



AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL SOLAR EM CLASSES MORFOLÓGICAS URBANAS DE REFERÊNCIA DE MACEIÓ-AL.

Tathiane A. L. Martins; Luc Adolphe; Leopoldo E. G. Bastos

- (1) MSc, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, tathianemartins@gmail.com
(2) DSc, Professor do Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Toulouse, luc.adolphe@gmail.com
(3) DSc, Professor do Programa de Pós-graduação em Arquitetura, leopoldo.bastos@gmail.com
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Av. Brigadeiro Trompowski, s/n°, sala 433, Edf. Reitoria, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Tel.: (21) 2598.1661.

RESUMO

Esse trabalho tem como proposta estimar a radiação solar incidente na cobertura de edifícios a partir do uso de tipologias urbanas. Busca-se identificar relações entre os principais atributos que descrevem a forma dos edifícios da cidade e o potencial de energia solar dos mesmos. Classes tipológicas urbanas de referência foram distinguidas para a cidade de Maceió, em Alagoas, empregando um conjunto de indicadores morfológicos, tais como densidade, verticalidade, compacidade, contiguidade, rugosidade etc. Com auxílio de um Sistema de Informação Geográfica e análises estatísticas, essas classes foram previamente cartografadas, numa resolução espacial de 500x500m. Para estimar o potencial solar, as tipologias foram submetidas a simulações computacionais para obtenção da irradiação solar anual incidente na superfície de suas cobertas. Para modelar a radiação solar em ambientes urbanos na escala desejada, foi utilizado um algoritmo simplificado de radiosidade (SRA-Citysim) que permite calcular, entre outros, a anisotropia da radiação difusa, as obstruções da abóbada e as inter-reflexões entre os edifícios. Em virtude do grande potencial solar existente em baixas latitudes, observou-se um reduzido desvio-padrão relativo nos resultados obtidos para todas as tipologias examinadas. Ponderando esse resultado com o coeficiente de aproveitamento dos edifícios na malha urbana, foi possível, então, mapear o potencial solar total útil, sugerindo um importante impacto de três parâmetros morfológicos principais: a taxa de ocupação do solo, a densidade total construída e o desvio padrão da altura.

Palavras-chaves: forma urbana, SIG, potencial solar.

ABSTRACT

This paper aims to estimate the incident solar radiation in buildings roofs using urban typologies. It identifies relationships between the morphological attributes describing urban form and its potential for solar energy. Urban morphological classes of reference for the city of Maceió, in Brazil, were identified applying a set of spatial metrics that describes the shape of urban buildings, such as density, verticality, compactness, contiguity, roughness etc. Using a Geographic Information System (GIS) and statistical analysis, these classes were previously mapped on a spatial resolution of 500x500m. To estimate the solar potential on the buildings roofs, the morphological classes were submitted to computer simulations using a simplified radiosity algorithm (SRA-Citysim). This algorithm allows us to calculate, among others, the anisotropy of the sky, buildings obstructions and inter-reflections between them. Due to the high solar availability potential in low latitudes, a reduced relative standard deviation on the results for all morphological classes was obtained. Pondering these results with the total usable floor area index of buildings in the urban fabric of Maceió, it was then possible to map its effective solar potential. It was suggested an important impact of three major morphological parameters: the plot ratio, the floor area index and the standard deviation of the built height.

Keywords: urban form, GIS, solar potential.

1. INTRODUÇÃO

A morfologia urbana exerce papel fundamental no desempenho ambiental dos espaços construídos, podendo representar uma contribuição determinante tanto para a qualidade ambiental dos espaços interiores e exteriores, como para o potencial de produção de energia descentralizada nas cidades. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas recentemente no sentido de medir o impacto da forma dos edifícios urbanos em termos de sua implicação para a sustentabilidade das cidades. A fim de estabelecer relações entre os diferentes atributos que definem a forma construída dos edifícios e as variáveis físicas do meio ambiente, têm-se enfatizado bastante sobre o uso de algumas métricas espaciais.

Como exemplo disso, inicialmente, Oke (1987) relacionou tanto o fator de visão do céu como o prospecto médio urbano (razão da altura dos edifícios e a distância entre eles) à intensidade do fenômeno da ilha de calor urbano, baseando-se também nos efeitos do albedo na absorção da radiação de onda curta e inibição das trocas radiativas de onda longa. Em estudos mais recentes sobre a mesma problemática, Stewart e Oke (2009) sugeriram um zoneamento climático local (*Local Climate Zone*) a partir de modelos tipológicos de forma urbana caracterizados por atributos morfo-climáticos (estruturas construídas, superfícies e atividades humanas).

Ratti et al. (2005) identificaram a relação entre a área sobre volume construído e zonas passivas e não-passivas no consumo de energia, utilizando modelos DEM (*Digital Elevation Model*), em Londres, Toulouse e Berlin. DEM tem sido bastante aplicado para realizar cálculos relativamente complexos da envoltória solar urbana. Morello e Ratti (2009) usaram este método associando um modelo de céu dado por *Meteonorm* para introduzir o conceito de ‘superfície iso-solar’ (*iso-solar surface*) que amplia o conceito de envoltória solar por meio de considerações energéticas. Maizia et al. (2009) classificaram quadras urbanas em quatro categorias (habitação coletiva descontínua, contínua, dispersa e densa), observando a organização urbana nas exigências de energia e também dos ganhos solares.

Nas últimas duas décadas, foi realizado um progresso significativo na tentativa de medir e analisar padrões espaciais que ajudassem a caracterizar a forma urbana. Embora a aplicação de determinadas métricas espaciais seja uma das metodologias de maior potencial na caracterização da forma urbana, apenas recentemente estes índices têm sido utilizados de modo mais sistemático (ADOLPHE, 2001; HUANG et al., 2007; SALAT, 2011).

Cada conjunto de métricas ou indicadores pode variar em função do(s) objetivo(s) e da escala de interesse. É preciso ressaltar que não existe ainda um conjunto definido de indicadores específicos para uso no ordenamento urbano, uma vez que a importância de cada um varia conforme o objetivo e características da paisagem urbana em estudo (HEROLD et al., 2005). Tal sistema de métricas espaciais permitiria, num primeiro momento, repartir os diferentes tecidos urbanos existentes, e retirar os traços comuns entre as várias cidades, criando tipos em função de uma temática. Podendo também constituir um conjunto de ferramentas de auxílio à decisão bastante útil aos urbanistas (como na elaboração de diretrizes para códigos edilícios), pois possuem, muitas vezes, caráter intuitivo, fácil de apreender (SALAT, 2011). Além disso, estudos empíricos têm comprovado o uso de métricas espaciais e do sensoriamento remoto em ambiente urbano como uma prioridade na investigação das cidades (BATTY e LONGLEY, 1994; ALBERTI e WADDELL, 2000).

No contexto das pesquisas brasileiras, poucos trabalhos aplicaram métricas espaciais associadas à modelos numéricos nos estudos sobre o impacto da morfologia urbana no clima local. Amorim et al. (2009) propuseram o uso de imagem satélite para análise da textura urbana, no sentido de destacar padrões morfológicos representativos de áreas urbanas em Recife-PE, a partir de diferentes dinâmicas sociais e urbanas. Lima e Assis (2003) descreveram em SIG, um processo para estimar a massa de construção e prever o balanço de energia, na cidade de Belo Horizonte-MG. Mendonça e Assis (2003), visando amenizar o impacto da ocupação do solo no clima local, identificaram e registraram características locais, definindo áreas urbanas homogêneas que serviram de base para formular uma hipótese de ventilação urbana local. Souza et al. (2010) avaliaram o papel do fator de visão do céu na intensidade de ilhas de calor em um bairro residencial de Bauru-SP.

2. OBJETIVO

A proposta do presente trabalho consiste em apresentar uma cartografia estimada do potencial solar na cobertura dos edifícios de classes tipo-morfológicas urbanas de referência em Maceió-Alagoas.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

- Automação e cálculo dos atributos da forma urbana, com auxílio das ferramentas do programa ArcMAP/ArcGIS® e aplicação para a cidade estudo de caso, Maceió-Alagoas;
- Análise e tratamento estatístico dos dados morfológicos urbanos classificação das estruturas urbanas de referência;
- Simulação da irradiação estimada na coberta das edificações urbanas a partir das classes de estruturas urbanas de referência definidas no item b.

3.1. Estudo de caso: a cidade de Maceió - Alagoas

Para aplicação da metodologia proposta nesse trabalho, foi realizado um estudo de caso na cidade de Maceió, Alagoas (Figura 1).

A capital alagoana, situada na região Nordeste do Brasil, à 9°40' Sul e 38°37' Oeste, estende-se por uma área de aproximadamente 500 km², dos quais 212 km² compõem sua área urbana. O município conta com 943.110 habitantes, sendo 932.129 da sua crescente população urbana (IBGE, 2011). Desde a metade do século XX, a cidade de Maceió vem acompanhando o crescimento do processo de urbanização como as demais grandes cidades brasileiras, resultando em uma maior demanda por espaços de habitação.



Figura 1- Posição geográfica da capital alagoana Maceió e a área urbana do município (Fonte: SEPLANDE, 2012).

O clima de Maceió é do tipo tropical quente e úmido, segundo a classificação climática de Köppen corresponde ao tipo As', caracterizado por reduzidas oscilações térmicas, tanto diárias quanto anuais, e precipitação concentrada, sobretudo, nos meses de outono e inverno. A temperatura média anual é de 24,8°C e a variação anual é de 2,8°C entre os valores médios mensais da temperatura do ar. Por ser uma cidade litorânea e estar sob a influência de grandes massas d'água, apresenta taxas de umidade relativa do ar com média de 78% (ALMEIDA e BARBIRATO, 2004). Quanto aos dados de radiação solar, observa-se igualmente uma variação ao longo do ano bastante reduzida, principalmente quanto a componente difusa. Os valores de radiação direta apresentam, no entanto, uma redução mais significativa no período de inverno, devido ao aumento da nebulosidade e precipitação, especialmente, durante o mês de junho (Figura 2).

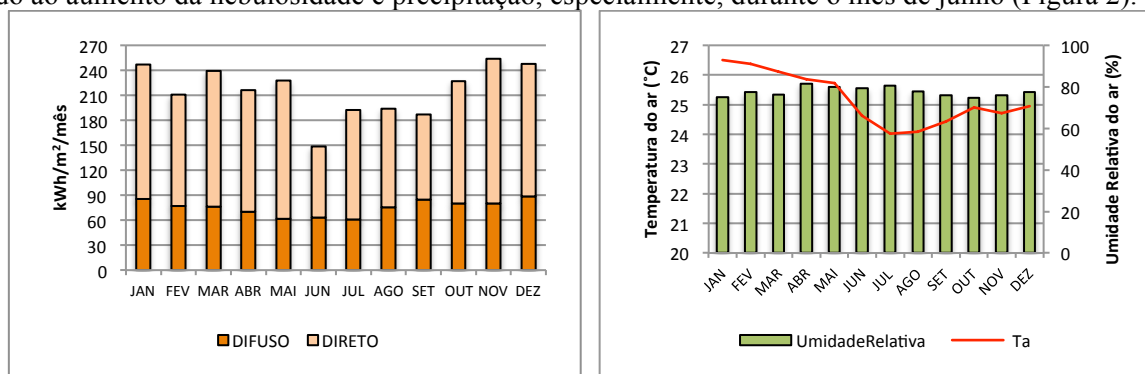


Figura 2 – Dados de irradiação solar direta e difusa e médias de temperatura e umidade relativa do ar para cidade de Maceió – AL (Fonte: Meteonorm, 2012).

3.2. Classificação morfológica do tecido urbano

Descreve na sequência a metodologia e os principais atributos morfológicos empregados para a classificação morfológica do tecido urbano de Maceió-AL.

3.2.1. Uso do SIG e definição da escala de análise

Nessa primeira etapa metodológica do trabalho, dados vetoriais urbanos da cidade de Maceió - fornecidos pela Secretaria de Planejamento do Estado de Alagoas (SEPLANDE) – foram tratados por meio do uso de um SIG, o programa comercial ArcGIS®, com o qual foi também possível criar rotinas de cálculo com auxílio das ferramentas e técnicas avançadas de geoprocessamento fornecidas pelo *ArcToolbox* do programa. Ferramentas estas que foram empregadas na construção de um modelo, no ambiente do módulo *Modelbuilder* do ArcMAP®, o que permitiu automatizar o cálculo dos parâmetros morfológicos para qualquer conjunto de dados vetoriais urbanos (em 2D e meio)¹.

A fim de realizar a caracterização de áreas homogêneas, foi utilizada uma malha de cálculo. Como o dimensionamento de uma malha requer um recorte de objetos urbanos (ruas, edifícios), este recorte pode ser maior ou menor, dependendo das características do tecido urbano em questão, não devendo ser, nem muito pequeno, para não representar apenas um fragmento pouco representativo do tecido urbano, nem demasiado grande, que possa englobar diferentes estruturas. Para definição da resolução mais adequada da malha de estudo, foram realizados estudos estatísticos, visando analisar a predominância dos elementos no interior das duas resoluções consideradas inicialmente (500m e 250m). Os resultados obtidos, para os 50 bairros de Maceió, encaminharam à escolha da malha de 500m, contendo 694 células de avaliação. O desvio padrão e médias resultantes para alguns parâmetros selecionados para uma avaliação preliminar, tais como altura e densidade da área construída no solo, demonstraram melhor adequação da malha de maior resolução espacial (Tabela 1).

Tabela 1 - Resultados estatísticos dos dados morfológicos para o tecido urbano de Maceió em duas resoluções de malha de cálculo.

Estatísticas	Observações		Mínimo		Máximo		Média		Desvio padrão		
	250	500	250	500	250	500	250	500	250	500	
<i>Resolução espacial da malha</i>											
Parâmetros	Altura média	2163	694	3,00	3,00	35,0	23,7	5,80	5,81	2,77	2,51
	Densidade construída	2163	694	1,00	1,00	11,1	7,90	1,70	1,69	0,93	0,84
	Coefficiente de aproveitamento	2163	694	0,00	0,00	3,50	0,60	0,27	0,11	0,36	0,13
	Coefficiente de ocupação do solo	2163	694	0,00	0,00	0,70	2,10	0,15	0,21	0,30	0,15

3.2.2. Atributos morfológicos empregados na análise e classificação da forma urbana

A metodologia utilizada para definição dos parâmetros da forma urbana a serem empregados, foi a desenvolvida por Adolphe (2001). A proposta do autor partiu de uma modelagem espacial simplificada da morfologia urbana, resultando na definição de um conjunto de indicadores de desempenho ambiental de tecidos urbanos: densidade, rugosidade, porosidade, compacidade, contiguidade, rugosidade, prospecto médio, entre outros. As hipóteses climáticas e morfológicas consideradas, bem como os procedimentos metodológicos do desenvolvimento desse sistema de indicadores, podem ser encontrados, em detalhe, em Adolphe et al. (2002). Os principais indicadores morfológicos considerados nesse trabalho podem ser lidos conforme as equações apresentadas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2- Descrição dos principais indicadores relacionados a densidade utilizados no estudo.

Indicador/parâmetro	Definição / cálculo
Altura média ponderada	$H_{med} = \frac{\sum_i (h_{edf_i} \times S_{sol_i})}{S_{sol_{tot}}}$ <p>Eq.1</p> <p>Onde, h_{edf_i} = altura do edifício i; S_{sol_i} = Área construída no solo do edif. i; $S_{sol_{tot}}$ = Área total construída na malha;</p>
Área útil total construída	<p>- A partir da altura foi deduzido o número de pavimentos (igual ao valor arredondado da altura dividida por 3). Multiplica-se em seguida, o número de pavimentos pela superfície no solo.</p> $S_{tot} = \sum_i \left(\frac{h_{edf_i}}{3} \cdot S_{sol_i} \right)$ <p>Eq.2</p> <p>Onde, h_{edf_i} = altura do edifício i; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i.</p>
Compacidade	<p>- Consiste na relação entre a área de envoltória exterior dos edifícios na malha e o volume destes elevado à 2/3 potência.</p> $Comp_{edf} = \frac{S_{env\ ext}}{(V_{edf})^{2/3}}$ <p>Eq.4</p>

¹ Dados vetoriais urbanos em 2D e meio - ou pseudos-3D – consistem em representação geométrica dos edifícios urbanos em 2D, cuja altura (o “Z” dos vetores) seria apenas deduzida a partir das informações de atributo disponíveis.

Onde, $S_{env\ ext}$ = Área da envoltória exterior; $V_{edf\ i}$ = Volume do edifício i .

Contiguidade - A contiguidade de um edifício é calculada como a área das paredes geminadas sobre a área total da envoltória.

$$Cont_i = \frac{S_{env\ tot} - S_{env\ ext}}{S_{env\ tot}} \quad \text{Eq.5}$$

$S_{env\ tot}$ = Área total da envoltória do edifício; $S_{env\ ext}$ = Área da envoltória exterior.

Rugosidade absoluta - Consiste na razão da soma das alturas ponderadas pela sua superfície pela superfície total do tecido urbano considerado (construído e não construído).

$$R_g = \frac{\sum_{const} S_i * H_i}{\sum_{const} S_i + \sum_{vazio} S_j} \quad \text{Eq.6}$$

Onde, S_i é área construída do edifício i , H é a sua altura, e S_j é a área no elemento não construído j .

COS (coeficiente de ocupação total) - Corresponde à soma das áreas úteis construídas, dividido pela área total da malha.

$$COS = \frac{\sum_i S_{tot\ i}}{S} \quad \text{Eq.9}$$

Onde, S_{tot} é a Área útil total construída do edifício i ; S = Área total na malha;

CES (coeficiente de ocupação do solo) - Corresponde à soma das áreas construídas no solo, dividido pela área total da malha.

$$CES = \frac{\sum_i S_{sol\ i}}{S} \quad \text{Eq.10}$$

Onde, $S_{sol\ i}$ = Área construída no solo do edifício i ; S = Área total na malha;

Verticalidade

$$V = h_{edf}^2 / S \quad \text{Eq.11}$$

Onde, $h_{edf\ i}$ = altura do edifício i ; $S_{sol\ i}$ = Área construída no solo do edifício i ; $S_{sol\ tot}$ = Área total construída no solo da malha;

Prospecto médio - Relação da altura média ponderada pela largura da rua.

$$P_M = H_{med} / l \quad \text{Eq.12}$$

Onde, H_{med} = Altura média ponderada dos edifícios na malha; l = Largura da rua.

3.2.3. Análise de componentes principais e análise de agrupamento

Inicialmente uma ampla gama de parâmetros foi lançada na rotina de cálculo, a fim de completar uma Análise de Componentes Principais (ACP).

Uma ACP consiste em análise estatística que pode ser usada para avaliar as inter-relações entre um grande número de variáveis, de modo a condensar a informação contida nelas em um conjunto menor de variáveis estatísticas, com perda mínima de informação. A utilização dessa técnica de análise multivariada visa minimizar as redundâncias que possam existir, possibilitando a captação da maior variabilidade dos dados em poucas componentes, tornando mais simples o mapeamento das informações (ALENCAR, 2009).

Num segundo momento, lançou-se mão de uma análise de agrupamentos ou *clustering analysis*. Este método estatístico não-paramétrico visa identificar e agrupar objetos por similaridade, conforme algum atributo particular, possibilitando a identificação de padrões de comportamento. O método de *k-means clustering* foi a técnica mais adequada para aplicação na metodologia desse estudo. O algoritmo deste método consiste em escolher uma partição inicial dos dados e, em seguida, modificar os membros de classes a fim de obter uma nova partição que revele melhor a estrutura natural dos dados iniciais. Assim, os pontos de k são especificados como centróides (médias de cada atributo) de classes k , calculando-se a distância euclidiana entre cada elemento e os centros destes. Os elementos são, então, atribuídos à classe cujo centro é o mais próximo. Os centros de cada classe são, em seguida, recalculados e o procedimento repetido, até que o algoritmo possa convergir para uma posição estável, minimizando a variância a cada iteração (DIDAY et al., 1982). Uma boa divisão de um conjunto de observações em grupos é aquela onde os elementos de um mesmo grupo são os mais parecidos entre si (menor variância intraclasse) e onde os elementos de grupos diferentes são os mais diferentes entre si (variância interclasse). Este passo é dado para verificar a robustez dos grupos de objetos gerados.

Ressalta-se que as classes tipológicas destacadas nesse trabalho são puramente morfológicas e independentes dos seus usos.

3.3. Cálculo de predição da irradiância de onda curta e longa pelo modelo simplificado de radiosidade (CITYSIM)

Para previsão da radiação solar em contexto urbano, empregou-se o algoritmo simplificado de radiosidade (*Simplified Radiosity Algorithm - SRA*) de Robinson e Stone (2004), que se encontra programado no código Citysim. Em síntese, o SRA é desenvolvido a partir de um esquema de discretização do céu, dado por Tregenza e Sharples (1993), onde a abóbada é dividida em 145 partes, cada uma compreendendo um ângulo

sólido e uma radiância calculada pelo modelo *All Weather* de Perez (PEREZ et al., 1993), que integra a anisotropia da radiação solar difusa. A irradiância é prevista, na sequência, computando o ângulo de incidência e as frações de visibilidade solar e do céu a partir de cada superfície urbana receptora e a declividade das mesmas. Para ter em conta a influência do ambiente urbano, este é considerado de duas formas. De uma lado, na redução da radiação direta em função das obstruções produzidas pelos edifícios da cena urbana, bem como, da topografia do sítio (*farfield obstructions*) e, do outro, pelo efeito das inter-reflexões entre os edifícios e entre os edifícios e o solo. Neste último, encontra-se a principal hipótese simplificadora do modelo, na qual todas as superfícies urbanas são tidas como superfícies *lambertianas* (ou seja, como refletoras difusos ideais). Utilizando as mesmas informações de ângulo sólido e ângulo de visão, calcula-se a irradiância de onda longa (emitida pela abóbada celeste e também pelas superfícies da cena urbana), dadas as temperaturas do céu e das superfícies adjacentes (ver Robinson, 2010). O modelo obteve bons resultados quando comparado ao modelo RADIANCE (WARD LARSEN e SHAKESPEARE, 1997) para parâmetros de entrada equivalentes (ROBINSON e STONE, 2004).

As variáveis de entrada do programa podem ser inseridas para parâmetros de clima, geometria e especificações termofísicas. Para o clima, faz-se necessário definir uma localidade geográfica e gerar um ano climático completo em intervalo horário. Para a geometria, considera-se um conjunto de edifícios em 3D, para os quais é possível inscrever a complexidade da forma construída, inserindo-se diferentes alturas, distâncias e orientações dos edifícios. O modelo permite também a definição de um perfil de obstruções em função da topografia do sítio urbano. Quanto às especificações termofísicas, o modelo permite atribuir valores, entre outros, para o fator solar e o albedo das superfícies construídas e do solo.

Para o estudo de caso nesse trabalho, o modelo foi aplicado para avaliar grupos de edifícios existentes da cidade de Maceió-Alagoas. Foi utilizado os dados vetoriais urbanos, obtidos junto a SEPLANDE. O albedo das superfícies foi estimado para todas as classes, utilizando a referência medida por Araújo et al. (2010). Utilizando sensoriamento remoto, os autores estimaram um valor médio entre 0,10 e 0,15 para as zonas menos urbanizadas e entre 0,16 e 0,22, para centralidades mais densamente construídas com materiais que apresentam maior refletividade.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados serão apresentados a seguir em duas etapas. Primeiro, discute-se brevemente a análise estatística dos dados morfológicos obtidos, apresentando-se ao fim uma cartografia da distribuição das classes tipológicas elaborada para a cidade de Maceió. Na descrição de cada classe de referência, será considerada, principalmente, a caracterização da forma pelo conjunto de atributos morfológicos, associando-os ao potencial de radiação solar obtido.

4.1. Análise dos dados e classificação morfológica

Os dados para todos os indicadores calculados no ArcMAP/GIS® foram analisados com auxílio do aplicativo XLStat no Excel.

Inicialmente foi analisada a matriz de correlação entre os indicadores calculados para as 694 zonas da malha. A fim de evitar redundância nas informações, decidiu-se conservar apenas um dos parâmetros dos pares onde a correlação era importante. Dos quatorze indicadores iniciais, após ACP foram retidos apenas: a rugosidade, altura média, o COS, compacidade e a contiguidade.

Na sequência, o método de análise de agrupamento (*Clustering analysis*) permitiu agrupar as células da malha de edifícios com respostas morfológicas mais próximas, destacando cinco classes principais, que podem ser facilmente identificadas por termos descritivos correntes da morfologia urbana (Tabela 3). Estas classes serão melhor descritas e analisadas na sequência do trabalho.

A descrição completa do método simplificado de classificação morfológica do tecido urbano, bem como os resultados para Maceió-AL, poderão ser encontrados com mais detalhe em Martins et al. (2013).

Tabela 3 - Cinco classes tipológicas urbanas segundo indicadores morfológicos.

Classe	Altura ponderada	Compacidade	Contiguidade	Rugosidade	COS	CES	Porosidade
1 Horizontal disperso	4,223	4,75	0,071	0,104	0,08	0,08	0,975
2 Vertical baixo	9,112	5,18	0,022	0,252	0,88	0,22	0,960
3 Horizontal contínuo/geminado	6,294	3,87	0,385	2,735	2,38	0,74	0,668
4 Coletivo vertical	17,042	4,94	0,226	1,578	4,15	0,49	0,907
5 Horizontal compacto	5,157	3,66	0,036	1,714	0,75	0,56	0,700

4.2. O potencial solar das classes morfológicas de referência para Maceió

Nessa etapa, são discutidos os resultados morfológicos ao mesmo tempo que o potencial solar obtido. Num primeiro momento, discute-se as classes morfológicas de referência obtidas para Maceió e o potencial solar bruto obtido para cada uma (ou seja, a irradiação solar incidente por metro quadrado de área de cobertas) e, num segundo momento, desagregando as classes iniciais, elabora-se uma cartografia do potencial solar ponderado pelo COS - coeficiente de aproveitamento (ou seja, levando-se em conta o número de pavimentos dos edifícios).

A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar um desvio-padrão relativo bastante reduzido (inferior a 3%) da irradiação solar anual entre as classes, demonstrando um importante potencial solar da cobertura dos edifícios para todas as tipo-morfologias de referência identificadas neste estudo para a cidade de Maceió-AL. Demonstrando pouca influência do entorno construído na produção do efeito de sombras, por exemplo. De fato, para fins de aproveitamento da energia solar, a trajetória solar em baixas latitudes favorece bastante a captação desse recurso por meio das cobertas em diversas formas construídas, principalmente, se o desvio-padrão da altura construída do entorno não for muito importante.

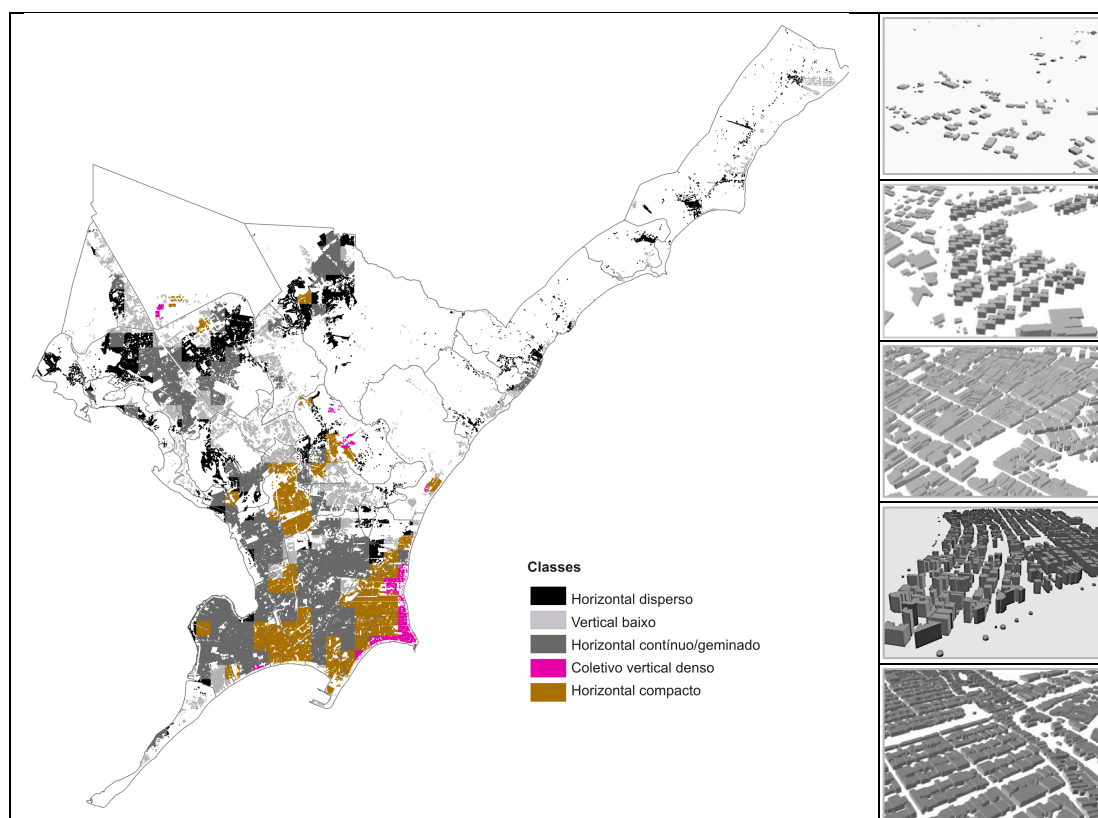


Figura 3 - cartografia da morfologia urbana para cidade de Maceió – AL (MARTINS et al., 2013).

A classe morfológica 1 identificada compreende, principalmente, os bairros da periferia da cidade, tecido caracterizado predominantemente, por ser horizontal com edificações residenciais individuais e isoladas. Essa classe representa 37% do tecido urbano de Maceió e apresenta um coeficiente de aproveitamento (COS) baixo, de 0,08. Com edificações mais baixas (4,22 m de altura média), estas produzem menos sombras projetadas nos edifícios do entorno e, por consequência, apresenta maior potencial solar por metro quadrado de superfície de coberta, em média 2056,7 kWh/m².ano (Figuras 3 e 4).

A classe 2 cobre 9% do tecido urbano da cidade. Apresenta, entre outras tipologias, a habitação vertical coletiva de até 4 pavimentos. Essa tipologia, cada vez mais presente no espaço urbano das cidades brasileiras, a exemplo dos conjuntos surgidos, sobretudo na década de 80, como o conjunto José Tenório no bairro da Serraria em Maceió. A tipologia é voltada para população de média e baixa renda. Caracterizam-se pela ocupação de toda uma quadra ou de áreas ainda maiores, muitas vezes, com arruamentos internos. Reúnem edificações verticais em forma de prismas regulares, apresentando compacidade média de 5,18 e contiguidade, quase sempre nula. Ao observar-se o tecido presente nessa classe tipológica, quando composta dos conjuntos residenciais coletivos, estes se encontram presos no tecido e rodeados por habitações individuais, representando uma classe que pode ser descrita por certa heterogeneidade e elevado desvio-padrão da altura construída. As edificações nesta classe apresentam suas alturas, em média, de 9,11m e o

espaçamento entre os edifícios é menor comparado ao da classe anterior. Características que podem explicar uma menor média de irradiação solar anual nas coberturas, cerca de 7% menos que a classe 1.

A classe 3 representa 32% da superfície urbana construída da cidade e corresponde, principalmente aos bairros do centro comercial da cidade, centro histórico, entre outros. Essas regiões são compostas de imóveis que variam de 1 a 4 pavimentos com altura média de 6,30 m. Com a compactidade média menos elevada entre as classes tipológicas identificadas (3,86) e, complementarmente, a contiguidade ponderada mais expressiva, as edificações encontradas nessas regiões estão inseridas em tecidos pouco porosos, com espaçamentos bastante reduzidos entre os edifícios. Edifícios estes, na maioria das vezes, geminados. Tanto o CES quanto o COS apresentam-se mais elevados nessa classe tipológica (0,74 e 2,38, respectivamente), o que pode proporcionar área importante em potencial disponível para captação solar.

A classe 4 é composta principalmente por habitações situadas na orla marítima de Maceió. É mais heterogênea que as anteriores, onde as formas da coberta e a altura podem variar (desvio padrão da altura média de 9,28 m), visto a presença ainda importante de edificações individuais baixas. Apesar do progressivo processo de verticalização, essa classe tipológica compreende apenas cerca de 3% do tecido da cidade. Apresenta elevada densidade total construída (COS de 4,15). Em função dos recuos exigidos pelo atual código de edificações, a compactidade é elevada (4,94) e a contiguidade baixa de 0,036. Nesta classe, sendo a mais verticalizada (altura média de 17,04m) entre as tipo-morfologias estudadas, pode apresentar o menor potencial solar, se a irradiação solar calculada por superfície de coberta for dividida pela área total habitada, como será visto mais adiante. Ressaltando-se, portanto, a importância dos indicadores morfológicos de densidade (COS, CES e a verticalidade) na determinação da viabilidade do aproveitamento da energia solar potencialmente recebida na superfície da coberta, que nesse caso tem média superior a 1900 kWh/m².

A classe 5 composta, predominantemente, por habitat individual denso, apresenta caráter bastante homogêneo, com poucas variações, que por vezes podem ser expressas nos volumes construídos de edificações que apresentam até 2 pavimentos (altura média de 5,18 m). Cobre cerca de 19% da malha urbana de Maceió. Em virtude da sua baixa compactidade (3,66) e elevada contiguidade (0,24), de um lado revela-se uma importante densidade construída, e do outro, edificações de volumes, relativamente, reduzidos, com poucas fachadas e aberturas voltadas para o exterior, o que pode comprometer a qualidade interna dos espaços. Em virtude de sua baixa heterogeneidade na altura construída e elevada densidade, os edifícios podem produzir sombras nas fachadas, mas não ao nível das cobertas, podendo apresentar um forte potencial de aproveitamento da energia solar disponível.

Na figura 4 abaixo, são apresentados os resultados obtidos para irradiação solar total incidente por metro quadrado na coberta de edifícios situados em cada uma das cinco classes morfológicas de Maceió.

Como já dito, observa-se um elevado potencial solar para todas as classes, considerando-se que para viabilizar a integração de sistemas solares para produção de eletricidade nas cidades, por exemplo, seria necessário um limite mínimo de 1000kWh/m² por ano (CHENG et al., 2006), indicando um excelente aproveitamento para Maceió. No entanto, faz-se necessário levar em conta o impacto importante do processo de verticalização que tem marcado o processo de urbanização da cidade. Assim, para cartografar a adequabilidade para aproveitamento da energia solar, a irradiação solar incidente foi ponderada pela área total útil por pavimentos (ver Figura 5).

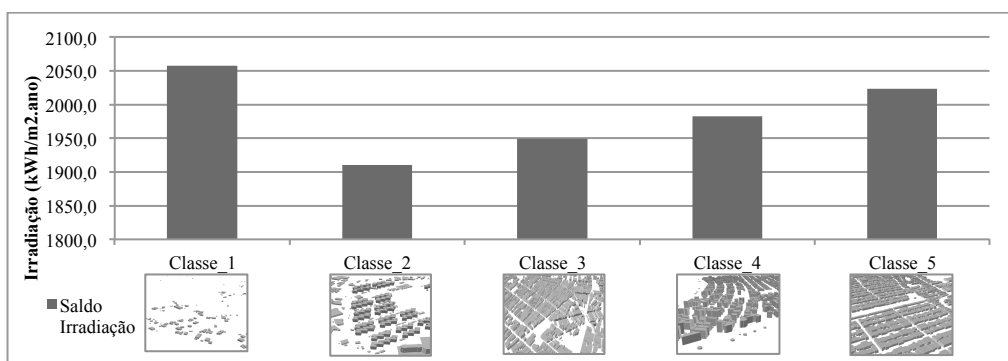


Figura 4 - Saldo de radiação total para a coberta dos edifícios nas cinco classes morfológicas de referência de Maceió.

Contrastando, portanto, a cartografia preliminar do potencial solar com a cartografia da forma construída para Maceió, verifica-se uma importante dependência da verticalidade, do coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação para adequabilidade otimizada do potencial solar das construções urbanas, destacando-se o elevado potencial das vizinhanças urbanas predominantemente horizontais e de grandes superfícies

construídas no solo, como em alguns bairros da periferia da cidade e de centralidades como no bairro do Farol (Figura 5). A verticalização das construções, ao minimizar a superfície de envoltória exposta a radiação solar por unidade habitacional, reduz o potencial solar para produção de energia descentralizada por metro quadrado habitado, mas pode, por outro lado, contribuir para a redução dos ganhos térmicos por aporte solar nesses envelopes construídos, podendo melhorar as condições de conforto interior e, assim, reduzir a demanda energética.

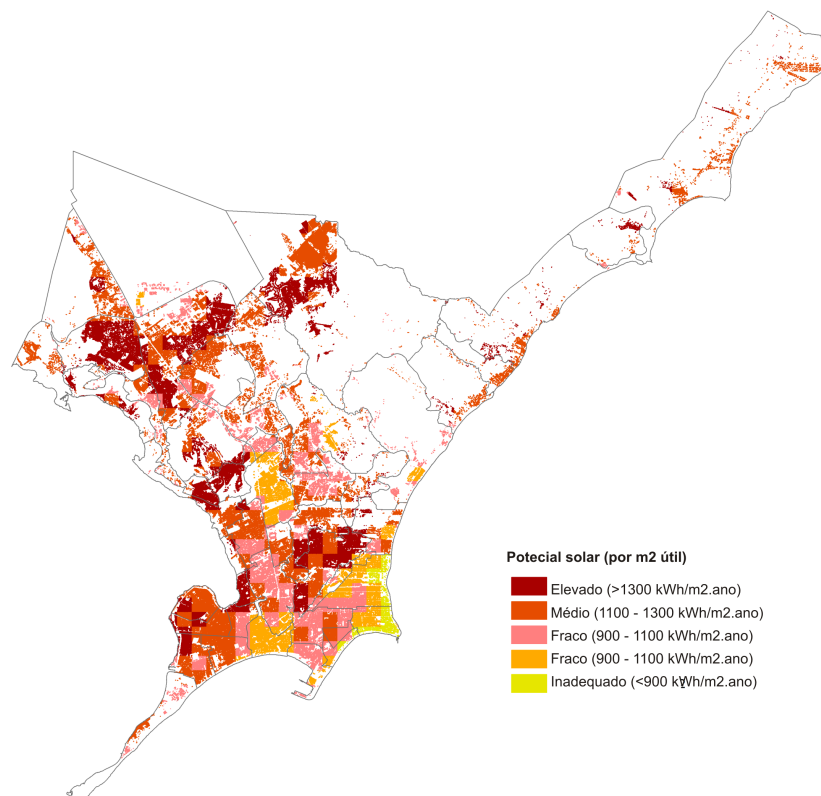


Figura 5 – Mapa do potencial solar ponderado pela área construída total dos edifícios em Maceió.

5. CONCLUSÕES

O trabalho proposto apresentou um mapeamento preliminar do potencial solar útil associado a um estudo de recortes morfológicos representativos do tecido urbano da cidade de Maceió, Alagoas.

Este estudo é uma abordagem inicial sobre a relação entre indicadores da forma urbana e da densidade construída ao comportamento do potencial solar de estruturas urbanas existentes. Nessa etapa, trata-se apenas de uma análise monocritério (potencial solar) e, ressalta-se que outros fatores (tais como, a relação da densidade e da rugosidade da forma urbana com o comportamento aerodinâmico na cidade, a presença da vegetação urbana etc.), também possuem peso importante no balanço de energia do clima local, e na termodinâmica dos edifícios, não sendo desprezíveis na abordagem sistêmica das cidades em regiões de clima tropical, devendo ser explorado em trabalhos futuros.

Faz-se necessário igualmente compreender e sobrepor os resultados obtidos ao consumo real das principais tipologias, bem como refletir sobre a integração arquitetônica (em função da forma da cobertura em escala menor, por exemplo) e paisagística urbana dos sistemas solares.

A aplicação de modelos computacionais na escala urbana requer ao mesmo tempo um certo grau de precisão, simplicidade e disponibilidade de banco de dados existentes. Acredita-se, portanto, que os indicadores simplificados da morfologia urbana possam subsidiar de modo operacional no processo de decisão e planejamento das cidades, possibilitando a integração de fatores importantes que definem o desempenho ambiental dos espaços construídos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLPHE, L. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, 2001. P.183–200.
- ADOLPHE, L.; CHATELET, A.; AIT-AMEUR, K. et al. SAGACités, Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines, Rapport final. MENRT, Action Concertée Incitative Ville, 2002.

- ALBERTI, M.; WADDELL, P. An integrated urban development and ecological simulation model. *Integrated Assessment*, v.3, 2000. p.215-227.
- ALENCAR, B.J. A análise multivariada aplicada ao tratamento da informação espacial: uma abordagem matemático-computacional em análise de agrupamentos e análise de componentes principais. 2009. 200f. Tese (Doutorado)–Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia-Tratamento da Informação Espacial.
- ALMEIDA, E.; BARBIRATO, G.M. A morfologia urbana como determinante de variações climáticas locais: estudo comparativo das orlas marítima e lagunar de Maceió – AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, 2004. Anais...São Paulo: ENTAC, 2004.
- AMORIM, L.; BARROS FILHO, M.N.; CRUZ, D. Urban Texture and Space Configuration Analysing Recife's Urban Fragments. In: INTERNATIONAL SPACE SYNTAX SYMPOSIUM, 7. Proceedings...Stockholm: KTH, ISSS, 2009.
- ARAUJO, T. L.; DI PACE, F. T. Estimativa do albedo da superfície terrestre em Maceió-AL utilizando imagens do satélite TM/LANDSAT 5. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...**CBM, 2006, Florianópolis. EM CD ROM, 2006.
- BATTY, M., LONGLEY, P. *Fractal Cities, a geometry of form and function*. Academic Press: Londres, UK, 1994.
- CHENG, V.; STEEMERS, K.; COMPAGNON, R.; MONTAVON, M. Urban form, density and solar potential. *PLEA 2006. Anais...Passive Low Energy Architecture*. Geneva, Suíça, 2006.
- DIDAY, E.; LEMAIRE, J.; POUGET, J.; TESTU, F., *Eléments d'analyse de données*. Paris: Editions Dunod-Bordas, 1982.
- HEROLD, M.; COUCLELIS, H.; CLARKE, K.C. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environments and Urban systems*, 2005.
- HUANG, J.; LUB, X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, v.82, 2007. p. 184–197.
- IBGE. Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo. Rio de Janeiro: IBGE. 2010. 270p.
- LIMA, H.G.; ASSIS, E.A. Building mass calculation using GIS software for climate responsible urban planning applications. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 20, 2003. Proceedings...Santiago, Chile: PLEA, 2003.
- MAÍZIA, M., SÈZE, C., BERGE, S., TELLER, J., REITER, S., MÉNARD, R. Energy requirements of characteristic urban blocks, **Anais CISBAT 2009 - Renewables in a changing climate - From Nano to urban scale**, Lausanne, Switzerland, 2009. pp 439-444.
- MARTINS, T.A.L.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: estudo de caso na cidade de Maceió-AL. **Ambiente Construído**. ANTAC, 2013. (Artigo em edição para publicação).
- MENDONÇA, R. S. R.; ASSIS, E. S. Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte. *Ambiente Construído*, v. 3, n.3. 2003.
- MORELLO, E., RATTI, C. Sunscapes: “Solar envelopes” and the analysis of urban DEMs. **Computers, Environment and Urban Systems**, vol. 33, no. 1, 2009, pp 26-34.
- OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. Londres: Routledge, 1987.
- PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. All weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation. *Solar Energy* 50(3), 1993. p. 235–243.
- RATTI, C., BAKER, N., STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, vol. 37, no. 7, 2005, pp 762-776.
- ROBINSON, D.; STONE, A. A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research and Technology*, v.26, n.4, p. 271-284, 2004.
- ROBINSON, D. *Computer modeling for sustainable urban design. Physical principles, methods and applications*. Londres: Earthscan, 2011.
- SALAT, S. *Les villes et les formes. Sur l'urbanisme durable*. CSTB. Laboratoire des Morphologies urbaines. Paris: Hermann Editeurs, 2011.
- SEPLANDE. Dados vetoriais urbanos e mapas para a cidade de Maceió e estado de Alagoas, 2012.
- SOUZA, L.C.L.; TENENTE, C.M.; GIUNTA, M.B.; NAKATA, C.M. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 4, 2010.
- STEWART, I.D.; OKE, T. R. Newly developed “thermal climate zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In: SYMPOSIUM ON THE URBAN ENVIRONMENT, 8. Proceedings...US: URBAN, 2009. P. 1-6.
- TREGENZA P, SHARPLES S. *Daylighting algorithms*. ETSU Report S1350, Sheffield, UK: University of Sheffield, 1993.
- WARD LARSEN, G.; SHAKESPEARE, R. *Rendering with radiance—the art and science of lighting visualization*. São Francisco: Morgan Kaufmann, 1997.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de estudo.