elaborado. Em seguida

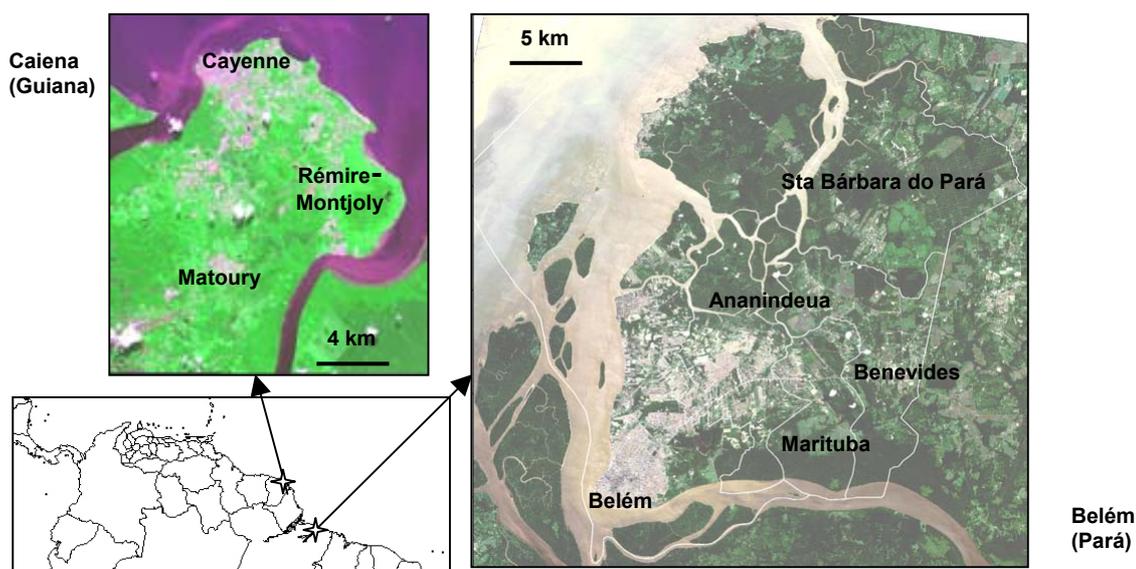
apresentamos os resultados obtidos, que tem uma boa correlação com os dados censitários levantados. Concluímos com uma discussão sobre a potencialidade deste método para completar censos demográficos em áreas urbanas tropicais.

2. Contexto

A urbanização do litoral amazônico caracterizou-se, ao longo das últimas duas décadas, por um crescimento significativo das suas grandes aglomerações, tanto em termos de concentração populacional como de extensão espacial. O município de Belém (PA), por exemplo, cresceu entre 1980 e 2000 com taxas médias de aproximadamente 3,6 % ao ano (Faure 2002). De forma geral, essas aglomerações enfrentam a combinação de três grandes fatores dificultando uma integração urbanística satisfatória de populações migrantes : a própria amplitude e intensidade dos processos migratórios considerados ; a saturação das áreas urbanizadas existentes ; a inadequação das políticas institucionais responsáveis pelo planejamento urbano. Decorre desta situação uma urbanização essencialmente periférica, muitas vezes desordenada e sitiada em áreas impróprias à moradia.

Belém, capital do Estado do Pará, está localizada no litoral amazônico pela figura 1.

Figura 1 – Localização das cidades de Belém e Caiena no litoral amazônico



Belém é o coração de uma Região Metropolitana (RMB) que concentra cerca de 1,8 milhões de habitantes (IBGE 2000) repartidos em cinco municípios¹. Os dados dos últimos censos (1970-2000) apontam uma tendência a desaceleração da concentração urbana como toda entre 1991 e 2000, quando comparado às décadas 70 e 80. No entanto, uma análise diferenciada indica que enquanto o município de Belém encontra-se em fase de estabilização populacional, os demais municípios cresceram intensamente na última década, alguns caracterizados por taxas de crescimento médias de cerca de 12 % ao ano, ao exemplo de Ananindeua (Faure, 2002). O processo de metropolização da região foi sustentado por saldos migratórios intra-estaduais positivos, por taxas elevadas de crescimento vegetativo da população, e por repetidos fluxos positivos de migrações interestaduais (Morreira, 2000 ;

¹ Região Metropolitana de Belém : Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Barbara do Pará – Lei Estadual 027-95.

Rodrigues, 2000). As paisagens urbanas da RMB são complexas e variadas, produtos de mais de três séculos de ocupação humana, reflexos de fases históricas de composição e recomposição urbana (Browder & Godfrey 1997). A fase de valorização e de verticalização das áreas nobres da cidade nas décadas de 60 e 70, exacerbou contrastes socio-espaciais com zonas de baixo relevo impróprias à moradia mas concentrando populações de baixa renda, e as mais recentes fases de inchaço populacional e de crescimento horizontal nas periferias (Trindade, 1998). Neste contexto, o desafio de um planejamento urbano respondendo às necessidades básicas das populações residentes inscreve-se na escala regional, e deve apoiar-se na produção e no aproveitamento de métodos e dados aptos a informar sobre as dinâmicas socio-espaciais em jogo.

Caiena, capital da Guiana Francesa, abriga aproximadamente 50 000 morades, segundo o último Censo Nacional (1999). Juntando os municípios vizinhos de Rémire-Montjoly e de Matoury, a população total da Ilha de Caiena agrega 92 000 habitantes, representando mais de 50 % da população da Guiana Francesa como toda. Em sintonia com dinâmicas observadas no norte do Brasil, a urbanização caracteriza-se por taxas de crescimento elevadas (a população dobrou em 20 anos) e por formas desordenadas de expansão. As populações urbanas são provenientes das áreas rurais e de fluxos migratórios internacionais significativos. Território europeu sitiado na América do Sul, a Guiana Francesa representa um destino atrativo para populações de regiões fronteiriças em busca de melhores condições de vida. As paisagens urbanas são características de populações e de culturas urbanas de origens diferenciadas (Haitianas, Brasileiras, Europeias especificamente) e estendam-se em função da distribuição espacial de meios naturais pouco propícios à urbanização (pentanais, colinas). Neste quadro, as necessidades em informações caracterizando o crescimento das áreas urbanizadas são de primeira importância e constituem um desafio real em termos de planejamento e gestão dos espaços urbanos de Caiena.

3. Dados e método

Os dados levantados e/ou adquiridos para conduzir o estudo são dados pela tabela 1.

Tabela 1 – Dados utilizados

Dados espaciais	Ref.	Bandas	Data	Área
Cena SPOT 4	KJ 691-340	XSi 1-4	07/2001	Caiena
Cena ETM+	WRS 223-061	TM 1-5,7,8	08/2001	Belém
Cena SPOT 2	KJ 691-340	Pancromática	12/1995	Caiena
Cena SPOT 3	KJ 702-353	Pancromática	11/1996	Belém
Dados censitários ¹	Fonte	Ano	Município	
População residente	INSEE ²	1999	Caiena	
População residente	INSEE ²	1999	Matoury	
População residente	INSEE ²	1999	Rémire-Montjoly	
População residente	IBGE ⁴	2000	RMB ³	

¹Dados por bairros - ² Instituto Nacional da Estatística e dos Estudos Econômicos (França) - ³Dados por bairros somente disponíveis para o município de Belém - ⁴Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

As cenas foram escolhidas em função da disponibilidade de imagens orbitais com pouca cobertura nebulosa disponíveis nas duas áreas de estudo, na faixa temporal correspondendo aos

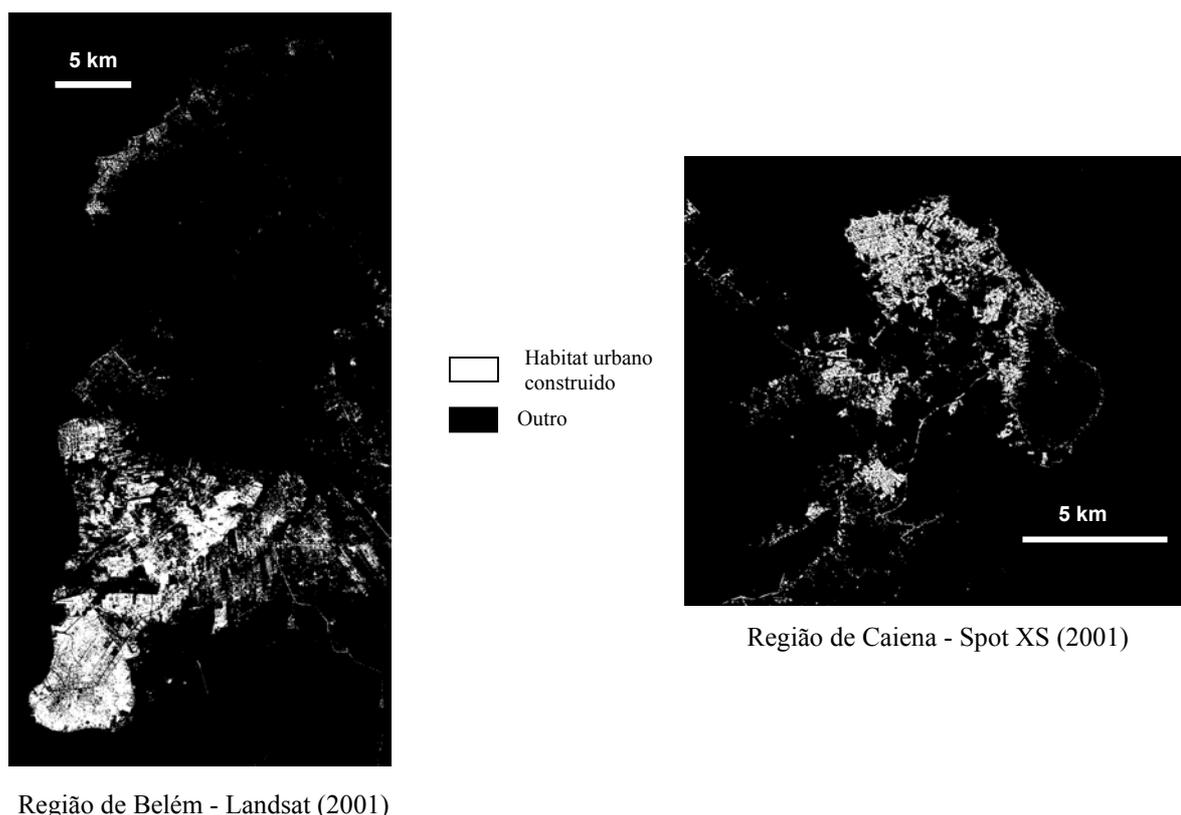
censos populacionais do IBGE e do INSEE. Os dados imagens apresentam resoluções diferentes ; a variabilidade da resolução permite uma comparação do método a ser implantado em diferentes escalas espaciais. Os dados censitários da região de Caiena referem-se ao zoneamento do INSEE, que delimita 35 zonas de amostra estatística de 6,2 km² em média. Essas áreas correspondem aos 71 bairros do município de Belém, de superfícies médias de 3,4 km², escala em qual o IBGE disponibiliza os resultados censitários. Não foi possível levantar, para as demais sedes municipais da RMB, as delimitações dos bairros com seus dados estatísticos. Os perímetros distritais, de dimensões importantes, foram descartados por não possuírem características espaciais compatíveis com os objetivos do estudo.

3-1. Extração do habitat urbano em cenas Spot e Landsat

O passo inicial do método, depois da correção geográfica das imagens em relação aos mapas topográficos das duas regiões de estudo, é a extração de uma imagem binária do habitat urbano correspondendo às áreas construídas. Para isto, vários métodos foram desenvolvidos, testados e refinados até chegar a um resultado satisfatório. Em um primeiro tempo, são elaboradas máscaras subtraindo às imagens os objetos que não pertencem ao tema urbano (água, vegetação). As máscaras são obtidas por aplicação de algoritmos de classificação não supervisionada (Isodata) nos canais XSi (para Caiena) e ETM (para a RMB). As classes correspondendo ao universo urbano são guardadas e as outras descartadas. Nos segmentos selecionados, o processo é repetido de modo iterativo, identificando a partir de áreas urbanizadas ou semi-urbanizadas as áreas construídas.

Em ambos os casos, os resultados foram significativamente melhorados em relação à classificação dos canais nativos, pela integração e pelo tratamento de neo-canais (ACP, NDVI). Outros métodos foram utilizados sem sucesso significativo no melhoramento dos resultados (técnica do *top-hat*, classificação do *merge* Landsat multi-espectral com pancromática). Os tratamentos foram realizados com os programas *ERDAS* e *ENVI* (ERDAS, 1998 ; ENVI, 2001).

Figura 2 – Imagens binárias do habitat urbano construído em Belém e Caiena



A partir das imagens classificadas finais, são geradas imagens binárias representando o habitat urbano construído, conforme às imagens da figura 2. A avaliação da qualidade do resultado de classificação apoia-se na comparação das imagens binárias com fotografias aéreas e com o conhecimento que temos da área.

3-2. Construção do Índice de densidade populacional

O método é retrabalhado a partir de um índice elaborado no âmbito de um estudo em epidemiologia realizado em Caiena (Tran et al., 2002). O hipótese inicial é que a densidade populacional está estreitamente ligada à densidade do habitat construído. O índice de densidade populacional é calculado para cada pixel da imagem. O valor alocado a um pixel é o ratio, calculado dentro de um círculo de 10 pixels de raio, do número de pixels de habitat urbano em relação ao total dos pixels da área considerada. Como o dado embasando o cálculo do índice são imagens binárias, onde os pixels correspondendo às áreas construídas são codificadas com o valor 1 e o resto com o valor 0, o cálculo do índice pode ser assimilado a uma convolução circular de tipo low-pass, de tamanho 21x21 pixels, ou seja 20 pixels ao redor do pixel central.

O tamanho do filtro foi escolhido após o teste de várias outras dimensões, de 3x3 até 43x43. As dimensões entre 20 e 30 pixels (ou seja um diâmetro de 400 a 600 metros para a imagem Spot XS) resultam nas maiores correlações entre o valor do índice de densidade populacional calculado nas zonas censitárias consideradas e o valor de referência dado pelo censo (ver figura 4). Este tamanho se aproxima das dimensões dos quarteirões no centro e nos bairros residenciais de Caiena. Aplicamos no tratamento das imagens binárias do habitat urbano de Belém as mesmas dimensões de filtro, ou seja 21x21 pixels correspondendo a um diâmetro de 600 metros (imagem Landsat).

4. Resultados

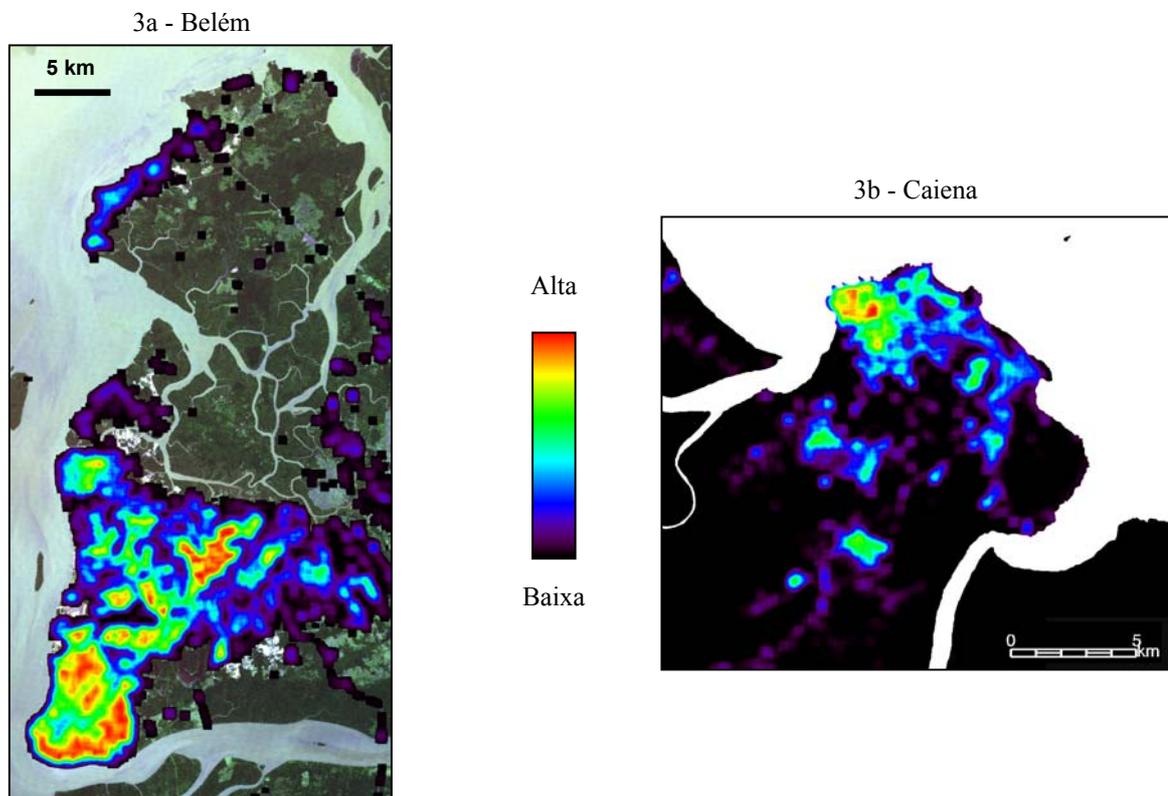
O resultado para cada sítio é uma imagem da distribuição espacial do índice de densidade populacional.

4-1. Avaliação qualitativa

A figura 3 acompanha as imagens de uma escala de cores aonde o vermelho representa as densidades mais altas e o preto as mais baixas; o intervalo dos valores dados pelo índice variam de 0 a 1. As imagens de densidade populacional de Belém e Caiena (figura 3) são significativas das formas de urbanização das cidades.

No caso da RMB, apesar de uma verticalização importante do habitat no centro de Belém, aparecem ali valores médios do índice, enquanto as áreas da periferia imediata caracterizam-se por valores indicando altas densidades urbanas. Essas áreas ocupam zonas baixas da cidade, onde casas de palafitas e formas desordenadas de urbanização predominam, e onde as malhas urbanas são extremamente densas. Esses caracteres, associados a altos números de moradores por domicílios, explicam a repartição do índice de densidade populacional; também, o centro de Belém contém paisagens de malhas urbanas abertas e heterogêneas, onde grandes prédios ocupando superfícies importantes alternam com casas residenciais de classe média. A orla indústria-comercial de Belém, onde galpões e áreas não residenciais dominam, traduz-se por valores baixos do índice. Ao nordeste de Belém, surge os complexos habitacionais da Cidade Nova, sediados no município de Ananindeua, que totalizam hoje mais de 250 000 moradores. O espaço urbano entre Belém e a Cidade Nova é o espaço o mais dinâmica da RMB, onde se concentraram ao longo da última década os processos de invasão urbana e de crescimento desordenado.

Figura 3 – Índice de densidade populacional em Belém e Caiena



Em Caiena, sómente o centro da cidade e a faixa sul-sudeste apresentam um habitat urbano muito denso. A alta intensidade do índice para essas áreas pode ser explicada pela contiguidade dos objetos urbanos. Nas demais formas de urbanização da aglomeração, o gradiente do índice corresponde aos tipos de paisagens urbanas encontradas. As formas mais desenvolvidas no resto da Ilha de Caiena são paisagens de conjuntos residenciais planejados ou paisagens de urbanização desordenada (Gardel 2001). Nessas paisagens, as densidades populacionais variam de acordo com a idade do bairro e com condições limitantes ligadas ao meio natural, que as vezes impedem a expansão da mancha urbana.

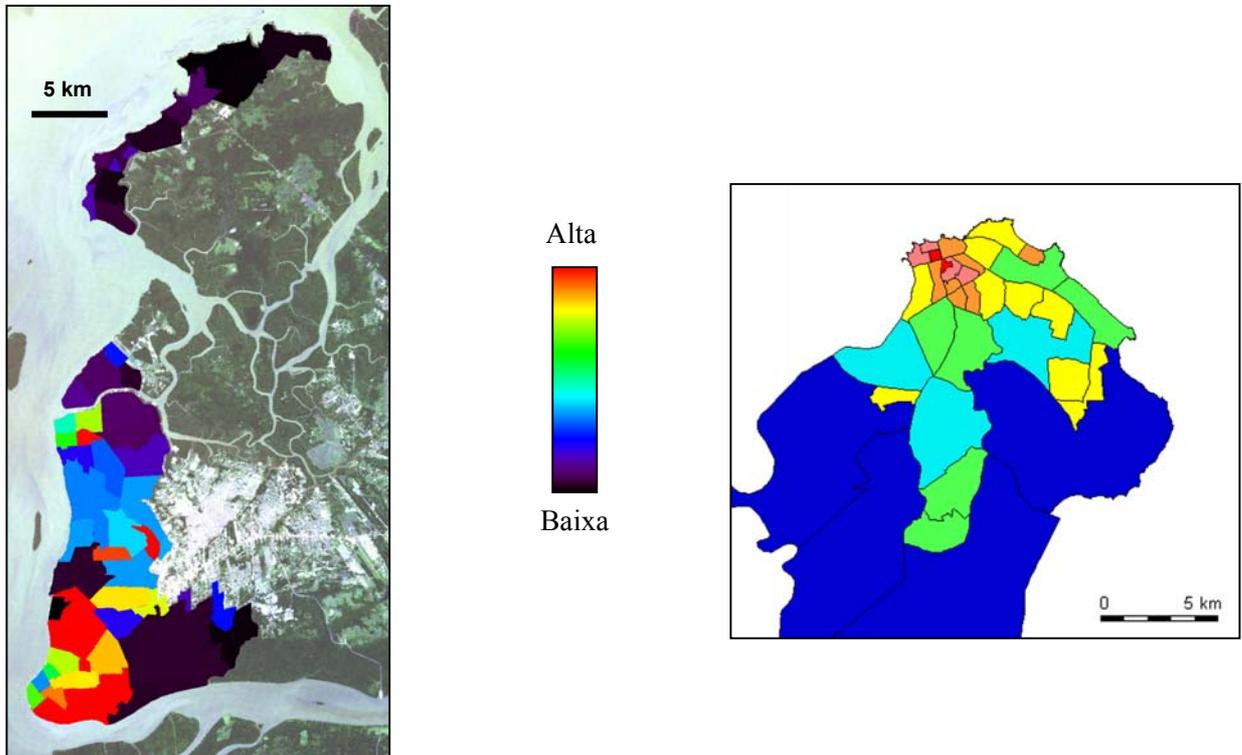
A figura 4 apresenta a distribuição das unidades censitárias de referência. Uma escala de cores indica os níveis de densidades populacionais, onde o vermelho representa as densidades mais altas e o preto as mais baixas. A comparação visual dos índices de densidade com os dados censitários do INSEE e do IBGE mostram uma boa correlação espacial entre valores restituídos pelo índice e dados oficiais (ver figuras 3 e 4).

Em Caiena, na medida em que aumenta a distância ao centro, muito denso, as densidades diminuem. Os dois outros municípios ainda não apresentam esta estrutura em faixas, por serem menos desenvolvidos e urbanizados. Nas áreas periféricas menos densas, onde se espalham as bolsas de urbanização desordenada, os dados do INSEE são redutoras pois essas áreas incluem espaços naturais impróprios à construção (morros, pantanais) e também espaços de povoamento em processo de densificação. Em Belém, o centro pouco denso está cercado de bairros populares altamente populosos. A falta de dados estatísticos referentes ao município de Ananindeua não possibilita uma comparação dos dados em nível regional. De forma geral, o índice alcança e realça a heterogeneidade das densidades populacionais dentro das zonas censitárias de Belém, que misturam áreas populosas com áreas naturais inhabitadas.

4-2. Avaliação quantitativa

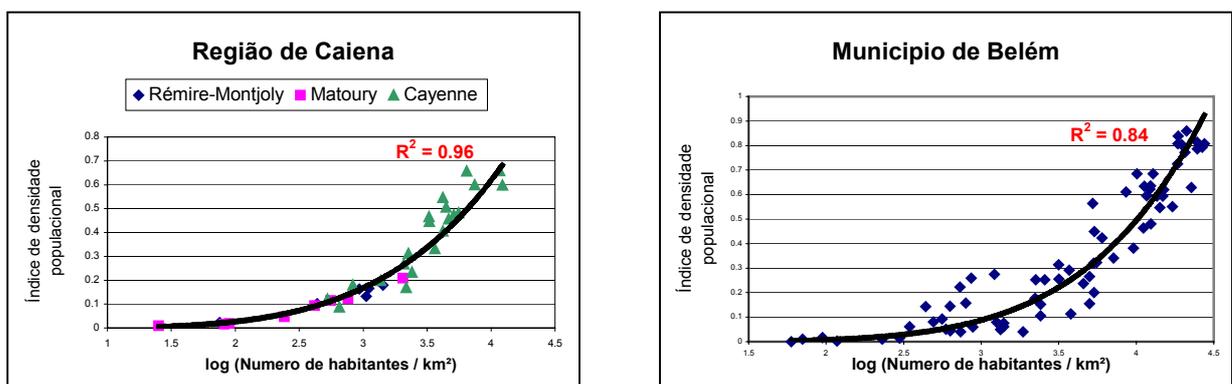
Utilizamos os dados censitários para avaliar quantitativamente os índices de densidade populacional obtidos com as imagens de satélite.

Figura 4 – Unidades censitárias de referência, Belém e Caiena.



Para compensar a diferença de tamanho das unidades de censo, calculamos para cada uma delas o valor médio do índice de densidade, e comparamos estes valores com os dados censitários de densidade populacional de cada uma. Os índices de densidade populacional obtidos tem uma boa correlação com os dados censitários, como apontado pela figura 5 ($r^2 = 0.96$ em Caiena e 0.84 em Belém). Estes resultados mostram a eficiência do método na obtenção de uma avaliação aproximada da população urbana.

Figura 5 – Comparação dos índices com valores populacionais de referência



5. Discussão

As taxas de correlação obtidas (r^2 maiores que 0.8) confirmam a grande potencialidade do sensoriamento remoto para mapear densidades populacionais. As imagens, como fonte de informações, introduzem heterogeneidades no seio de cada uma das unidades censitárias consideradas. Os resultados obtidos não fornecem valores populacionais absolutos ; para isto, deve-se recorrer às referências estatísticas e calibrar os valores dos índices. Portanto, o método não pretende substituir-se aos censos convencionais. Em realidade, as duas abordagens são complementárias : entre dois censos, a análise de imagens de satellite permite atualizar informações demográficas a menor custo, fornecer descrições qualitativas dos diferentes bairros e planejar o próximo censo.

No futuro, diferentes possibilidades de melhoramento do método são consideradas :

- análise do comportamento espacial do erro;
- refinamento da detecção do habitat (análise textural dos diferentes canais, morfologia matemática;
- calibração do índice embasada em unidades censitárias mais finas;
- elaboração de um modelo à escala do pixel.

Para concluir, este primeiro estudo mostrou resultados satisfatórios, incentivando as equipes a aprofundar o método e aplicá-lo a outras grandes cidades do litoral amazônico.

6. Bibliografia

- Assako Assako, R.J. Evaluation comparative des méthodes pour la délimitation d'un périmètre urbain par télédétection. *Télédétection*, v. 1, p. 305-325, 2000.
- Browder J. D., Godfrey B. J. *Metropolitan centers in Amazonia: Regional cities and urban primacy*. Rainforest cities. Urbanization, Development and Globalization. The Brazilian Amazon. - Columbia University Press, New York, 1997, p. 122-159.
- Chen, S.; Zeng, S.; Xie, C.. Remote sensing and GIS for urban growth analysis in China. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 66, n. 5, p. 593-598, 2000.
- Dureau, F. La production rapide d'informations démographiques et économiques par sondage aréolaire sur une image satellitaire : application à trois villes de pays en développement (Quito, Bogota et Yaoundé). *Télédétection des milieux urbains et péri-urbains, sixièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF*, Liège, 2-5 octobre 1995 , p. 215-224.
- ENVI. Version 3.5. Research System, Inc. Boulder, USA, 2001.
- ERDAS Imagine. Version 8.3.1., Erdas, Inc. Atlanta, USA, 1998.
- Funso Olorunfemi, J. Land use an population: a linking model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 50, n. 2, p. 221-227, 1984.
- Faure, J.F. Dinâmicas de urbanização em meio tropical Úmido : uso do sensoriamento remoto para a construção de Indicadores sócio-ambientais na Amazônia Oriental. Relatório de pesquisa, bolsa DCR CNPQ, 67 p., 2002.
- Gardel, A. Les paysages urbains de l'Ile de Cayenne. *Mappemonde*, v. 63, n. 2001.3, p. 16-21, 2001.
- Green, N.E. Aerial photographic interpretation and the social structure of the city. *Photogrammetric Engineering*, v. 23, n. 1, p. 89-96, 1957.
- Harvey, J.F. Population estimation models based on individual TM pixels. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 68, n. 11, p. 1181-1192, 2002.
- IBGE. Censo Demográfico 2000. IBGE, Rio de Janeiro, 2000.

- INSEE. Recensement de la population, mars 1999, Exploitation principale. CD-ROM.
- Henderson, F.M.; Utano, J. Assessing urban socio-economic conditions with conventional air photography. *Photogrammetria*, v. 31, p. 81-89, 1975.
- Iisaka, J.; Hegedus, E. Population estimation from Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 12, p. 259-272, 1982.
- Lo, C.P. Automated population and dwelling unit estimation from high-resolution satellite images: a GIS approach. *International Journal of Remote Sensing*, v. 16, n. 1, p. 17-34, 1995.
- Marques, M.L.; Foresti, C. Análise espacial da estrutura urbana da cidade litorânea de Itanhaém (SP). *Geografia*, v. 26, n. 1, p. 7-35, 2001.
- Moreira, M.M. Região Norte: evolução populacional recente” – Dinâmica populacional das regiões Norte e Nordeste: questões atuais e emergentes (Org: Santos Taís de Freitas), Editora Massangana, Recife, pp 45-81, 2000.
- Park 1926. In Green, N.E. Aerial photographic interpretation and the social structure of the city. *Photogrammetric Engineering*, v. 23, n. 1, p. 89-96, 1957.
- Rodrigues, E. B. Os desafios da Metrópole. Reflexões sobre desenvolvimento para Belém. Labor Editorial, Belém, UFPa/NAEA, 271 p, 2000.
- Rodrigues, E. J. Banidos da cidade e unidos na condição. Cidade Nova: espelho da segregação social em Belém. Belém, UFPa/NAEA, 152 p, 2000.
- Tran, A.; Gardon, J.; Weber, S.; Polidori, L. Mapping disease incidence in suburban areas using remotely sensed data. *American Journal of Epidemiology*, v. 156, n. 7, p. 662-668, 2002.
- Trindade, Jr S. A cidade dispersa: Os novos espaços de assentamentos em Belém e a reestruturação urbana. Tese de doutorado. USP, São Paulo, 1998.