

ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO REFERENTE À ILUMINAÇÃO NATURAL PARA O TERRITÓRIO BRASILEIRO

**Raphaela Walger da Fonseca (1); Fernando Flesch de A. Fernandes (2);
Fernando O. Ruttkay Pereira (3)**

- (1) Dr., Pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, raphawf@gmail.com
(2) Graduando de Arquitetura e Urbanismo, bolsista IC – UFSC – CNPq, fernandoflesch@yahoo.com.br
(3) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ruttkay.pereira@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-7080

RESUMO

Para se obter projetos de edifícios que se beneficiem de uma iluminação natural eficiente, é necessário que o arquiteto conheça as características climáticas do local de implantação da edificação, tendo em vista que a luz natural é sensível a uma série de condições climáticas dinâmicas, bem como às características da própria localização (latitude, orientação, etc.). O atual zoneamento bioclimático brasileiro propõe uma divisão do território brasileiro em oito zonas agrupada por similaridades em seus climas com o intuito de otimizar o desempenho térmico das edificações em cada uma das regiões. No entanto, não há uma consideração das características climáticas que sejam importantes para o desempenho luminoso da edificação. Assim, este trabalho visa propor um zoneamento referente à iluminação natural para o território brasileiro. Para isso, analisaram-se cartas de isolinhas de Atlas Solarimétricos Brasileiros juntamente com arquivos climáticos de 20 municípios do país, gerando-se gráficos de frequência de ocorrência para algumas variáveis previamente selecionadas. Como resultado, propôs-se um zoneamento bioclimático do território brasileiro que divide o país em três grandes zonas. O zoneamento obtido constitui-se em uma ferramenta de auxílio ao projeto arquitetônico, oferecendo informações quanto à disponibilidade de luz natural em cada uma das zonas apresentadas. O zoneamento bioclimático luminoso proposto neste trabalho pode ser combinado com o já existente zoneamento bioclimático térmico, fazendo-se a intersecção entre as oito divisões do zoneamento térmico com as três divisões do zoneamento luminoso.

Palavras-chave: iluminação natural, zoneamento bioclimático brasileiro, conforto lumínico

ABSTRACT

To obtain building projects that take advantage of efficient daylighting, it is necessary for the architect to know the climatic characteristics of the building site, since daylight performance is sensitive to several dynamic climate conditions, as well as the building location features (latitude, orientation, etc.). The current Brazilian bioclimatic zoning proposes a division of the country into eight zones grouped by similarities in their climates, with the purpose of optimizing the thermal performance of the buildings in each region. However, there is no consideration of the climatic features that are important for the building luminous performance. Therefore, this paper aims at propose a daylight zoning for the Brazilian territory. For this purpose, Brazilian Solarimetric Atlas charts were analyzed along with weather file data of 20 municipalities, generating frequency of occurrence graphs of some previously selected variables. As a result, it was proposed a bioclimatic zoning of the Brazilian territory that divides the country into three large areas. The obtained zoning consists in an architectural design tool, offering information regarding the availability of daylight in each of the presented zones. The daylight bioclimatic zoning proposed in this work can be combined with the already existing thermal bioclimatic zoning intersecting the eight divisions of the thermal zoning with the three divisions of the daylight zoning.

Keywords: daylighting, Brazilian bioclimatic zoning, luminous comfort

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão populacional e com recursos naturais finitos, é fundamental desenvolver e implementar soluções de economia de energia que atendam às necessidades da sociedade sem afetar a sustentabilidade futura. O aproveitamento da luz natural contribui para a redução de energia necessária para a iluminação de edifícios e, conseqüentemente, da carga térmica gerada pela mesma a ser removida pelo sistema de condicionamento de ar. Como resultado, reduz-se os custos decorrentes desses sistemas, além de favorecer aspectos ambientais e diminuir a utilização de recursos naturais para a produção de energia (SHARP et al., 2014).

A integração da iluminação artificial com a natural (ou vice-versa), para que seja considerada eficiente, deve satisfazer com qualidade as necessidades de quem vai exercer atividades no ambiente e também as necessidades de ambientação características de cada espaço, consumindo o mínimo de energia. Embora o sistema visual humano tenha grande capacidade de adaptação e possa funcionar mesmo com quantidades mínimas de luz, se a iluminação não for considerada adequada, essa economia não pode ser vista como eficiência energética (ASSAF; PEREIRA, 2003).

As decisões críticas com relação ao aproveitamento da luz natural ocorrem na fase conceitual do projeto, quando as configurações do edifício e das esquadrias estão sendo feitas. Já as decisões mais relevantes para economizar energia em iluminação ocorrem na fase de projeto, especificação e comissionamento dos sistemas de controle de iluminação artificial (LESLIE, 2003). Entretanto, para uma boa integração, o sistema de iluminação artificial deve ser concebido de acordo com as distribuições da iluminação natural (MORAES; CLARO, 2014).

Além da questão energética, a luz do dia apresenta um efeito benéfico sobre a saúde física e psicológica dos seres humanos, conjuntamente aumentando a produtividade em ambientes de trabalho (LABIB, 2012). O conceito de *Triple Bottom Line – TBL* (abordagem tripartida) comprova os benefícios financeiros do uso da iluminação natural sob os aspectos econômicos, ambientais e humanos, destacando os humanos como os de retorno financeiro mais rápido (LOFTNESS et al., 2014).

Com o intuito de se obter projetos de edifícios que proporcionem esses benefícios através de uma iluminação natural eficiente, é necessário que o arquiteto conheça as características climáticas do local de implantação da edificação, já que a disponibilidade de luz natural varia conforme a latitude e é sensível a uma série de condições dinâmicas, como a sazonalidade do clima, nebulosidade, etc.

O atual zoneamento bioclimático brasileiro propõe uma divisão do território brasileiro em oito zonas agrupada por similaridades em seus climas, com o intuito de otimizar o desempenho térmico das edificações em cada uma das regiões (ABNT, 2005). No entanto, não há uma consideração das características climáticas que sejam importantes para o desempenho luminoso da edificação. Sendo assim, o objetivo do trabalho é definir um zoneamento referente à iluminação natural para o território brasileiro.

2. OBJETIVO

Definir um zoneamento bioclimático referente à iluminação natural para o território brasileiro.

3. MÉTODO

Para o desenvolvimento do zoneamento partiu-se da seleção de bases de dados existentes que possuíssem informações acerca da disponibilidade de luz natural ao longo do território nacional e da definição das variáveis climáticas que pudessem fornecer tais informações. Com base na análise dos dados levantados foi proposto um mapa dividindo o país em três zonas de disponibilidade de luz natural, conforme descrito a seguir.

3.1. Seleção das bases de dados e definição das variáveis climáticas

As bases selecionadas foram o Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al, 2000, PEREIRA et al, 2006) e os arquivos climáticos disponíveis em formato *.epw no sítio eletrônico do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2016) e/ ou no sítio eletrônico do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE, 2016).

Primeiramente, foi feita uma análise de dados apresentados no Atlas Solarimétrico Brasileiro (TIBA et al., 2000), atlas que apresenta medições solarimétricas do território nacional, importantes para o estudo da influência das condições atmosféricas nas componentes direta e difusa da radiação solar. Os dados consistem em informações coletadas em estações piranométricas e actinográficas espalhadas por todo o território

brasileiro, apresentando cartas de isolinhas de radiação solar global diária, médias mensais e anual; e em estações heliográficas, apresentando cartas de isolinhas de insolação diária, médias mensais e anual.

Na sequência, selecionou-se, entre os diferentes tipos de arquivo climático disponíveis, SWERA¹ (formato TMY²), TRY³ (2005 ou anterior), INMET⁴ (2015, formato TMY) e IWEC⁵; o mais adequado a ser adotado. Os arquivos em formato *.epw permitem a simulação computacional do desempenho termoenergético de edificações. Para este trabalho optou-se pela adoção do SWERA. A escolha baseou-se na adequabilidade dos dados, visto que os arquivos IWEC são disponibilizados para poucas cidades do Brasil; os TRY são disponibilizados para 17 cidades, mas com dados com maior desvio se comparado ao SWERA para radiação solar (Scheller et al, 2015); e os arquivos INMET, que por falta de dados disponíveis, adotam valores constantes para nebulosidade, opacidade do céu, visibilidade e altura de céu, que são importantes para descrever a disponibilidade de luz natural local. Já os arquivos SWERA foram desenvolvidos no mesmo contexto dos Atlas Solarimétricos do Brasil com o intuito de oferecer informações quanto à disponibilidade solar e de ventos para países em desenvolvimento. Existem arquivos climáticos para 20 cidades brasileiras disponibilizados pelo projeto SWERA em parceria com o INPE e LABSOLAR/UFSC. Os arquivos apresentam valores de variáveis climáticas em todas as horas de um ano. Foi selecionado um total de 20 municípios brasileiros que possuíam um arquivo da base de dados SWERA:

- | | | |
|---------------------|------------------|------------------|
| - Belém | - Curitiba | - Porto Velho |
| - Belo Horizonte | - Florianópolis | - Recife |
| - Boa Vista | - Fortaleza | - Rio de Janeiro |
| - Bom Jesus da Lapa | - Jacareacanga | - Salvador |
| - Brasília | - Manaus | - Santa Maria |
| - Campo Grande | - Petrolina | - São Paulo |
| - Cuiabá | - Porto Nacional | |

Dentre as 35 variáveis climáticas desses arquivos climáticos selecionaram-se duas como as mais apropriadas para descrever as características de disponibilidade de luz das cidades: nebulosidade e iluminância global horizontal.

3.2. Proposição do zoneamento

A proposição do zoneamento bioclimático luminoso para o território brasileiro foi feita utilizando-se essas bases de dados de forma complementar em duas etapas. A primeira etapa consistiu na observação e sobreposição das cartas de isolinhas do Atlas Solarimétrico Brasileiro (TIBA et al., 2000), enquanto a segunda etapa consistiu na geração de gráficos de frequência de ocorrência para os dados das variáveis climáticas selecionadas nos arquivos climáticos SWERA das cidades (nebulosidade e iluminância global horizontal).

3.2.1. Avaliação dos mapas do Atlas Solarimétrico

Partiu-se de uma avaliação de dois mapas do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al., 2000) referentes à radiação solar global diária (média anual, dada em MJ/m².dia) e à insolação diária (média anual, dada em horas). Ambos os mapas apresentam escalas referentes a todas as variações em cada mês do ano, apresentando 10 diferentes classificações para a radiação solar global diária e 8 diferentes classificações na insolação diária. Para viabilizar a comparação entre os mapas, estas escalas tiveram suas classificações agrupadas em três faixas, de forma a facilitar a sobreposição dos mapas e consequentes análises. Para a Radiação solar global diária, a classificação das faixas foi de 14, 16 e maior que 18 MJ/m².dia. A classificação da insolação diária se deu em menores ou iguais a cinco horas diárias, seis horas diárias e maiores ou iguais a sete horas diárias.

Estes mapas ainda foram comparados com um terceiro mapa referente ao zoneamento de iluminação natural horizontal difusa proposto por Pereira et al. (2015), que divide o território nacional em duas zonas

¹ SWERA Solar and Wind Energy Resource Assessment

² TMY Typical Meteorological Year

³ TRY Test Reference Year

⁴ Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) RORIZ, M. (2012) revisados pelo LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações em 2015.

⁵ International Weather for Energy Calculations

referentes à quantidade de horas de determinada quantidade de brilho do céu. A principal limitação do zoneamento de iluminação natural horizontal difusa de Pereira et al. (2015) é a desconsideração da parcela direta do sol. Neste sentido, buscou-se incluir esta parcela na presente proposta de zoneamento. Para isto, os três mapas (de radiação solar global diária, de insolação diária e de iluminação natural horizontal difusa) foram impressos em papel vegetal e sobrepostos de forma que ficassem legíveis, possibilitando uma análise das áreas em que características em comum das três variáveis poderiam ser identificadas. Como resultado foi proposta uma divisão do território nacional em três zonas (A, B e C), que teve como principal referência a insolação diária média anual. A “Zona A” é referente à faixa com cinco ou menos horas diárias de insolação; a “Zona B” é referente à faixa com seis horas diárias de insolação; a “Zona C” é referente à faixa com sete ou mais horas diárias de insolação; todas relacionadas à média anual de insolação diária. O mapa resultante desta divisão será aqui chamado de mapa de disponibilidade de luz natural.

3.2. Avaliação dos dados dos arquivos climáticos e refinamento do agrupamento com base no Atlas Solarimétrico

Para cada um dos 20 municípios que possuíam arquivos climáticos SWERA, foram plotados em gráficos de frequência de ocorrência os dados referentes à nebulosidade e à iluminância global horizontal. Os dados de nebulosidade correspondem a uma divisão do céu em 10 partes, sendo contabilizadas as partes encobertas por nuvens em determinada data e horário. Para este trabalho o céu foi classificado em três tipos, considerando-se diferentes intervalos de nebulosidade conforme a quantidade de horas por ano em que o céu se encontrou encoberto, sendo: céu limpo – de 0 a 3 partes do céu encobertas; parcialmente encoberto – de 4 a 7 partes do céu encobertas; ou encoberto – de 8 a 10 partes do céu encobertas.

Já a iluminância global horizontal é dada em valor absoluto, assim, foram propostos também três intervalos conforme a magnitude da iluminância horária, sendo: quantas horas por ano foi obtida uma iluminância menor que 48.000 lux, entre 48.000 e 84.000 lux e maior que 84.000 lux. Essas três faixas de iluminância foram definidas a partir do valor máximo de iluminância global horizontal encontrado para todo o conjunto de cidades, que foi de aproximadamente 120.000 lux. Para facilitar a divisão das faixas de iluminância, traçou-se um paralelo com a variável nebulosidade. Esta última possuía 11 opções de valores, zero a 10 partes do céu encobertas. Assim, o mesmo foi feito com as iluminâncias. A partir do valor máximo de 120.000 lux, os demais valores foram divididos em 11 subgrupos que posteriormente foram agrupados em 3 faixas. A primeira faixa apresenta quatro subgrupos ($12.000 \times 4 = 48.000$ lux), a segunda faixa mais três subgrupos ($12.000 \times 3 + 48.000 = 84.000$ lux) e a terceira faixa considera todos os valores acima de 84.000 lux.

Conforme a sua localização geográfica, os 20 municípios selecionados foram divididos nas três zonas (A, B e C) do mapa de disponibilidade de luz natural proposto como resultado do item anterior. Foram gerados três gráficos de frequência de ocorrência para nebulosidade e três para iluminância global horizontal, sendo uma para cada zona de acordo com os intervalos descritos anteriormente. Com isto foi possível analisar a semelhança entre os gráficos de frequência de ocorrência das cidades agrupadas em cada zona.

Esta análise indicou a necessidade de realocar determinadas cidades em outras zonas a fim de melhor representar as características climáticas das mesmas. Com isto, fez-se uma proposta final de zoneamento levando em conta a semelhança entre os perfis de frequência de ocorrências de ambas as variáveis relacionados prioritariamente à iluminância global horizontal.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos englobam os mapas de zoneamento propostos (antes e depois do refinamento), bem como os gráficos de frequência de ocorrência para as variáveis climáticas nebulosidade e iluminância global horizontal (antes e depois do refinamento).

4.1. Proposta inicial de Zoneamento

A Figura 1 apresenta a proposta inicial de zoneamento bioclimático luminoso, obtida através da análise visual e sobreposição dos mapas do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al., 2000), e do mapa de zoneamento de iluminação natural horizontal de Pereira et al. (2015). A partir da análise dos mapas sobrepostos, optou-se por adotar os dados de insolação diária média anual como norteadores da divisão das zonas, com o intuito de entender a variação de insolação nas diferentes regiões (especificamente para verificar possíveis variações no zoneamento com a inclusão da luz direta, já que o mapa de zoneamento de

iluminação natural horizontal de Pereira et al. (2015) trabalha com a luz difusa). Logo, a divisão do território nacional nas três zonas deu-se da seguinte forma: zona A - menos que cinco horas diárias de insolação, zona B - seis horas diárias e zona C - mais que sete horas diárias.

Com base no mapa da Figura 1, pode-se perceber que, com relação à insolação diária média, grande parte da região amazônica no norte do país apresenta características semelhantes à parte do sudeste (leste de Minas Gerais) e ao sul do país (estados do Paraná e de Santa Catarina), pertencendo a zona A (menos de 5 horas de insolação diária média). Estas regiões apresentam um clima com nebulosidade frequente, decorrente ou da elevada evaporação e precipitação, como o caso da bacia Amazônica, ou por tratarem-se de regiões serranas, litorâneas ou com alguma outra característica que favoreça a formação de nebulosidade.

A região central (entre Mato Grosso do Sul e Maranhão) compõe a zona B, apresentando uma insolação diária média de 6 horas por dia, igualmente ao litoral que se estende da Bahia até o Rio de Janeiro, parte de São Paulo e Minas Gerais e ainda ao extremo sul do país (Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina), bem como de uma faixa ao norte do País que se estende do oeste de Roraima até o município de Belém).

A zona C, que representa mais de 7 horas de insolação diária média, abrange a maior parte da região do nordeste brasileiro, bem como parte significativa do sudeste brasileiro e parte do estado do Rio Grande do Sul. Estas regiões caracterizam-se pelo clima mais seco, a exemplo do semi-árido nordestino.

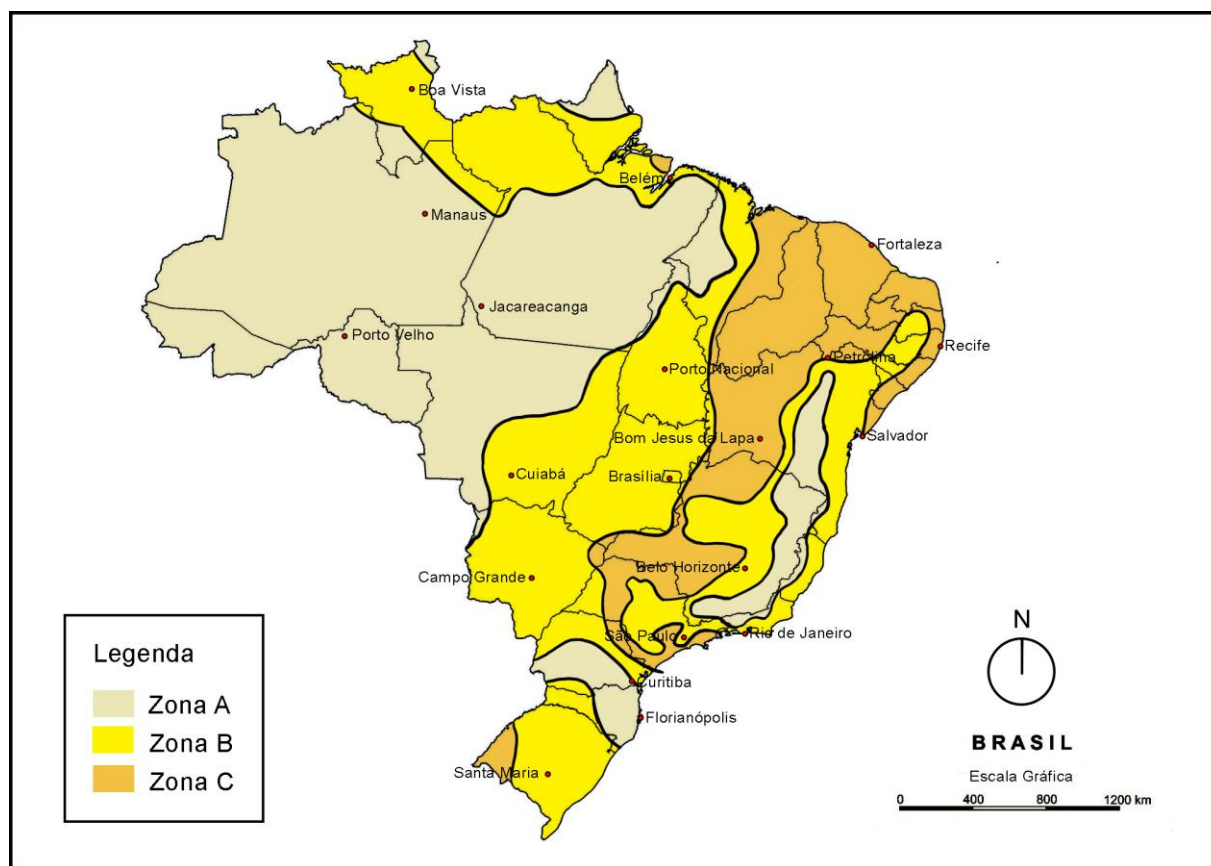


Figura 1 – Pré-zoneamento bioclimático luminoso: mapa de horas de insolação média.

4.2. Avaliação de frequência de ocorrência de nebulosidade e iluminância global horizontal com base em dados de arquivo climático

Os gráficos de frequência de ocorrência para a nebulosidade (Figura 2) apresentaram as três faixas já previamente descritas: quantidade de horas por ano que o céu se encontrou limpo (0 a 3 partes do céu encobertas), parcialmente encoberto (4 a 7 partes do céu encobertas) ou encoberto (8 a 10 partes do céu encobertas). Já os gráficos de iluminância global horizontal (Figura 3) ilustram a quantidade de horas por ano em que foi obtida uma iluminância menor que 48000 lux, uma iluminância entre 48.000 e 84.000 lux e uma iluminância maior que 84.000 lux.

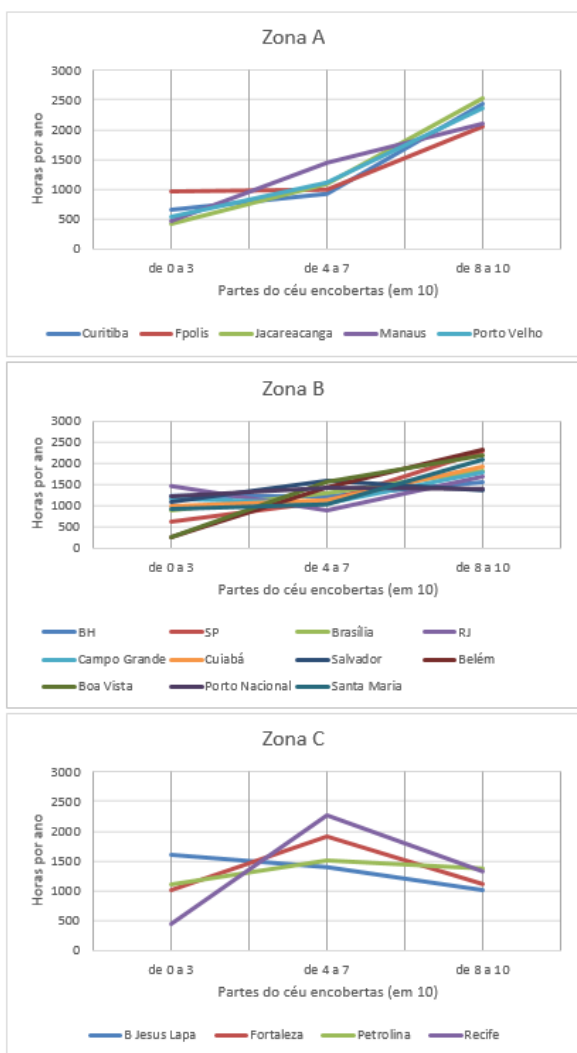


Figura 2 – Gráficos de frequência de ocorrência para Nebulosidade

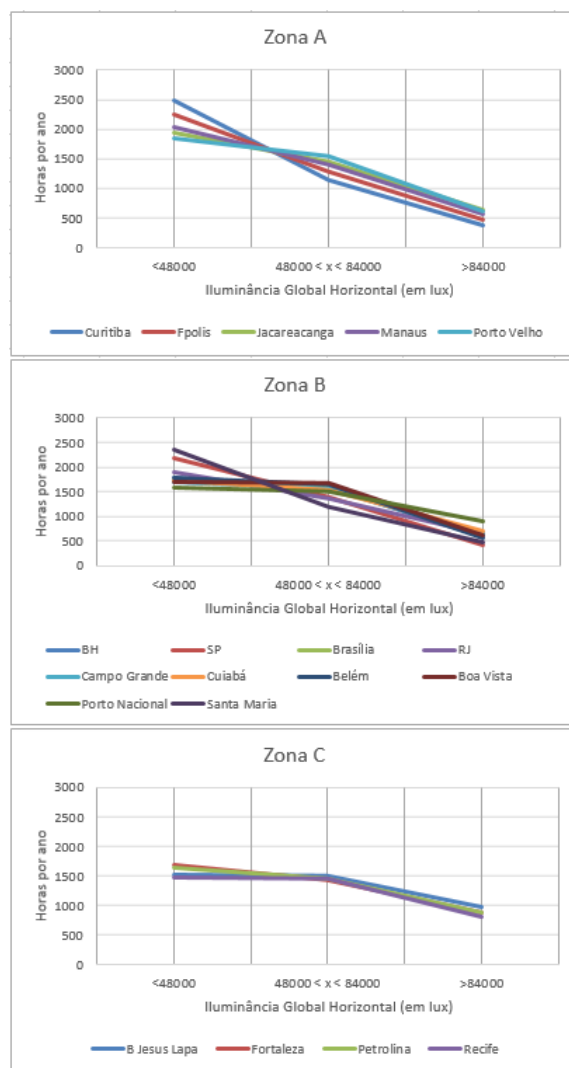


Figura 3 – Gráficos de frequência de ocorrência para Iluminância Global Horizontal

Com relação à nebulosidade, percebe-se que os municípios da zona A apresentam frequência de ocorrência semelhante, em que situações de céu encoberto são bem mais frequentes que situações de céu parcialmente encoberto e de céu limpo. O município de Manaus, foi o que apresentou curva com um comportamento mais diferenciado, seguido do de Florianópolis. O primeiro, por apresentar, proporcionalmente, maior ocorrência de tempo parcialmente encoberto que as outras cidades; e o segundo, por apresentar menor variação entre ocorrência de céu limpo e parcialmente encoberto que as outras cidades.

Os municípios da zona B apresentam curvas com perfis mais semelhantes, porém com um aspecto mais linear que a zona A. As frequências de ocorrência dos diferentes padrões de nebulosidade são mais uniformemente distribuídas, mesmo sendo mais frequente o caso do céu encoberto. É possível perceber que algumas cidades apresentam um perfil mais parecido com a zona A do que com as demais cidades da zona B, a exemplo de Belém, Boa Vista e Santa Maria.

Os municípios da zona C foram os que apresentaram perfis de frequência de ocorrência com aspecto mais diferente das demais zonas, caracterizando-se por perfis côncavos ao passo que os perfis das zonas A e B apresentaram formato convexo. O perfil côncavo pode ser descrito pela maior ocorrência de céu parcialmente encoberto em relação ao céu limpo e encoberto. Além disso, os perfis de frequência de ocorrência de nebulosidade dos municípios mostraram-se bastante irregular entre si, sendo difícil visualizar um desenho regente no gráfico.

Os gráficos de iluminância global já se apresentam de forma mais legível e com um pouco mais de regularidade entre os perfis de frequência de ocorrência dos municípios. Os municípios da zona A apresentam uma diferença mais acentuada entre a frequência de iluminâncias menores que 48.000 lux com a frequência de iluminâncias maiores que 84.000 lux.

O perfil das curvas de frequência de ocorrência da zona B assemelha-se ao da zona A, mas com a diferença entre ocorrência de iluminâncias menores que 48.000 lux e iluminâncias entre 48.000 e 84.000 lux menos acentuada que na zona A. O fato dos gráfico da zona B e da zona A serem parecidos atesta a necessidade de um refinamento das informações, agrupando representações gráficas de maior semelhança entre si.

Já no gráfico da zona C nota-se uma representação mais característica, com os perfis de frequência de ocorrência dos diferentes municípios apresentando uma distribuição mais semelhante entre si. Esta zona caracteriza-se por pouca variação entre a frequência de ocorrência de iluminâncias menores que 48.000 lux e entre 48.000 e 84.000 lux; e uma variação mais acentuada entre 48.000 e 84.000 lux e iluminâncias maiores que 84.000 lux.

Diante da identificação da necessidade de ajustes nos agrupamentos dos municípios nas zonas, de forma a tornar os perfis de distribuição de frequência de ocorrência mais homogêneos, e levando-se em conta que os gráficos de iluminância global horizontal apresentaram maior legibilidade e regularidade, partiu-se desta variável para propor as alterações necessárias. Conforme o agrupamento de cidades nas zonas A, B e C propostas no item anterior, foram realizadas as alterações reagrupando as cidades a fim de refinar a alocação das mesmas nas zonas, buscando representações gráficas mais semelhantes entre os municípios e mesma zona. O agrupamento inicial das cidades e o novo agrupamento depois da realocação podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Agrupamento inicial e depois da realocação das cidades por zona

Pré-zoneamento	Zoneamento depois do refinamento
Zona A	Zona A
<ul style="list-style-type: none"> - Curitiba - Florianópolis - Jacareacanga - Manaus - Porto Velho 	<ul style="list-style-type: none"> - Belém (ex- zona B) - Boa Vista (ex- zona B) - Curitiba - Florianópolis - Jacareacanga - Manaus - Porto Velho - Santa Maria (ex- zona B) - São Paulo (ex- zona B)
Zona B	Zona B
<ul style="list-style-type: none"> - Belém - Belo Horizonte - Boa Vista - Brasília - Campo Grande - Cuiabá - Porto Nacional - Rio de Janeiro - Salvador - Santa Maria - São Paulo 	<ul style="list-style-type: none"> - Belo Horizonte - Brasília - Campo Grande - Cuiabá - Rio de Janeiro
Zona C	Zona C
<ul style="list-style-type: none"> - Bom Jesus da Lapa - Fortaleza - Petrolina - Recife 	<ul style="list-style-type: none"> - Bom Jesus da Lapa - Fortaleza - Petrolina - Porto Nacional (ex- zona B) - Recife - Salvador (ex- zona B)

Os resultados de frequência de ocorrência para nebulosidade e iluminância global horizontal depois deste refinamento podem ser verificados na Figura 4 e na Figura 5, respectivamente.

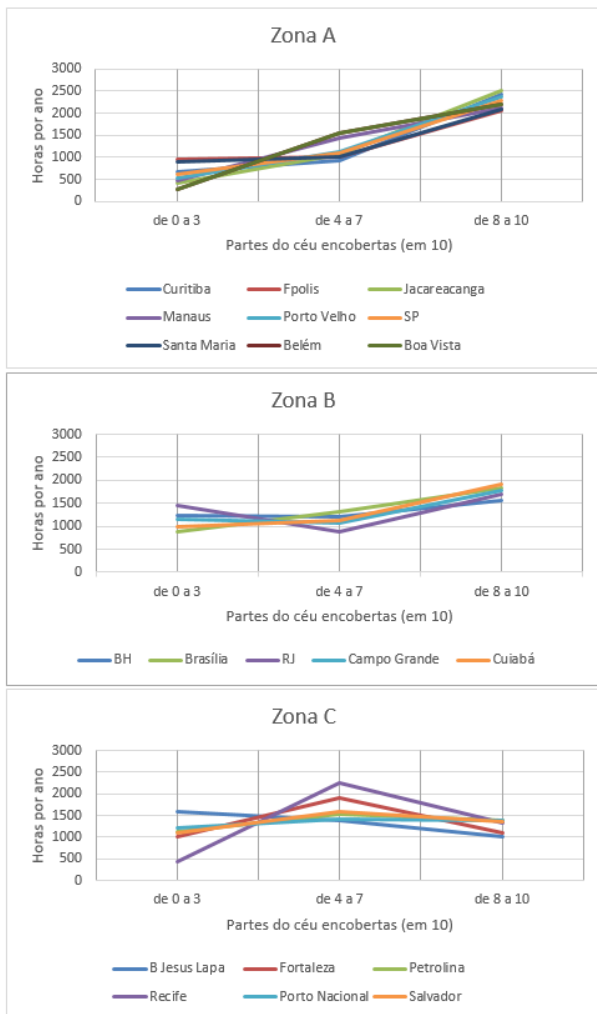


Figura 4 – Gráfico de frequência de ocorrência para Nebulosidade (após refinamento)

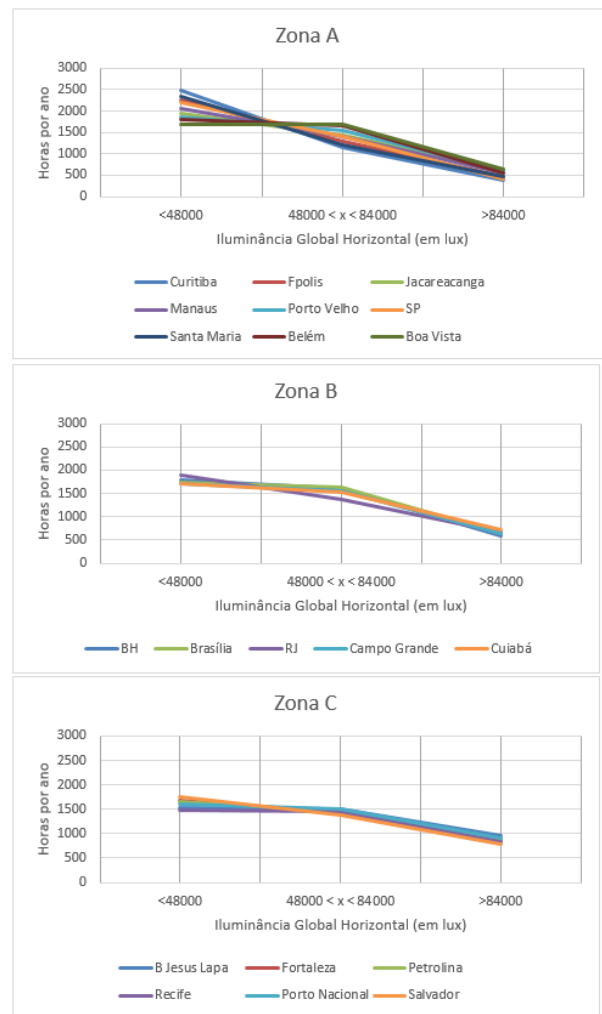


Figura 5 – Gráfico de frequência de ocorrência para Iluminância Global Horizontal (após refinamento)

Como priorizou-se a variável iluminância global horizontal no ajuste dos municípios nas zonas, percebe-se que os gráficos da mesma apresentaram uniformização mais significativa que os de nebulosidade quanto ao agrupamento dos municípios. A realocação fez com que aumentasse o número de municípios das zonas A e C e diminuísse o número de municípios da zona B.

Os municípios de Belém, Boa Vista, Santa Maria e São Paulo passaram da Zona B para a Zona A, pois apresentam um maior número de horas anuais com baixa iluminância global horizontal do que o padrão dos outros municípios da Zona B (entre pouco mais de 1500 horas e 2500 horas). Percebe-se, graficamente, que estes quatro municípios possuem uma inclinação maior nos gráficos de iluminância global horizontal, que os municípios das zonas B e C. O mesmo aconteceu com os municípios Porto Nacional e Salvador, que apresentam menos horas anuais com baixa iluminância global horizontal (entre pouco menos de 1500 horas e pouco mais de 1750 horas), apresentando um gráfico com menor inclinação (mais horizontal).

Observando os gráficos de iluminância global horizontal, as zonas B e C apresentam bastante semelhança no desenho gráfico dos perfis de frequência de ocorrência, enquanto que a zona A apresenta-se menos homogênea. A principal diferença ocorre para os municípios de Santa Maria, Florianópolis e Curitiba, os três pertencente à região sul, logo com latitude maior que os demais municípios. Os municípios da região norte (Belém, Boa Vista, Porto Velho e Manaus) apresentam um comportamento mais parecido com os das zonas B e C, mas foram agrupados na zona A devido a semelhança da variável nebulosidade.

4.3. Proposta final de Zoneamento

Considerando a nova classificação das cidades nas três zonas (Figuras 4 e 5), foi traçado um mapa final de zoneamento bioclimático referente à disponibilidade de iluminação natural para o território brasileiro conforme a Figura 6. Neste mapa, buscou-se manter o desenho das isolinhas semelhante ao mapa anterior,

porém englobando as cidades que foram realocadas nas novas zonas. A Zona A engloba municípios com uma média de menos de cinco horas de insolação diária, desde que a frequência de ocorrência de iluminância global horizontal seja maior para iluminâncias baixas (aproximadamente entre 1500 horas e 2500 horas), e menor para iluminâncias altas (aproximadamente entre 350 horas e 750 horas), apresentando gráficos mais inclinados. A Zona B engloba municípios com uma média de seis horas de insolação diária, desde que frequência de ocorrência de iluminância global horizontal seja maior para iluminâncias baixas (aproximadamente entre 1500 horas e 2000 horas) e menor para iluminâncias altas (aproximadamente entre 500 horas e 1000 horas), mas sendo um pouco menos discrepante que no caso da Zona A, apresentando um gráfico um pouco mais balanceado, mas que ainda sim apresenta uma inclinação considerável. A Zona C engloba municípios com uma média de sete horas de insolação diária, desde que a frequência de ocorrência de iluminância global horizontal seja um pouco menor para iluminâncias baixas (aproximadamente entre 1500 horas e 1800 horas), e menor para iluminâncias altas (aproximadamente entre 750 horas e 1000 horas), apresentando gráficos menos inclinados, mais horizontais.

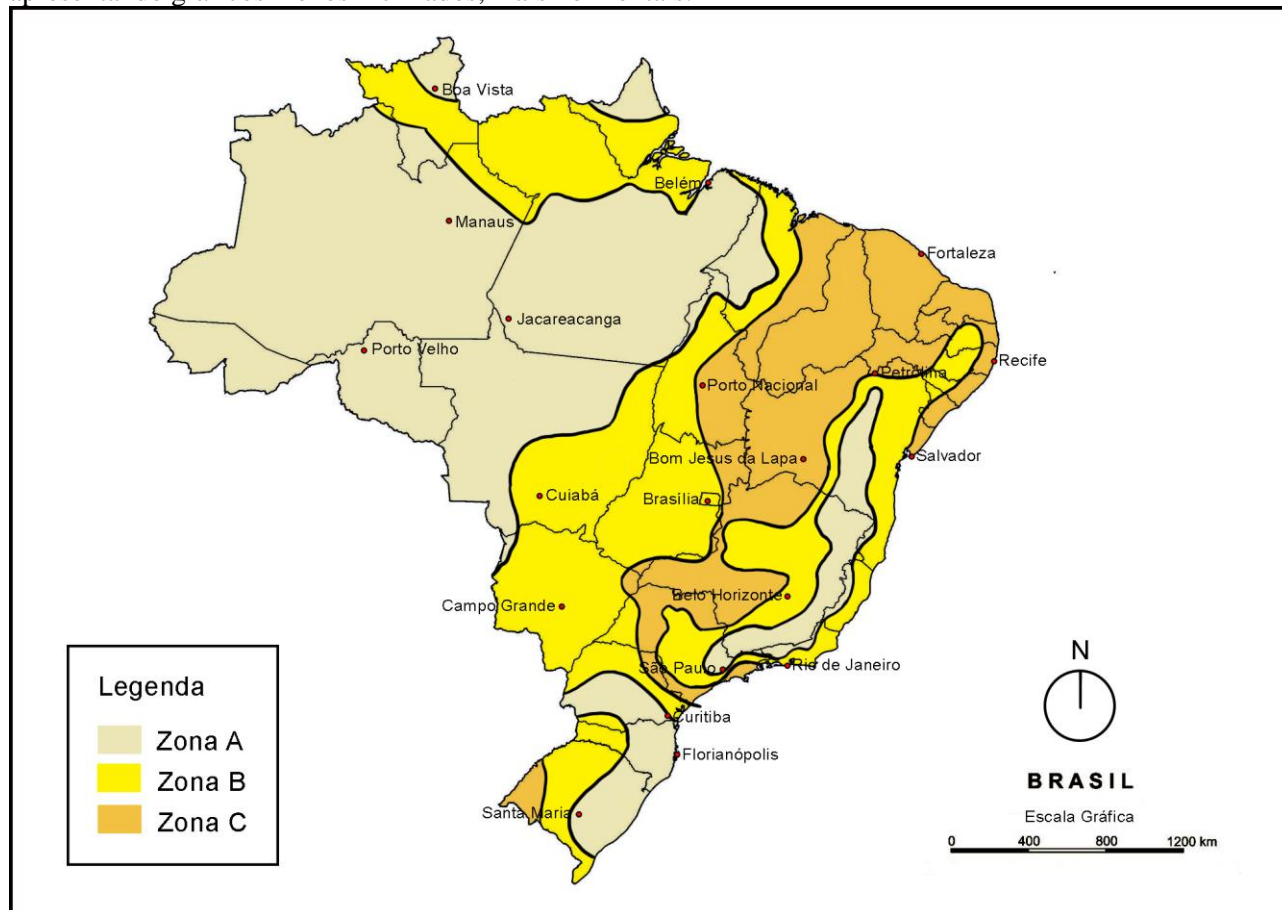


Figura 6 – Mapa do zoneamento bioclimático de disponibilidade de luz natural

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados, observa-se que foi alcançado o objetivo de estabelecer um zoneamento bioclimático para o território brasileiro relacionado à disponibilidade de iluminação natural, agrupando-se as cidades brasileiras analisadas em três zonas, A, B e C, conforme descrito anteriormente. O zoneamento obtido mostra que há diferenças ao longo do território nacional com relação a disponibilidade de luz natural, podendo ser uma ferramenta importante para o projeto de arquitetos e engenheiros que se preocupam com o desempenho luminoso dentro de edificações, auxiliando no entendimento da disponibilidade de luz natural em cada uma das cidades das zonas apresentadas, já que o zoneamento bioclimático luminoso disponibiliza informações relativas à insolação diária, nebulosidade e iluminância global horizontal.

Analisando-se os gráficos, foi possível perceber a dificuldade em alinhar precisamente os dados de iluminância global horizontal com os de nebulosidade, sendo difícil apresentar um padrão para as duas variáveis simultaneamente para os diferentes municípios. Uma possibilidade para se aprimorar o zoneamento luminoso seria analisar outras variáveis climáticas, além de analisar arquivos climáticos de outras cidades ao longo do território nacional, levando em conta que o país apresenta grande extensão territorial. A maior

limitação para este aprofundamento é a falta de arquivos climáticos com informações suficientes para outras localidades.

O zoneamento proposto está em consonância com o zoneamento de iluminâncias difusas de Pereira et al. (2015), avançando na inclusão da componente direta da luz e assim fornecendo mais informações para instrumentar o arquiteto no processo de projeto.

Como principal barreira encontrada no desenvolvimento do estudo destacam-se a quantidade restrita de cidades que dispõem de arquivo climático SWERA e a dificuldade de agrupar as cidades considerando as diferentes variáveis climáticas analisadas. No caso desta proposta, priorizou-se o padrão distribuição de frequências de ocorrência para iluminância global horizontal frente à nebulosidade, visto que este foi mais uniforme.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a simulação computacional de iluminação natural de edificações nas diferentes localidades e a avaliação do seu desempenho luminoso de forma a refinar da definição do zoneamento. Adicionalmente, poderiam ser desenvolvidas diretrizes bioclimáticas para iluminação natural considerando-se as características climáticas de cada uma das três zonas, analogamente ao que apresenta a NBR 15220-3 Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005).

Como possível aplicação desta proposta de zoneamento, recomenda-se a combinação do zoneamento de disponibilidade de iluminação natural com o zoneamento bioclimático brasileiro disponível na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). O chamado zoneamento bioclimático disponível nesta norma trata apenas dos aspectos térmicos da edificação e poderia ser utilizado de maneira mais completa se combinado com informações quanto aos aspectos luminosos. A combinação entre os zoneamentos bioclimáticos, térmico e luminoso, poderia ser feita por sobreposição dos mapas e a identificação das zonas poderia ser expressa pela combinação entre a numeração que identifica as oito zonas térmicas com as letras que identificam as três zonas de iluminação natural (zona 1A, zona 1B, zona 1C, zona 2A...).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAF, L. O.; PEREIRA, F. O. R. **Perspectivas de la eficiencia energética en la iluminación: desafíos para el desarrollo**. VII ENCAC - Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III COTEDI - Conferência Latino Americana sobre Conforto e Desempenho Energético nas Edificações. Curitiba 2003
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. São Paulo. Abril 2005.
- DOE. United States Department of Energy. **Weather data**. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm. Acesso em: setembro de 2016.
- IRENA. International Renewable Energy Agency. **Global atlas**. Disponível em: <http://globalatlas.irena.org/> Acesso em: setembro de 2016.
- LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads> Acesso em: setembro de 2016.
- LABIB, R. Improving daylighting in existing classrooms using laser cut panels. **Lighting, research and technology**. n. 45, p 585 – 598. 2013.
- LESLIE, R. P. Capturing the daylight dividend in buildings: why and how? **Building and Environment**, n. 38, v. 2, p. 381-385. 2003.
- LOFTNESS, V.; et al. **The Triple Bottom Line Benefits of Climate-Responsive Dynamic** Façades. In: 30th International PLEA Conference - Passive and Low Energy Architecture. Ahmedabad, Índia: CEPT - University. 16-18 de dezembro de 2014. p. 187-196. 2014.
- MORAES, L. N.; CLARO, A. Estudo comparativo de sistemas de iluminação artificial considerando luz natural e consumo de energia. **Ambiente Construído** v. 12, p. 7-14. 2014.
- PEREIRA, E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. ISBN 978-85-17-00030-0. 2006.
- PEREIRA, SCHMITT e MORAES. **Zoneamento luminoso do território brasileiro através de histogramas de frequência acumulada de ocorrência de iluminâncias horizontais difusas externa**. XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Campinas-SP. 10p. 2015.
- RORIZ, M. 2012. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. In: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP.
- SHELLER, C., et al. **Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações**. Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, laboratório e Eficiência Energética em Edificações. Relatório técnico. 216p. 2015.
- SHARP, F. et al. J. The use and environmental impact of daylighting. **Journal of Cleaner Production**. n. 85, p. 462 – 471. 2014.
- TIBA; C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. Recife: Ed.Universitária da UFPE, 2000. 111 p.: il., tab., mapas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPQ.