XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

LATITUDE E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS LOCAIS - VERIFICAÇÃO DA PREDOMINÂNCIA NO DESEMPENHO DA LUZ NATURAL E NO CONSUMO ENERGÉTICO DE ILUMINAÇÃO

Raphaela W. da Fonseca (1); Fernando O. R. Pereira (2); Elaine A. Queiroz (3); Beatriz Stockhausenn (4)

(1) Dr., Pós-Doutoranda do Departamento de Arquitetura e Urbanismo raphaela.walger@ ufsc.br
(2) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ruttkay.pereira@ufsc.br
(3) Acadêmica do curso de Arquitetura e Urbanismo, elainequeiroz@gmail.com
(4) Acadêmica do curso de Arquitetura e Urbanismo, stock.beatriz@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-4974

RESUMO

Esse trabalho teve por objetivo verificar se o impacto do ângulo de incidência da radiação solar direta, decorrente da latitude, poderia predominar às condições climáticas locais no consumo do sistema de iluminação, quando há o aproveitamento da luz natural. Correlacionou-se o consumo de iluminação, um zoneamento luminoso brasileiro preexistente e a latitude. Em seguida, analisou-se o impacto da latitude e da orientação na radiação global incidente. Por fim, avaliaram-se os efeitos do ângulo de incidência da radiação solar direta no desempenho da luz natural. O consumo de iluminação e a radiação global foram simulados com modelagem anual baseada no clima. A avaliação do efeito do ângulo de incidência utilizou a simulação estática, gerando-se mapas de iluminância. A avaliação dos resultados das simulações deu-se por análise gráfica e estatística. Como resultado, o zoneamento não correspondeu às variações de consumo de iluminação. Observou-se que o impacto da latitude na radiação global altera o padrão de consumo para cada orientação. Confirmou-se que, devido ao ângulo de incidência da radiação solar direta, edificações situadas em zonas de menor disponibilidade de luz, podem apresentam maior quantidade de luz em áreas mais profundas dos ambientes em determinadas datas. Como conclusão geral, pode-se afirmar que a variação do ângulo de incidência da radiação, resultante dos efeitos da orientação e da latitude na geometria solar, pode sobressair às condições de disponibilidade de luz da localidade.
Palavras-chave: iluminação natural, consumo energético, zoneamento bioclimático, latitude.

ABSTRACT

This work aimed at verifying if the impact of the direct solar radiation incidence angle, due to the latitude, could predominate to the local climatic conditions in lighting energy consumption, with daylight harvesting. The lighting energy consumption, a pre-existing Brazilian luminous zoning and latitude were correlated. Then, the impact of latitude and orientation on incident global radiation was analyzed. Finally, the effects of the direct solar radiation incidence angle on the building daylight performance were evaluated. Lighting consumption and global radiation were simulated with annual climate-based modeling. The effects of the direct solar radiation incidence angle used the static simulation, generating illuminance maps. The simulations results evaluation used graphical and statistical analysis. As a result, the zoning was not representative of the lighting energy consumption variations. It was observed that the impact of latitude on global radiation changes the consumption pattern for each orientation. It has been confirmed that, due to the direct solar radiation incidence angle, buildings located in areas with less daylight availability may present more daylight in deeper areas of inner space at certain dates. As a general conclusion, it can be affirmed that the variation of direct solar radiation incidence angle, resulting from the orientation and the latitude effects due to the solar geometry, can stand out to the conditions of daylight availability of the locality.
Keywords: daylighting, lighting energy consumption, bioclimatic zoning, latitude

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de uma edificação quanto à iluminação natural depende das condições climáticas locais. A média das horas de brilho de sol, as condições de nebulosidade ou a turbidez da abóbada celeste, estão entre os aspectos que afetam a disponibilidade de luz natural (Kittler e Ruck, 1984). Outros fatores que interferem nessa disponibilidade referem-se à implantação da edificação, tais como, a latitude e o entorno, tanto natural quanto construído. Por fim, as propriedades da edificação, como a sua orientação e a sua arquitetura, irão definir como essa edificação aproveita a luz natural disponível.

Uma das complexidades da caracterização da disponibilidade de luz natural é a sua sensibilidade a uma série de condições dinâmicas, como a sazonalidade do clima, da condição de céu e da posição solar na abóboda celeste. Nesse sentido, a modelagem da luz natural baseada no clima (CBDM) tem tido aplicação crescente em todo o mundo (IES, 2012, CEN, 2017). CBDM é a previsão de qualquer quantidade luminosa, usando condições realistas de sol e céu, derivadas de dados climáticos padronizados (MARDALJEVIC, 2000, REINHART e HERKEL, 2000). As avaliações que utilizam a CBDM são realizadas, geralmente, para um ano inteiro, em um intervalo de tempo de uma hora ou menos, a fim de capturar a dinâmica diária e sazonal da luz natural (MARDALJEVIC E CHRISTOFFERSEN, 2017).

Dentre as variáveis que descrevem o contexto da edificação, destaca-se a latitude do local. A variação da latitude impacta na geometria da insolação à qual a edificação está sujeita e, consequentemente, em seu comportamento luminoso. Documentos que trazem recomendações quanto à iluminação natural do ambiente interno, como o BREEAM (BREEAM, 2013) e a prEN 17037:2018 (CEN, 2018), fazem recomendações específicas para edificações localizadas em diferentes latitudes. Embora a latitude impacte no desempenho da iluminação natural de maneira geral, o aspecto energético merece destaque. A latitude pode ser expressiva ao determinar o alcance da luz no interior dos ambientes. Como o consumo de iluminação varia conforme a abrangência dos sensores de luz natural, uma vez aumentada a profundidade de penetração da luz, aumentando-se a área em que a iluminância alvo do sistema é alcançada, este permanecerá desligado por mais tempo. Assim, para o consumo, o alcance da iluminância alvo, pode se sobressair à iluminâncias mais elevadas, decorrentes de maior disponibilidade de luz externa, mas que não se distribuam adequadamente para as áreas mais profundas do ambiente.

O atual zoneamento bioclimático brasileiro dispõe apenas sobre o desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005). Procurando preencher a lacuna do desempenho luminoso, Pereira, Schmitt e Moraes (2015) propuseram um zoneamento luminoso para o território nacional, baseado na parcela difusa da luz. Visando incluir a componente direta da luz nesse zoneamento, Fonseca, Fernandes e Pereira (2017) propuseram uma nova subdivisão do território, ver Figura 1. Para essa subdivisão, os autores utilizaram quatro bases de dados: o zoneamento de iluminação natural horizontal difusa de Pereira, Schmitt e Moraes (2015); cartas isolinhas de dois Atlas Solarimétricos Brasileiros (TIBA et al, 2000, PEREIRA et al, 2006); e dados de arquivos climáticos do programa EnergyPlus (*EnergyPlus Weather file - EPW)* do tipo SWERA (US-DOE, 2017).

Fonseca, Fernandes e Pereira (2017) utilizaram o zoneamento para testar a aplicação de um método para a estimativa do consumo energético quando do aproveitamento da luz natural. Dentre os resultados, observou-se que, para alguns casos, a mesma edificação, quando situada em zonas com maior disponibilidade de luz, consumia mais energia para iluminação do que quando situada em zonas de menor disponibilidade de luz natural. Nesse contexto, levantou-se a hipótese de que o ângulo de incidência da radiação solar direta na fachada poderia estar fazendo com que locais com menor disponibilidade de luz, atribuída às condições atmosféricas predominantes do local, apresentassem menor consumo energético de iluminação, do que locais com maior disponibilidade de luz, devido ao alcance da luz às porções mais profundas do ambiente.

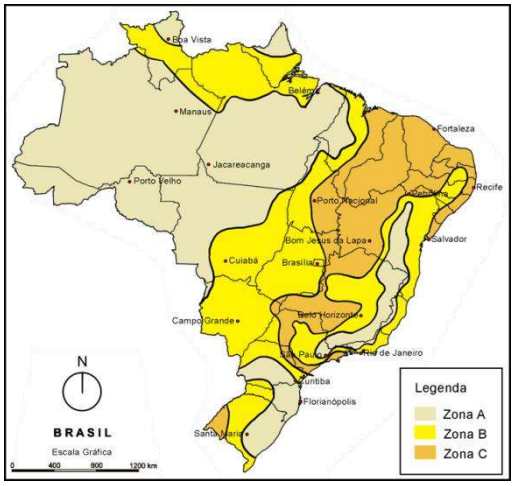


Figura 1 – Mapa do zoneamento bioclimático de luz natural (FONSECA, FERNANDES e PEREIRA, 2017)

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é verificar se o impacto do ângulo de incidência da radiação solar direta, decorrente da latitude, pode predominar às condições climáticas locais quanto ao consumo do sistema de iluminação, quando há o aproveitamento de luz natural.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas:

1. associação entre o consumo de iluminação e o zoneamento de Fonseca, Fernandes e Pereira (2017);
2. análise do impacto da latitude e da orientação na radiação global incidente; e
3. avaliação dos efeitos do ângulo de incidência da radiação solar direta no desempenho da luz natural.

3.1. O consumo de iluminação, o zoneamento bioclimático luminoso e a latitude

Para verificar a relação entre consumo de iluminação com o zoneamento adotado e a latitude, foi simulado o consumo de iluminação anual de um ambiente hipotético para as 20 cidades brasileiras que possuem arquivo climático EPW-SWERA (US-DOE, 2017). Considerou-se que toda a potência instalada de iluminação fosse controlada por uma dimerização ideal linear. A simulação foi realizada no *plug-in DIVA-for-Rhino* (SOLEMMA LLC, 2014) do programa *Rhinoceros* (MCNEEL; ASSOCIATES, 2014). Os parâmetros de localização geográfica e do clima considerados, foram os presentes nos arquivos climáticos.

Adotou-se um ambiente com planta quadrada, medindo 6m de largura por 6m de comprimento, com pé-direito de 3m, ver Figura 2. O ambiente possui uma janela em fita com 5,8m de comprimento, 1m de altura e com peitoril a 1,1m do piso. Tal configuração, resultou em um percentual de área da abertura em relação à área do piso (PAP) de 16,11% e percentual da área da abertura em relação à área da fachada (PAF) de 32,22%. O plano de análise compreende toda a área de planta e situa-se a 0,75m de altura em relação ao piso. O espaçamento da malha de pontos de análise foi de 0,5m nos dois sentidos, resguardando-se a mesma distância em relação às paredes. As propriedades ópticas das superfícies são os apresentadas na Tabela 1. A iluminância alvo empregada foi de 300lx, por tratar-se de um valor de referência para luz natural usualmente empregado (IES, 2012). Os parâmetros do *Radiance (*WARD, 1994) utilizados foram os apresentados na Tabela 2. As simulações para as 20 cidades brasileiras consideraram as orientações norte, sul, leste e oeste.

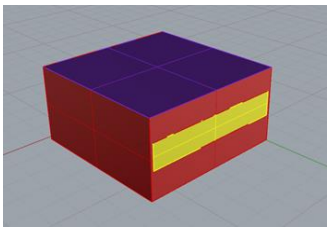


Figura 2 – Representação tridimensional do modelo de ambiente

Tabela 1 – Propriedades dos materiais atribuídos às superfícies

Superfície	**Propriedade dos materiais**	
	Refletância [%]	**Transmissão visível [%]**
paredes	50	-
teto	70	-
piso	20	-
janela	-	88

O dispositivo de controle do sistema de iluminação artificial, utilizado para a simulação de consumo anual de iluminação, foi configurado conforme a Tabela 3, apresentada a seguir.

Tabela 2 – Parâmetros do *Radiance* adotados para a simulação de desempenho de iluminação anual

Inter-reflexões difusas do ambiente	5
Divisão do ambiente	1000
Amostragem do ambiente	256
Precisão do ambiente	0,1
Resolução do ambiente	300
Limiar direto	0
Amostragem direta	0

Tabela 3 – Configurações do dispositivo de controle do sistema de iluminação artificial

Controle do sistema de iluminação artificial	
Operação:	dimmer com sensor de ocupação liga/desliga
Potência de iluminação (W):	250
Iluminância alvo do sistema "setpoint" (lx):	300
Fator de perda "ballast" (%):	20
Potência de espera "standby" (W):	0

Os resultados das simulações foram plotados em gráficos de barras, permitindo a comparação entre o consumo de iluminação do ambiente, quando alocado em cada uma das 20 cidades. Primeiramente, foi feita uma avaliação considerando-se as 3 zonas de disponibilidade de luz natural do zoneamento em questão. Em um segundo momento, os resultados foram confrontados com a latitude das cidades, incluindo-se a análise de correlação. Foram avaliados, o desempenho global para a localidade, considerando-se as 4 orientações, e o desempenho individual de cada uma das orientações. Avaliou-se também, a correlação entre o consumo e diferentes faixas de latitude. Nesse caso, foram criados 3 grupos, cujas coordenadas das latitudes foram convertidas em graus decimais, dividindo-se o território em 3 faixas proporcionais. Considerou-se como limite ao Norte o Oiapoque, com latitude igual a 3,84°N e como limite ao Sul o Chuí, com latitude igual à 33,68°S. Dessa forma, obtiveram-se os três grupos a seguir: Grupo 1 [3,84° a -8,66°], Grupo 2 [-8,66° a -21,17°] e Grupo 3 [-21,17° a -33,68°].

3.2. Radiação global anual nas superfícies de uma semiesfera

Da mesma forma que na etapa anterior, utilizou-se a simulação computacional anual para gerar dados de radiação global para um modelo semiesférico de raio unitário, ver Figura 3. Avaliou-se a incidência de radiação solar acumulada ao longo do ano em diferentes orientações e diferentes planos, para as mesmas 20 cidades. Esta etapa visou avaliar a relação entre a radiação solar incidente, resultante das condições climáticas e da latitude, e as direções dos possíveis planos de abertura da edificação.

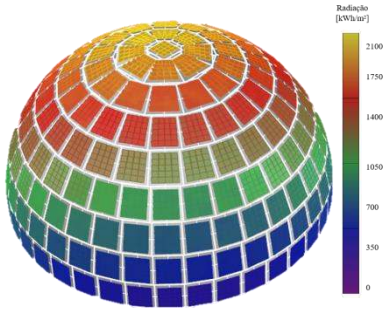


Figura 3 – Representação tridimensional do modelo semiesférico

Tabela 4 – Parâmetros do *Radiance* adotados para a simulação de radiação global anual

Inter-reflexões difusas do ambiente	7
Divisão do ambiente	1000
Amostragem do ambiente	20
Precisão do ambiente	0,1
Resolução do ambiente	300
Limiar direto	0
Amostragem direta	0

A simulação anual de radiação global direta do modelo tridimensional semiesférico foi realizada utilizando-se os mesmos programas da etapa anterior, o *plug-in DIVA-for-Rhino* (SOLEMMA LLC, 2014), tendo como base para modelagem, o Rhinoceros (MCNEEL; ASSOCIATES, 2014). Os arquivos climáticos das 20 cidades brasileiras também foram mantidos os mesmos. As configurações utilizadas para os parâmetros do *Radiance* (WARD, 1994) são as apresentadas na Tabela 4.

Como resultado, foram gerados mapas de radiação com escala de cores falsas. Tais mapas foram agrupados e ordenados segundo a latitude das localidades para comparação entre eles.

3.3. O ângulo de incidência da radiação solar direta e a profundidade de penetração da luz natural no ambiente

Para verificar se a profundidade de penetração da luz solar direta, decorrente do ângulo de incidência devido à latitude, poderia ser predominante às condições climáticas, foram escolhidas duas cidades: Curitiba e Salvador. A escolha baseou-se nos resultados de Fonseca (2017), em que Curitiba, classificada como Zona A, de menor disponibilidade de luz natural do zoneamento em questão, apresentou menor consumo de iluminação do que Salvador, classificada como Zona C, de maior disponibilidade de luz.

Foram realizadas simulações estáticas de iluminância, considerando-se céu claro com sol do tipo ISO-CIE (ISO-CIE, 2004), no mesmo programa utilizado nas etapas anteriores. As datas escolhidas foram: 22/06, 22/12, 21/03 e 23/09, representantes do solstício de inverno, do solstício de verão e dos equinócios de outono e primavera, respectivamente. Os horários adotados foram 09h, 12h e 15h. As simulações em datas e horários específicos visaram a observação do comportamento da luz em função da geometria da insolação.

O ambiente adotado na etapa anterior, apresentado na Figura 2, teve a sua profundidade aumentada para viabilizar a análise de penetração da luz. O modelo retangular manteve a dimensão da largura com 6m, e a altura do pé-direito com 3m. O comprimento foi aumentado para 12m. A janela em fita foi mantida com as mesmas dimensões. Logo, o percentual da área da abertura em relação à área da fachada (PAF) manteve-se em 32,22% e o percentual de área da abertura em relação à área do piso (PAP) foi reduzido para 8,06%.

Manteve-se a altura do plano de análise, aumentando-o de forma abranger toda a área de planta. O espaçamento da malha de pontos de análise também foi mantido. As propriedades ópticas das superfícies foram as apresentadas na Tabela 1. Os parâmetros do *Radiance* (WARD, 1994) foram os apresentados na Tabela 4. Foram feitas simulações para as orientações norte, sul, leste e oeste.

Como resultado, foram gerados mapas de iluminância em cores falsas para comparação visual entre as cidades e as datas selecionadas.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Relação entre o consumo de iluminação, o zoneamento bioclimático luminoso e a latitude

A variação de consumo anual de iluminação entre as 20 cidades analisadas foi de 20,24% para a avaliação global, somando-se as 4 orientações, de 21,70% para a orientação Norte, 27,59% para Leste, 26,42% para Sul e 25,73% para Oeste. Já a variação entre o menor e o maior consumo de todo o conjunto de dados foi de 42%.

O menor consumo ocorreu para Boa Vista, para Oeste, 223kWh/ano, e o maior para Campo Grande, para a Leste, 386kWh/ano.

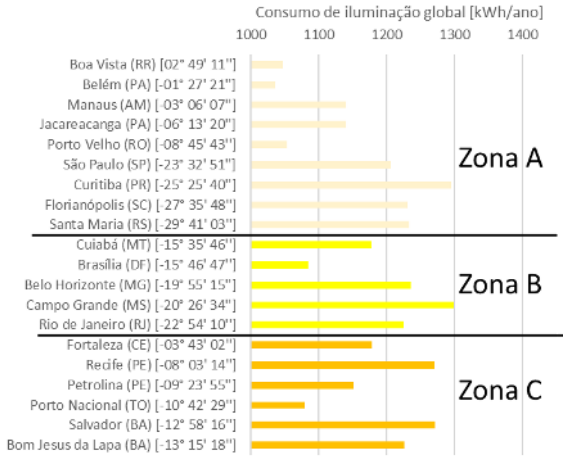


Figura 4 – Consumo de iluminação global para as 20 cidades agrupados de acordo com o zoneamento

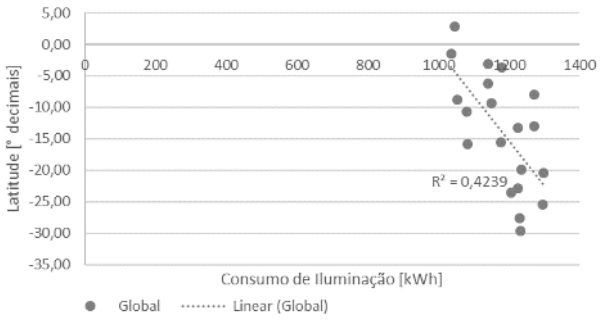
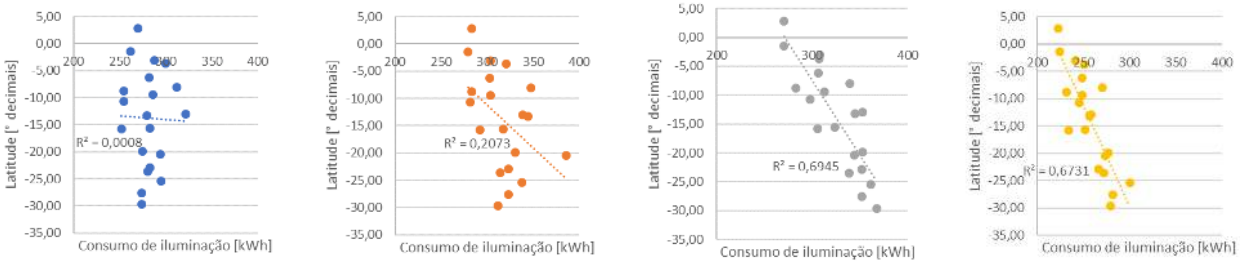


Figura 5 – Correlação entre a latitude e o consumo de iluminação global

O gráfico de barras da Figura 4 ilustra o consumo global para as 20 cidades, agrupadas segundo o zoneamento. Dentro de cada zona, os valores de latitude foram dispostos no sentido Equador->Sul. A Zona A corresponde à zona de menor disponibilidade de luz; a Zona B, à condição intermediária; e a Zona C, à de maior disponibilidade (ver mapa da Figura 1). Os resultados apresentados na Figura 4 mostram que o zoneamento não reflete o impacto da disponibilidade de luz no consumo de iluminação. Isso, porque existem cidades da Zona A, de menor disponibilidade de luz, com consumo menor do que cidades da Zona B e da Zona C. Da mesma forma, existem cidades da Zona B com consumo menor do que da Zona C.

Apesar da ausência de uma relação entre o consumo e o zoneamento, observou-se que dentro de cada zona houve uma tendência de os maiores consumos ocorrerem para latitudes mais ao Sul. Observou-se que todas as cidades localizadas a partir de 19°S apresentaram consumo maior do que 1.200kWh. Das cidades com latitude até 19°S, apenas Recife, Salvador e Bom Jesus da Lapa apresentaram o consumo maior do que esse valor. A análise de correlação entre a latitude e o consumo de iluminação resultou em um coeficiente de determinação de 0,4239 (ver Figura 5). A inclinação da linha de tendência apresentada nesse gráfico mostra mais claramente a predominância de consumos mais elevados para às latitudes mais ao Sul.

Com o intuito de observar como a variação da latitude afeta o consumo nas diferentes orientações, geraram-se os gráficos de correlação da Figura 6. A orientação Sul foi a que apresentou maior coeficiente de determinação, 0,6945, mostrando-se a mais influenciada pela variação da latitude. Em seguida, a orientação mais afetada foi a Oeste, com coeficiente de determinação igual a 0,6731. As orientações Leste e Norte foram as que sofreram menor influência da latitude, sendo que para a orientação Norte, a relação entre as variáveis é praticamente nula. Como a orientação Sul tem menor incidência de radiação solar direta, a influência do azimute solar e da fachada é minimizada e os efeitos da latitude são mais perceptíveis.



(a) Norte (b) Leste (c) Sul (d) Oeste

Figura 6 – Correlação entre a latitude e o consumo de iluminação para cada orientação cardeal.

A Figura 7 traz o gráfico de correlação entre consumo de iluminação e latitude para cada um dos 3 Grupos de latitude. O coeficiente de determinação foi maior para o Grupo 1, seguido do 2 e do 3, sendo 0,7131, 0,4052 e 0,0236, respectivamente. Esses resultados mostram que para localidades mais próximas ao Equador, a latitude apresenta correlação mais significativa com o consumo. Entretanto, conforme as coordenadas se afastam do Equador, a correlação entre as duas variáveis se torna menos expressiva, vide o coeficiente de determinação decrescente obtidos para os 3 grupos. Logo, a latitude passa a influir menos na variação do

consumo. O coeficiente de determinação do Grupo 2, 0,4052, foi o mais próximo do coeficiente obtido para o conjunto total de dados, 0,4239, apresentado anteriormente na Figura 5.

Cruzando esses resultados com a classificação do zoneamento de Fonseca, Fernandes e Pereira (2017), observou-se que, para o Grupo 1, a latitude se sobressai frente às condições climáticas, nesse caso, baseadas em horas de sol e iluminância global horizontal. Isso porque, para esse grupo, constatou-se o aumento do consumo conforme a variação da latitude para o Sul, independentemente da condição de disponibilidade de luz da abóbada celeste. Conforme as coordenadas se afastam do Equador, Grupos 2 e 3, essa relação foi menos perceptível, o que indica que, para essas localidades, outras variáveis sejam mais expressivas. Possivelmente, para as localidades mais ao Sul, a orientação seja um parâmetro que interfira na relação entre as condições de disponibilidade de luz e o consumo de iluminação.

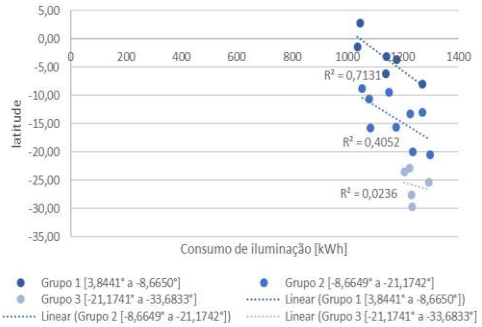


Figura 7 – Correlação entre a latitude e o consumo de iluminação global de acordo com os 3 Grupos de latitude

4.2. Resultados de Radiação global anual para todas as cidades

Os gráficos resultantes da simulação computacional da radiação global anual para o modelo tridimensional semiesférico são apresentados nas Figuras 8 e 9. Os resultados das 20 cidades foram apresentados em ordem crescente de latitude, de forma a permitir a análise da influência da localização da cidade na admissão de radiação global anual pelas diferentes orientações.

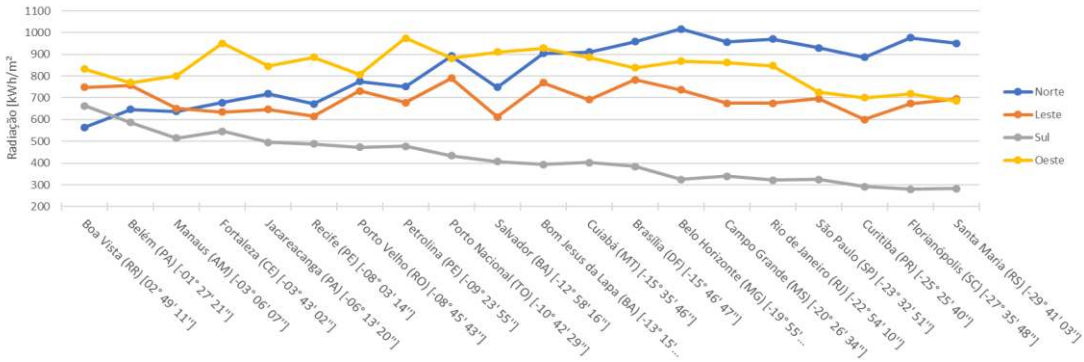


Figura 8 – Radiação Global Anual recebida no primeiro anel da semiesfera, para as 20 cidades, ordenadas segundo a latitude

O maior impacto foi percebido nas faces de orientação sul. Conforme se avança em direção a latitudes mais afastadas da linha do Equador, a radiação incidente nas faces orientadas ao quadrante sul diminui mais do que para as demais orientações. Depois da orientação sul, a norte foi a mais impactada pela latitude quanto à incidência de radiação global, seguida da orientação oeste e leste, com uma variação de 57%, 41%, 18% e 7% entre Boa Vista e Santa Maria, respectivamente. Esses valores correspondem à variação da média da radiação obtida para a face do primeiro anel da semiesfera, correspondente a cada uma das orientações cardeais, ver Figura 9. Destaca-se que, diferentemente das demais orientações, as faces orientadas à norte recebem menos radiação quando localizadas próximas ao Equador do que quando localizadas mais ao Sul, logo a variação de 41% deu-se pelo aumento da radiação entre Boa Vista e Santa Maria.

Para analisar-se mais detalhadamente a variação ocorrida na orientação sul, destacaram-se os valores médios de radiação obtidos para a face do primeiro anel da semiesfera, orientada a 180°, para as cidades de Boa Vista, Porto Velho, Belo Horizonte e Santa Maria, que apresentam variação de aproximadamente 10° entre as suas respectivas latitudes. A radiação incidente em Boa Vista foi de 663 kWh/m², em Porto Velho de 473kWh/m², em Belo Horizonte de 325kWh/m² e em Santa Maria de 282 kWh/m², representando uma redução de 29%, 31% e 13%, a cada 10°, respectivamente.

Com base no observado, existe o indicativo que o impacto da latitude na variação da radiação incidente em diferentes orientações pode fazer com que a comparação entre o desempenho luminoso de edificações localizadas em diferentes cidades possa apresentar resultados opostos, dependendo da orientação que está sendo avaliada. Por exemplo, Boa Vista, apresenta maior incidência de radiação para as fachadas leste, sul e oeste do que Santa Maria. Entretanto, a primeira cidade apresenta menor incidência para a fachada norte.

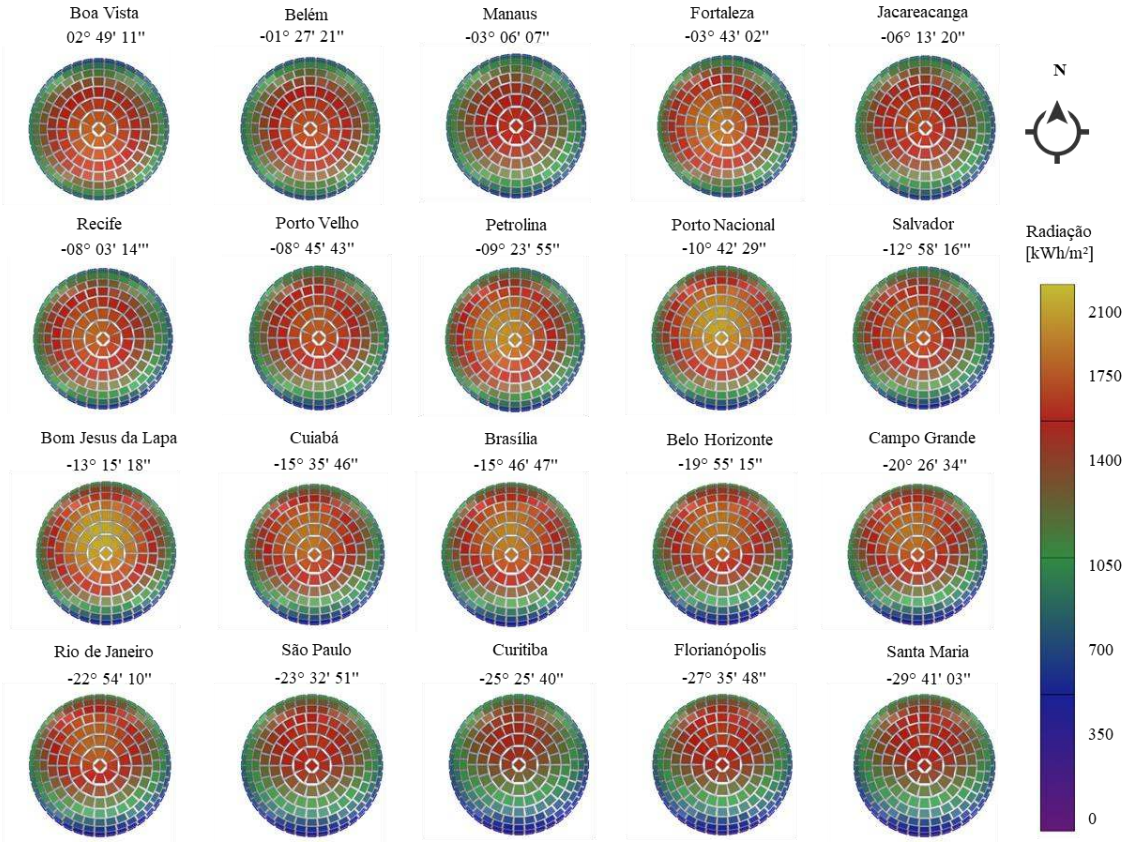
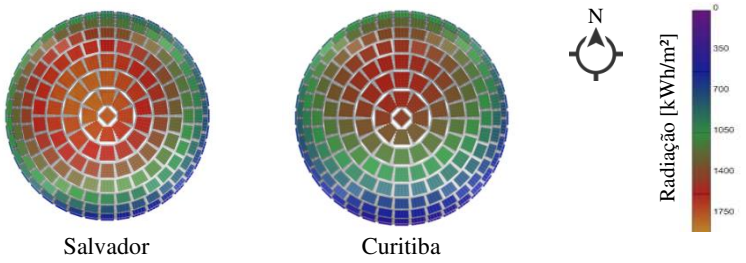


Figura 9 – Radiação Global Anual recebida pela semiesfera, para as 20 cidades, ordenadas segundo a latitude

4.3. O ângulo de incidência da radiação solar direta e a profundidade de penetração da luz no ambiente: avaliação de Curitiba e Salvador

Observando na Figura 10 os gráficos de radiação global anual de Curitiba e Salvador, percebe-se que Salvador recebe mais radiação do que Curitiba, em especial para as orientações Sul e Oeste. Os valores presentes na Tabela 5, correspondem aos valores médios de radiação obtidos para a face do primeiro anel da semiesfera, orientada a 0°, 90°, 180° e 270°, respectivamente.



Salvador Curitiba

Figura 10 – Radiação Global Anual recebida pela semiesfera para Curitiba e Salvador

Tabela 5 – Parâmetros do *Radiance* adotados para a simulação de radiação global anual

Cidade	Radiação [kWh/m²]			
	Norte	Leste	Sul	Oeste
Salvador (BA) [-12° 58' 16"]	749	612	407	911
Curitiba (PR) [-25° 25' 40"]	887	601	291	701

As Figuras 11 e 12 resgatam os valores de consumo de iluminação anual global e de cada uma das 4 orientações, para as duas cidades, obtidos na primeira etapa do método. As simulações feitas para esse trabalho apresentaram consumo global 1,82% maior para Curitiba do que para Salvador. Esse resultado difere do que ocorreu nas simulações de Fonseca (2017), em que o consumo para Salvador era 1,5% maior do que o de Curitiba. Como a diferença entre o consumo global é muito pequena e os ambientes eram diferentes, essa variação é possível, devido ao efeito das orientações. O gráfico apresentado na Figura 11 confirma a influência da radiação recebida em cada fachada no consumo de iluminação. Nele, pode ser visto que, justamente as orientações sul e oeste, são as que apresentam consumo menor para Salvador, 2,32% e 14%, respectivamente. Já para as orientações norte e leste, Salvador apresenta consumo maior do que Curitiba, sendo a diferença de 8,21% e 0,15%, respectivamente. O resultado oposto, entre as orientações norte e leste e sul e oeste, fez com que a variação entre o consumo global das duas cidades fosse pequena.

Observando-se os gráficos de radiação global anual da Figura 10, nota-se que, para Curitiba, a maior diferença do gradiente da escala ocorre entre as orientações norte e sul. Para leste e oeste, o gradiente é aproximadamente simétrico. Já para Salvador, apesar da maior diferença aparentemente ser entre norte e sul, existe uma diferença similar entre oeste e leste. Observa-se também que o gradiente da orientação oeste é similar ao da orientação norte. Entretanto, essas observações não refletem na diferença entre o consumo das orientações, ver Figura 12. Para Salvador, a maior diferença de consumo ocorre entre leste e oeste, seguida de norte e oeste. Já para Curitiba, apesar da diferença entre norte e sul ser realmente a maior, a diferença entre leste e oeste é maior do que a diferença entre norte e oeste.

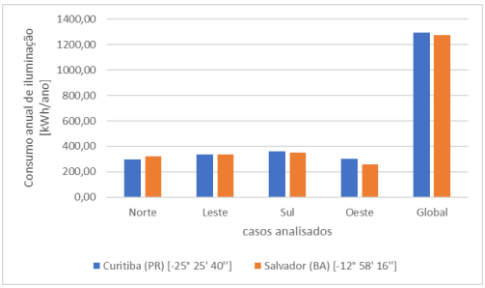


Figura 11 – Consumo de iluminação anual para Curitiba e Salvador

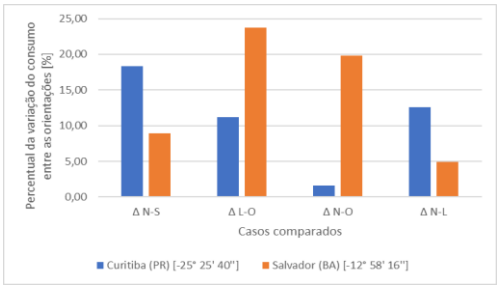
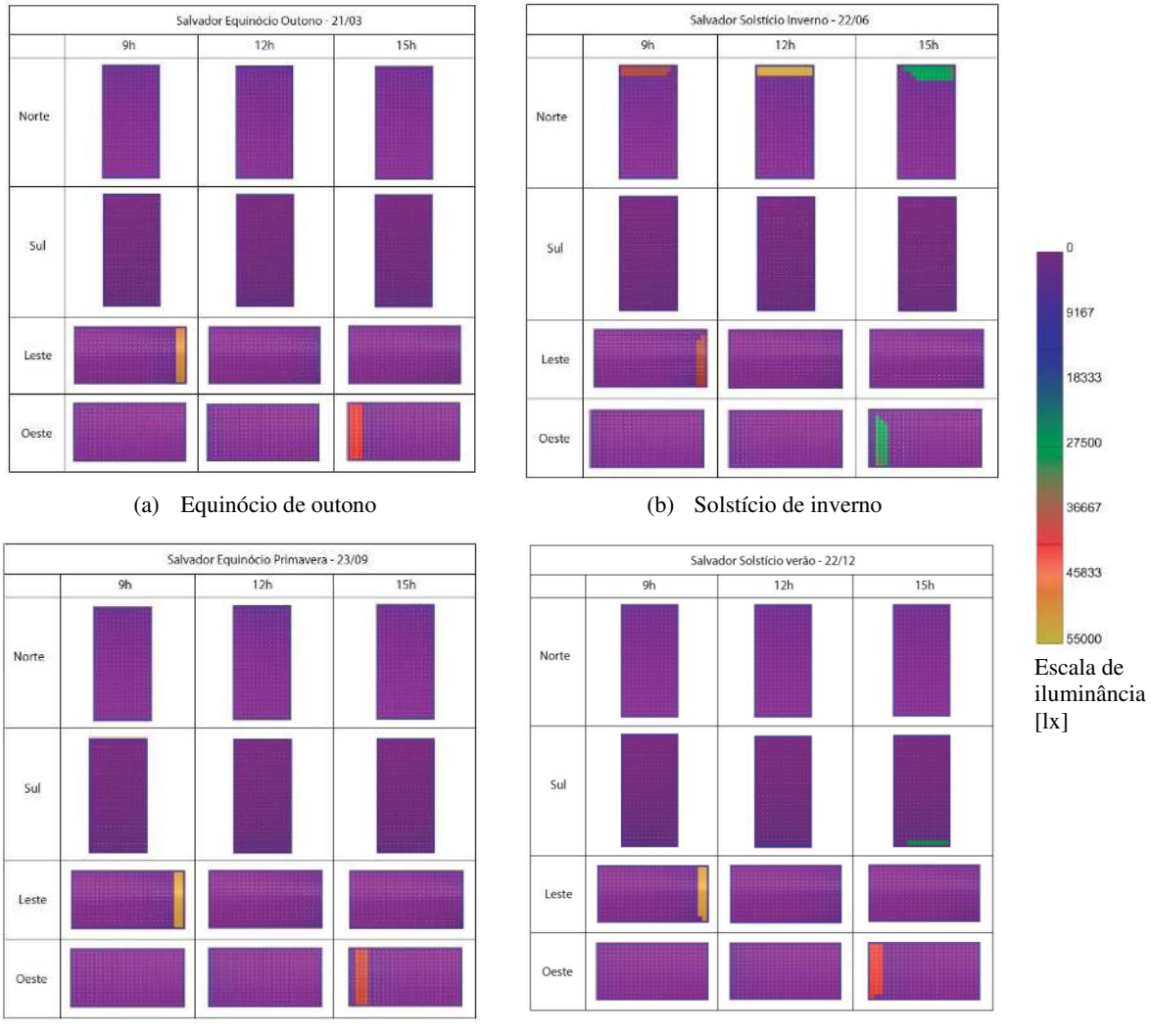


Figura 12 – Diferença de consumo de iluminação anual entre as orientações para Curitiba e Salvador

Os gráficos de iluminância das Figuras 13 e 14 mostram os efeitos do ângulo de incidência da radiação direta na iluminação, por orientações, nas datas de análise, para Salvador e Curitiba, respectivamente. Os gráficos de iluminância de Salvador, de fato, mostram que a luz atinge áreas mais profundas e com mais intensidade para oeste do que para leste, e para norte do que para sul.



(a) Equinócio de outono

(b) Solstício de inverno

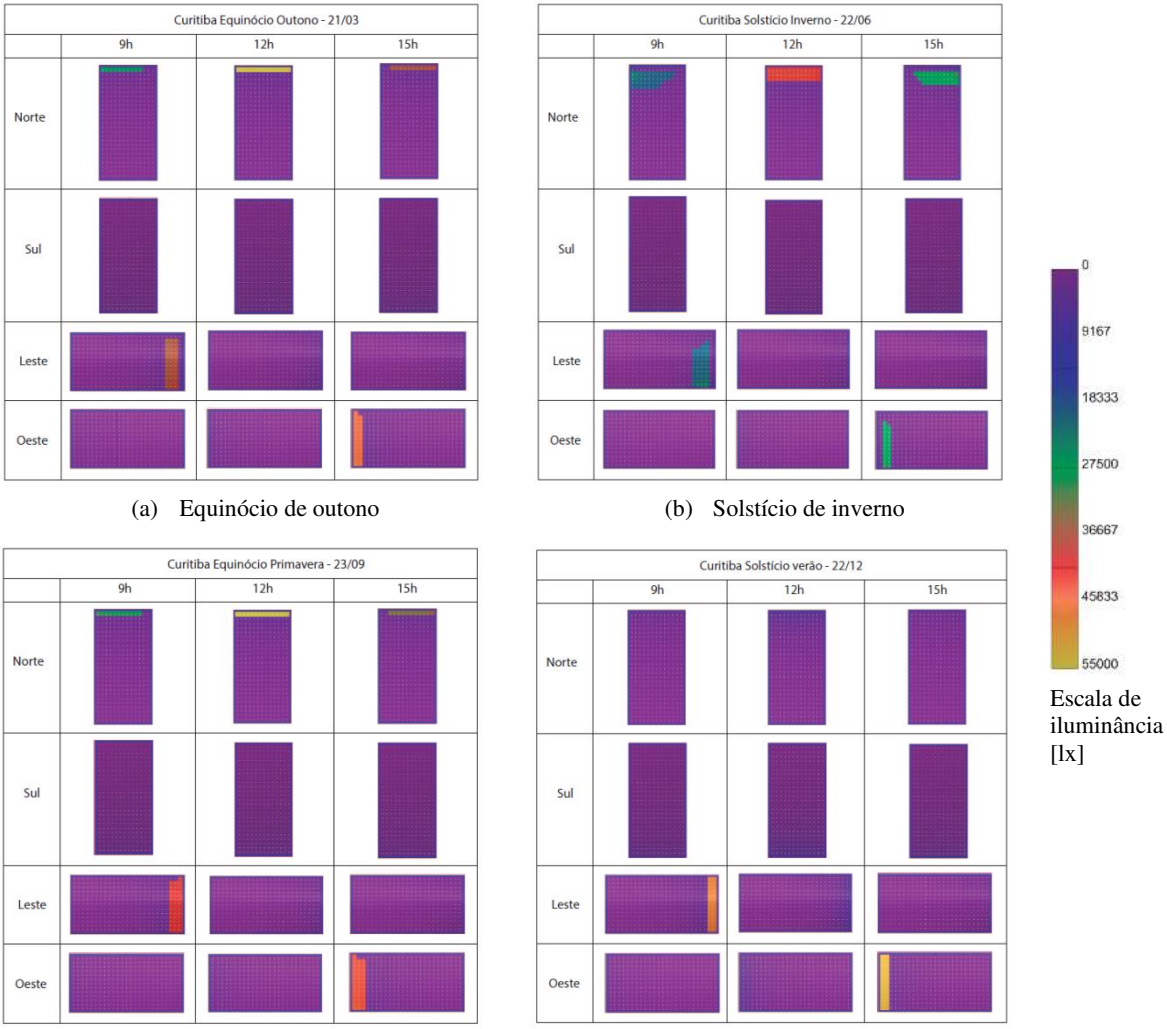
(c) Equinócio de primavera

(d) Solstício de verão

Figura 13 – Mapas de iluminância para Salvador

Os gráficos de iluminância para Curitiba, ver Figura 14, mostram que a luz atinge áreas mais profundas e com mais intensidade para norte do que para sul. Quanto à comparação da orientação norte com leste e oeste, novamente, a principal diferença ocorre entre os períodos em que as áreas de maior iluminação aparecem (ver áreas coloridas). Para norte, as áreas coloridas aparecem para os três horários nos dois equinócios e no solstício de inverno, enquanto para leste e oeste, aparecem para as quatro datas, mas em períodos específicos, de manhã e à tarde, respectivamente. A comparação entre as orientações leste e oeste mostra que, considerando-se os períodos em que o sol atinge essas fachadas, para a orientação leste, a iluminação é menos intensa do que para oeste, mas alcança áreas mais profundas do ambiente.

Observando-se os resultados das orientações norte e leste para Salvador e Curitiba, para ambas as orientações, apesar de nem sempre Curitiba apresentar maior luminosidade do que Salvador nas áreas próximas às aberturas, a luz atinge o espaço com maior profundidade. Isso justifica o menor consumo da primeira cidade para essas orientações. Assim, quanto maior a área em que a iluminância alvo de 300lx foi atingida na maior parte do tempo, menor foi o consumo.



(a) Equinócio de outono (b) Solstício de inverno

(c) Equinócio de primavera (d) Solstício de verão

Figura 14 – Mapas de iluminância para Curitiba

5. CONCLUSÕES

Este trabalho verificou se o impacto do ângulo de incidência da radiação solar direta, decorrente da latitude, poderia predominar às condições climáticas locais quanto ao consumo de energia do sistema de iluminação quando há o aproveitamento de luz natural. Os resultados mostram que a variação do ângulo de incidência da radiação, resultante dos efeitos da orientação e da latitude na geometria solar, pode sim sobressair às condições de disponibilidade de luz da localidade. Diante disso, recomenda-se que a latitude deve ser considerada na revisão do zoneamento, bem como para avaliações de desempenho de edificações em que a penetração da luz seja relevante. Nesse estudo, tais condições corresponderam às variáveis atribuídas ao zoneamento de Fonseca, Fernandes e Pereira (2017), horas de sol diárias e iluminância global horizontal. Os resultados das simulações de radiação para a orientação norte ilustram essa conclusão, visto que Curitiba apresenta menos horas de sol

diárias e menores valores de iluminância global horizontal anual (Zona A) do que Salvador (Zona C), mas recebe mais radiação global anual incidente nessa orientação. Da mesma forma, as simulações de consumo resultaram em menor consumo para as orientações norte e leste para Curitiba. As imagens resultantes das simulações estáticas de iluminação ilustraram os efeitos da latitude na penetração da luz nos ambientes e confirmaram a hipótese testada.

Os resultados da análise da relação entre o consumo anual de iluminação e o zoneamento de luz natural levaram também à conclusão de que o zoneamento não é representativo das variações de consumo de iluminação. Acredita-se que a revisão do zoneamento seja relevante, visto que a variação do consumo de iluminação global encontrada foi de aproximadamente 20% e quando considerados todos os casos das diferentes orientações, esta foi maior do que 40%. Os resultados do consumo global levaram à conclusão de que o sub-zoneamento com base na latitude faz mais sentido para latitudes mais próximas à linha do Equador. O consumo de iluminação global mostrou-se menos sensível à variação da latitude para as cidades mais ao Sul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BREEAM. International New Construction Technical Manual (SD5075). *Building Research Establishment, Garston, UK*, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **CEN TC 169 WG 11 – Daylight: Daylight in buildings.** European Standards. CEN/TC 169. Date: 2017-07.TC 169 WI 00169068.Secretariat: DIN. 2017

FONSECA, R. W. Elaboração de método simplificado de avaliação do potencial de redução do consumo do sistema de iluminação artificial através do uso da iluminação natural em edificações não residenciais. **(relatório de pós-doutorado)** Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 61 p. Supervisor: Fernando Oscar Ruttkay Pereira (UFSC).

FONSECA, R. W.; FERNANDES, F. A. F.; PEREIRA, F.O.R. Zoneamento bioclimático referente à iluminação natural para o território brasileiro. In: XVI ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e X ENLAC - Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. 27 a 29 de setembro de 2017. Balneário Camboriú. **Anais do evento: Habitat Humano: em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI.** Porto Alegre: ANTAC. 2017. p. 1889-1898.

IES. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE) - IES LM-83-12. Illuminating Engineering Society of North America. Nova Iorque. 2012. 12 p.

ISO-CIE Commission Internationale de l´Eclairage - ISO 15469:2003(E) CIE S 011/E:2003 Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky. CIE Central Bureau, Vienna, 2004.

KITTLER, R.; RUCK, N. Definition of typical and average exterior daylight conditions in different climatic zones. **Energy and Buildings**, v. 6, p.253-259, 1984.

MCNEEL, R.; ASSOCIATES. **Rhinoceros 3D**.v. 5. Rhinoceros 3D é um programa de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS. 2014

MARDALJEVIC, J. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. ***Lighting Research and Technology***, v. 32(3), p.111-118, 2000.

MARDALJEVIC, J. and CHRISTOFFERSEN, J., `Climate connectivity' in the daylight factor basis of building standards. **Building and Environment**, v. 113, p. 200-209, 2017.

PEREIRA, E. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2006. ISBN 978-85-17-00030-0. 2006.

PEREIRA, F. O. R; SCHMITT, M.; MORAES, L.N. 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.

REINHART, C. F.; HERKEL, S. The simulation of annual daylight illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods. ***Energy and Buildings***, v. 32(2), p.167-187, 2000.

SOLEMMA LLC. **DIVA for Rhino: Environmental Analysis for Buildings**. v. 2.0. DIVA-for-Rhino é um *plug-in* de modelagem de iluminação natural e energia altamente otimizado para o modelador Rhinoceros - NURBS.2014.

TIBA, C. et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed.Universitária da UFPE, 2000. 111 p.: il., tab., mapas.

US-DOE. United States Department of Energy. Weather data. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm. Acesso em: setembro de 2017.

WARD, G. J. **The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System**. In: Computer Graphics - SIGGRAPH conference. Orlando/Flórida. Jul. 1994. p. 459-72, 1994.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES/PNPD e ao CNPq (Bolsista do CNPq - Brasil 151988/2018-8, bolsista do CNPq – Brasil 307179/2016-8 e PIBIC/UFSC) pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.