

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

LUÍZA DE JESUS MENESES

**CORRELAÇÕES ENTRE O FATOR DE LUZ DO DIA MÉDIO E AS MÉTRICAS
DINÂMICAS EM REGIÕES TROPICAIS**

MACEIÓ

2024

LUÍZA DE JESUS MENESES

**CORRELAÇÕES ENTRE O FATOR DE LUZ DO DIA MÉDIO E AS MÉTRICAS
DINÂMICAS EM REGIÕES TROPICAIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, área de concentração em Dinâmicas do Espaço Habitado, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús

MACEIÓ

2024

Catlogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

M543c Meneses, Luíza de Jesus.

Correlações entre o fator de luz do dia médio e as métricas dinâmicas em regiões tropicais / Luíza de Jesus Meneses. – 2024.
117 f. : il. color.

Orientador: Ricardo Carvalho Cabús.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 83-91.

Apêndices: f. 92-117.

1. Iluminação natural. 2. Fator de luz do dia médio. 3. Arquitetura nos trópicos. I. Título.

CDU: 72

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

LUÍZA DE JESUS MENESES

**CORRELAÇÕES ENTRE O FATOR DE LUZ DO DIA MÉDIO E AS MÉTRICAS
DINÂMICAS EM REGIÕES TROPICAIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, área de concentração em Dinâmicas do Espaço Habitado, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em:

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
RICARDO CARVALHO CABUS
Data: 29/10/2024 21:33:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús
(Centro de Tecnologia – Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente
FERNANDO ANTONIO DE MELO SA CAVALCANTI
Data: 29/10/2024 17:57:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador interno: Prof. Dr. Fernando Antonio de Melo Sá Cavalcanti
(Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente
RICARDO VICTOR RODRIGUES BARBOSA
Data: 29/10/2024 21:27:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador interno: Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa
(Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Alagoas)



Documento assinado digitalmente
PEDRO VITOR SOUSA RIBEIRO
Data: 29/10/2024 17:52:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador externo: Prof. Dr. Pedro Vitor Sousa Ribeiro
(Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Sergipe)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e concretização deste trabalho.

À minha família, especialmente à minha mãe, Izabel, professora, resiliente e que sempre me mostrou, através do exemplo prático, o quanto a educação é importante e transformadora. Obrigada por ser sempre meu amparo e minha maior referência. Ao meu irmão Igor, fonte de inspiração na minha jornada acadêmica e pessoal. Agradeço também por ter colocado minha afilhada, Iasmin, em nossas vidas, alegrando ainda mais os dias.

A Leonardo, amor da minha vida, pelo companheirismo e incentivo em todos os momentos. Você me torna mais forte. Desde que te conheci, todos meus sonhos sempre foram nossos, obrigada por tudo. Estendo também os agradecimentos à sua família, principalmente a seus pais, João e Carmo, pelo carinho, torcida e suporte. À Débora e Anselmo, pelos encontros sempre tão divertidos e essenciais para espalhar e seguir em frente.

Ao meu melhor amigo e alma gêmea de vida, Pedro. A distância nunca impediu que seu apoio e amizade fossem constantes em minha vida. À minha amiga Carolina Timbó, pelas conversas, incentivo e desabafos, rir da vida e de nós mesmas deixa tudo mais leve.

A todas as professoras e professores que tive a chance de ser aluna durante a vida, vocês certamente abriram os caminhos e enriqueceram o percurso de diversas maneiras. Especialmente, ao meu orientador Ricardo Cabús, pelos ensinamentos não só técnicos e acadêmicos, mas também pela forma humana de enxergar e lidar com as pessoas.

A todos os colegas do PPGAU e GRILU, pelos momentos compartilhados. À Natasha Sandes, pela disponibilidade e gentileza de sempre. À Vanessa Félix, por todas as trocas, dúvidas tiradas e acolhimento. Aos colegas do PPGE, pela companhia e risadas garantidas.

À banca examinadora, composta pelos professores doutores Fernando Cavalcanti, Pedro Ribeiro e Ricardo Victor, pelas valiosas contribuições à dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Daylight is a global solution, wherever we are in the world, we can work with it.”

(Arlind Dervishaj)

RESUMO

O conforto visual em edificações está diretamente ligado às decisões projetuais, como o dimensionamento das aberturas. Programas de simulação auxiliam na previsão da disponibilidade de luz natural e na avaliação de desempenho luminoso dos ambientes, mas apresentam desvantagens, como alta demanda computacional e complexidade no uso. Para as etapas iniciais de projeto, nas quais diversas geometrias precisam ser testadas, o Fator de Luz do Dia Médio pode ser uma alternativa simplificada. Originalmente desenvolvido na Europa como uma métrica estática para utilização em céu encoberto em climas temperados, seu uso em regiões tropicais requer avaliação. Portanto, o objetivo deste estudo foi identificar as relações entre o Fator de Luz do Dia Médio e as métricas dinâmicas em regiões tropicais, a fim de avaliar a viabilidade do uso do FLD Médio como ferramenta nas etapas preliminares de projeto nessas regiões. Foram analisados ambientes com diferentes proporções de aberturas (1/10, 1/8, 1/6 e 1/4) e cenários de obstrução (sem obstrução, com marquise e muro frontal), sob diferentes tipos de céu (1, 10, 14 da CIE e DLL) e latitudes (Macapá/AP, Maceió/AL e Vitória/ES). As métricas dinâmicas avaliadas foram Iluminância Média Anual (EMA), Autonomia de Luz Natural (ALN), Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe) e Uniformidade Média Anual (UMA). Os resultados mostram que não há uma correlação significativa entre o Fator de Luz do Dia Médio e a UMA nas situações estudadas. Por outro lado, evidenciam uma forte correlação entre o Fator de Luz do Dia Médio e as métricas EMA, ALN e ALNe, sugerindo que é possível utilizá-lo como ferramenta nas etapas iniciais de projeto em regiões tropicais.

Palavras-chave: iluminação natural; fator de luz do dia médio; trópicos.

ABSTRACT

Visual comfort in buildings is directly linked to design decisions, such as the sizing of openings. Simulation software helps predict the availability of natural light and assess the lighting performance of spaces, but they have drawbacks, such as high computational demand and complexity of use. For the early stages of design, where multiple geometries need to be tested, the Average Daylight Factor can be a simplified alternative. Originally developed in Europe as a static metric for use in overcast skies in temperate climates, its application in tropical regions requires evaluation. Therefore, the objective of this study was to identify the relationships between the Average Daylight Factor and dynamic metrics in tropical regions, in order to evaluate the feasibility of using the Average Daylight Factor as a tool in the preliminary design stages in these regions. Spaces with different opening proportions (1/10, 1/8, 1/6, and 1/4) and obstruction scenarios (no obstruction, with an overhang, and a frontal wall) were analyzed under different sky types (1, 10, and 14 from CIE and DLL) and latitudes (Macapá/AP, Maceió/AL, and Vitória/ES). The dynamic metrics evaluated were Annual Average Illuminance (AAI), Daylight Autonomy (DA), Spatial Daylight Autonomy (sDA), and Annual Uniformity (AU). The results show that there is no significant correlation between the Average Daylight Factor and AU in the studied situations. On the other hand, they highlight a strong correlation between the Average Daylight Factor and the metrics AAI, DA, and sDA, suggesting that it can be used as a tool in the early stages of design in tropical regions.

Keywords: *daylighting; average daylight factor; tropics.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes do FLD	32
Figura 2 – Componentes da luz natural que atinge o ponto interno	33
Figura 3 – Ângulo de céu visível, medida obtida em corte	35
Figura 4 – Componentes da porção inferior da sala (contendo o plano de trabalho)	36
Figura 5 – Fluxograma da metodologia	47
Figura 6 – Planta baixa e corte da sala sem obstrução	48
Figura 7 – Proporções e janelas utilizadas.....	49
Figura 8 – Planta baixa e corte da sala com marquise infinita	50
Figura 9 – Perspectiva da sala com marquise infinita.....	50
Figura 10 – Planta baixa e corte da sala com muro frontal.....	51
Figura 11 – Capitais escolhidas com base nas latitudes	54
Figura 12 – EMA (Céu 1): Norte, Leste, Sul e Oeste (Maceió-AL).....	57
Figura 13 – EMA (Céus 10, 14 e DDL): Norte e Sul (Maceió-AL)	58
Figura 14 – EMA (Céus 10, 14 e DDL): Leste e Oeste (Maceió-AL).....	59
Figura 15 – ALN (Céu 1): Norte, Leste, Sul e Oeste (Maceió-AL)	61
Figura 16 – ALN: (Céus 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Maceió-AL).....	63
Figura 17 – ALN: (Céus 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Maceió-AL).....	64
Figura 18 – ALN simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL).....	66
Figura 19 – FLD Médio X ALN X E_{alvo} : Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL).....	67
Figura 20 – ALNe: (Céu 1) Norte, Leste Sul e Oeste (Maceió-AL)	68
Figura 21 – ALNe: (Céus 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Maceió-AL).....	70
Figura 22 – ALNe: (Céus 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Maceió-AL).....	71
Figura 23 – ALNe simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL).....	73
Figura 24 – ALNe X FLD Médio X E_{alvo} X $t_{\%}$: Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL).....	74
Figura 25 – UMA: (Céu 1) Norte, Leste Sul e Oeste (Maceió-AL)	76
Figura 26 – UMA: (Céus 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Maceió-AL).....	77
Figura 27 – UMA: (Céus 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Maceió-AL)	78
Figura 28 – Tabela utilizada como base para o cálculo do FLD Médio	92
Figura 29 – Dados utilizados para gerar os gráficos comparativos do FLD Médio e as métricas dinâmicas	93
Figura 30 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP).....	94
Figura 31 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)	95

Figura 32 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)	96
Figura 33 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)	97
Figura 34 – ALN simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)	98
Figura 35 – FLD Médio X ALN X E_{alvo} : Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)	99
Figura 36 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)	100
Figura 37 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)	101
Figura 38 – ALNe simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP) .	102
Figura 39 – ALNe X FLD Médio X E_{alvo} X $t\%$: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)	103
Figura 40 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)	104
Figura 41 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)	105
Figura 42 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES)	106
Figura 43 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES).....	107
Figura 44 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES).....	108
Figura 45 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES).....	109
Figura 46 – ALN simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES).....	110
Figura 47 – FLD Médio X ALN X E_{alvo} : Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES).....	111
Figura 48 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES).....	112
Figura 49 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES).....	113
Figura 50 – ALNe simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES)....	114
Figura 51 – ALNe X FLD Médio X E_{alvo} X $t\%$: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES)	115
Figura 52 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES)	116
Figura 53 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES).....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Proporções mínimas de área de janela/piso das capitais brasileiras	27
Quadro 2 – Valores de FLD Médio para ambientes em climas temperados	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência para iluminância horizontal difusa.....	31
Tabela 2 – Definições utilizadas para o FLD Médio	52
Tabela 3 – Resumo dos dados de entrada para o TropLux	55
Tabela 4 – Sugestões de FLD Médio para Macapá-AP, Maceió-AL e Vitória-ES	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADF	<i>Average Daylight Factor</i>
ALN	Autonomia de Luz Natural
ALNe	Autonomia de Luz Natural espacial
BRE	<i>Building Research Establishment</i>
CBDM	<i>Climate-Based Daylight Modelling</i>
CIE	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>
DA	<i>Daylight Autonomy</i>
DF	<i>Daylight Factor</i>
E	Iluminância
E_{HD}	Iluminância horizontal difusa externa
EMA	Iluminância Média Anual
FLD	Fator de Luz do Dia
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
sDA	<i>Spatial Daylight Autonomy</i>
UMA	Uniformidade Média Anual
WFR	<i>Window-Floor Ratio</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Estrutura da dissertação	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	A luz natural e a arquitetura	20
2.2	Tamanho das aberturas	22
2.2.1	Normativos baseados no tamanho das aberturas	24
2.3	O comportamento da luz natural e o surgimento das métricas	28
2.4	Métricas estáticas de avaliação de desempenho da luz natural	29
2.4.1	Iluminância (E)	29
2.4.2	Fator de Luz do Dia (FLD)	30
2.4.3	Fator de Luz do Dia Médio	34
2.5	Métricas dinâmicas de avaliação de desempenho da luz natural	38
2.5.1	Iluminância Média Anual (EMA)	39
2.5.2	Autonomia de Luz Natural (ALN)	39
2.5.3	Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe)	40
2.5.4	Uniformidade Média Anual (UMA)	41
2.6	A simulação computacional e suas barreiras	41
2.7	O software TropLux	44
3	METODOLOGIA	47
3.1	Parâmetros do FLD Médio	48
3.2	Métricas dinâmicas adotadas	52
3.3	Parâmetros das métricas dinâmicas	52
3.4	Cálculo do FLD Médio e simulações computacionais	55
4	RESULTADOS	56
4.1	Iluminância Média Anual (EMA)	56
4.2	Autonomia de Luz Natural (ALN)	61
4.2.1	Influência das iluminâncias-alvo no ajuste das regressões	65
4.3	Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe)	68
4.3.1	Influência das iluminâncias-alvo e da fração de tempo no ajuste das	

regressões	72
4.4 Uniformidade Média Anual (UMA)	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DO FLD MÉDIO.....	92
APÊNDICE B – BASE DE DADOS DOS GRÁFICOS DE DISPERSÃO	93
APÊNDICE C – GRÁFICOS REFERENTES À CIDADE DE MACAPÁ-AP.	94
APÊNDICE D – GRÁFICOS REFERENTES À CIDADE DE VITÓRIA-ES	106

1 INTRODUÇÃO

Níveis adequados de iluminação natural fazem parte dos fatores que determinam se um usuário se sente confortável ou não ao utilizar um ambiente. O conforto visual está diretamente ligado às decisões projetuais que são tomadas pelos arquitetos. Os profissionais de arquitetura são responsáveis por determinar parâmetros como as dimensões das aberturas, que afetam diretamente a disponibilidade da luz natural na edificação, e essas escolhas são feitas desde a etapa preliminar de concepção dos projetos. Para definir as áreas das janelas muitas vezes as decisões são baseadas em recomendações de pré-dimensionamento (ARAÚJO; BITTENCOURT, 2022), mas há ainda outras opções, como experiências de trabalhos anteriores, diretrizes de projeto e simulações, estas últimas ainda não amplamente utilizadas pelos profissionais (REINHART; FITZ, 2006).

Segundo Reinhart e Fitz (2006), a demanda por métodos menos complexos que pudessem guiar as decisões projetuais, de maneira a simultaneamente incentivar o uso destes pelos profissionais, levou ao desenvolvimento de ferramentas simplificadas, porém, os autores observaram uma tendência de uso inadequado. As ferramentas simplificadas, que deveriam ser utilizadas prioritariamente nas fases iniciais do projeto e depois substituídas nas etapas posteriores por outras mais sofisticadas (LI *et al.*, 2022), estavam sendo usadas durante todo o processo projetual (LAM *et al.*, 1999). Apesar das vantagens das versões mais básicas, ferramentas mais complexas e sofisticadas também são necessárias, a exemplo dos programas de simulação, pois elas fornecem maior precisão e mais informações acerca do comportamento e disponibilidade da luz natural.

Diversos programas de simulação de iluminação natural são consolidados, a exemplo do *Radiance* (WARD, 1994), *TropLux* (CABÚS, 2002) e *Daysim* (REINHART, 2006). No entanto, nem estes nem os demais existentes são amplamente usados nos escritórios de projeto. LAM *et al.* (1999) estudaram sobre programas de simulação na sua pesquisa e obtiveram diversas justificativas para a baixa aderência da utilização dessa categoria na época. Alguns motivos encontrados foram tempo apertado de projeto, falta de reconhecimento/valorização por parte dos clientes, a ideia de que as simulações caberiam apenas a consultores especializados e dificuldade de interpretação dos dados de saída. Mais razões apontadas, tanto para outros tipos de simulação quanto especificamente para as de iluminação natural, foram a falta de

habilidade e treinamentos para utilização dos programas pelas equipes e até dificuldade na escolha dos mesmos (REINHART; FITZ, 2006). Tsagrassoulis, Kontadakis e Roetzel (2015) explicam que o conhecimento para operar os programas de simulação de iluminação natural não é uma habilidade comum ao cotidiano dos arquitetos, o que faz com que consultores externos acabem sendo demandados para realizar os estudos.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021), que trata do desempenho das edificações, sugere na proposta de atualização da seção 13, dedicada ao desempenho lumínico, que sejam verificados a suficiência (iluminância alvo) e uniformidade da luz natural nos ambientes. Para tal, são apresentados dois métodos, um ábaco, manual, para situações mais simplificadas, e a simulação computacional, aplicável em todos os cenários. Sendo assim, caso a atualização seja aprovada, será necessário analisar a conformidade dos projetos com a normativa disponível através da utilização de um desses métodos. Para essa análise, existe a possibilidade de contratação de consultor especializado, mas em geral essa opção implica em um custo mais alto e maior tempo para finalização do projeto (TSAGRASSOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015). Portanto, é útil que os próprios arquitetos possuam conhecimento mínimo para a realização de simulações computacionais, já que elas podem ser utilizadas nas análises de todas as situações.

As simulações computacionais estão cercadas não só pelas barreiras apontadas anteriormente, mas ainda há outras, incluindo a necessidade de conhecimento prévio acerca de algum *software* que possibilite sua execução, além da demanda computacional e tempo de processamento, que podem ser bastante significativos (LI *et al.*, 2023). Paule, Kampf e Dubois (2015) enfatizam que a quantidade de tempo necessária para um estudo é um dos principais obstáculos ao uso das simulações computacionais. Os autores destacam ainda que as ferramentas computacionais utilizadas são muito detalhadas/complexas e não costumam ser adaptadas para as fases preliminares de projeto. Sendo assim, na fase de concepção inicial, quando comumente há mais de uma opção de *design* e testes rápidos precisam ser feitos para guiar as decisões projetuais, arquitetos e profissionais da construção preferem métodos mais simples para avaliação de desempenho da luz natural (LI *et al.*, 2023). Desta forma o trabalho é otimizado evitando diversas remodelagens e reprocessamentos, conseqüentemente, poupando tempo.

Apesar de existirem diversas opções de programas de simulação de luz natural,

e destes apresentarem resultados cada vez mais precisos e completos, as dificuldades de uso persistem. Sendo assim, ferramentas simplificadas, desde que utilizadas em situações adequadas, continuam sendo necessárias e relevantes. Tais ferramentas podem ser úteis possibilitando aos projetistas, por exemplo, de forma rápida e simples, pré-dimensionar as aberturas na fase de concepção do projeto, já atendendo, ou estando significativamente próximo de atender, os valores mínimos de iluminância desejados por eles e/ou recomendados pelas normativas.

Nesse contexto é que o Fator de Luz do Dia Médio pode se destacar como uma ferramenta auxiliar nas etapas iniciais de projeto. O Fator de Luz do Dia (FLD), ou *Daylight Factor* (DF), foi a primeira métrica de desempenho criada para a iluminação natural e é definido basicamente como sendo a razão entre a iluminância interna e externa (na condição de céu encoberto completamente desobstruído), no mesmo instante, resultando na iluminância de um determinado ponto (HOPKINSON, 1963). A partir do conceito original da métrica, algumas variações de equações foram desenvolvidas e, neste trabalho, o Fator de Luz do Dia Médio, ou *Average Daylight Factor* (ADF), é que será utilizado. Tanto o FLD quanto o FLD Médio são métricas simplificadas e foram criadas para utilização no céu encoberto.

O céu encoberto apresenta maior uniformidade, distribuição mais uniforme da luminância na abóbada celeste, no entanto, a iluminância no solo e demais superfícies sob esse tipo de céu, pode ser menor do que sob os demais, já que a componente solar (direta e refletida) não está presente. Porém, caso a luz do Sol não seja considerada também sob um céu claro, por exemplo, as superfícies podem receber menos luz do que receberiam sob um céu encoberto, como mostram os dados de Mattoni *et al.* (2018). Assim, caso uma janela seja projetada para que um determinado ambiente atinja os valores mínimos desejados de iluminância em uma condição desfavorável, como a de céu encoberto, é possível supor então que se o ambiente receber mais luz do que o previsto inicialmente, ocorrerá um ganho de luminosidade e ele pode apresentar melhores resultados. Em suma, se a janela atender os requisitos com menores iluminâncias, em condições mais favoráveis, pode ter um melhor desempenho, até certo ponto, quando a luz pode tornar-se excessiva, caso haja luz solar direta suficiente para isso.

Segundo Josai, Hraska e Bacigal (2024) o Fator de Luz do dia Médio é adequado para o uso pelos arquitetos por relacionar as características espaciais e geométricas das edificações de forma simples e direta com os requisitos de

iluminação natural, particularmente para localidades com predominância de céu encoberto. Lynes e Littlefair (1990) explicam que o Fator de Luz do Dia Médio foi recomendado para uso no estágio inicial de esboço de projetos pela facilidade do seu cálculo e também por sua relação direta com a área envidraçada. Por sua simplicidade, O FLD Médio possibilita que a avaliação da luz natural seja feita desde as primeiras etapas em conjunto com o andamento do projeto nos escritórios de arquitetura (TSAGRASSOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015). A métrica, que é possível de ser calculada manualmente através de operações elementares da matemática, pode dispensar a realização de simulações computacionais nas fases projetuais preliminares.

Por se tratar de uma métrica simplificada, o FLD Médio apresenta limitações significativas, por exemplo, não considerar condições climáticas, orientação solar e localização geográfica (no entanto, ele considera indiretamente essa variável através da iluminância externa). Por outro lado, existem as métricas de luz do dia dinâmicas e baseadas no clima, denominadas *Climate-Based Daylight Metrics*, CBDM, que levam todos esses fatores em consideração e conseguem anualizar os resultados. No entanto, os cálculos das métricas dinâmicas são muito mais elaborados, feitos exclusivamente através de simulações computacionais. Além disso, o método CBDM não é adequado para as fases iniciais de projeto pois nessas etapas as definições mudam significativamente e com frequência (JOSAI; HRASKA; BACIGÁL, 2024). De maneira resumida, as métricas dinâmicas são mais precisas e detalhadas, porém, exigem simulações computacionais para sua obtenção, e o FLD Médio é simplificado, podendo facilmente ser calculado manualmente, porém, não faz algumas considerações importantes sobre como a luz natural se comporta especificamente em determinadas localidades, orientações e climas (FORMOLLI; KLEIVEN; LOBACCARO, 2022).

O FLD Médio é bastante estudado e está inserido em pesquisas atuais com abordagens diversas e em diferentes localidades. Josai, Hraska e Bacigál (2024) utilizaram uma variação feita a partir do FLD médio para avaliar o potencial não visual (melanópico) de salas iluminadas lateralmente na República Eslovaca. Já Moschella, Amato e Gagliano (2023) utilizaram a métrica para um estudo de caso que avaliou, em termos de iluminação natural, salas de aula de alguns edifícios escolares históricos italianos. Phuong *et al.* (2023) calcularam a intensidade da luz natural recebida nas fachadas de um edifício integrativo piloto no Vietnã com o uso FLD Médio. Formolli,

Kleiven e Lobaccaro (2022) utilizaram o FLD Médio para avaliar os efeitos, nos ambientes internos, de um processo de densificação em termos de acessibilidade solar em ambientes construídos nórdicos. Rodzi, Mohamoud e Hanapi (2022) utilizaram o FLD médio para avaliação do projeto de uma mesquita na Malásia.

Para compreender a aplicabilidade do FLD Médio nos trópicos, onde o céu encoberto não é predominante, é importante avaliar suas correlações com as métricas dinâmicas utilizadas nos programas de simulação. Diante do exposto, este trabalho buscou identificar, por meio de simulações, comparações e análises, as relações entre o Fator de Luz do Dia Médio e as métricas dinâmicas em regiões tropicais, a fim de avaliar sua viabilidade como ferramenta de projeto inicial.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Identificar as relações entre o Fator de Luz do Dia Médio e as métricas dinâmicas em regiões tropicais, a fim de avaliar a viabilidade do uso do FLD Médio como ferramenta nas etapas preliminares de projeto nessas regiões.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência de diferentes orientações solares e aspectos construtivos (tamanhos de aberturas e tipos de obstruções) no comportamento do FLD Médio em relação às métricas dinâmicas em diferentes latitudes;
- Avaliar as relações entre o Fator de Luz do Dia Médio e as métricas dinâmicas por meio de comparações e regressões lineares, a fim de determinar a precisão dos modelos propostos.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco seções. A primeira, a introdução, explica de maneira resumida que o FLD Médio pode ser uma ferramenta simplificada importante nas etapas iniciais de projeto. Além disso, expõe os objetivos do trabalho, focados principalmente nas correlações entre o FLD Médio e as métricas dinâmicas. A segunda seção trata do referencial teórico, abordando conceitos essenciais para a

compreensão do estudo, como as diferenças entre as métricas estáticas e dinâmicas, com exemplos e definições. A terceira seção descreve a metodologia, detalhando os modelos desenvolvidos e os parâmetros utilizados para os cálculos e simulações computacionais. A quarta seção apresenta os resultados, nesta, os valores calculados do FLD Médio e das métricas dinâmicas obtidos nas simulações são analisados de forma comparativa, e as correlações são avaliadas por meio de regressões lineares. Foram feitas ainda recomendações de valores de FLD Médio para as latitudes estudadas. Por fim, a quinta seção traz as considerações finais, enfatiza as correlações avaliadas, as limitações da pesquisa e oferece sugestões para trabalhos futuros. A dissertação inclui ainda quatro apêndices com memoriais de cálculo e gráficos complementares.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A luz natural e a arquitetura

"A arquitetura é o jogo sábio, correto e magnífico dos volumes reunidos sob a luz. Nossos olhos são feitos para ver formas sob a luz; as sombras e os claros revelam as formas" (LE CORBUSIER, 1977, p. 13). Explorando de maneira muito menos poética, o que o arquiteto Le Corbusier diz é que a luz é fundamental para que a arquitetura seja vista. Moon (1961) aponta que o principal intuito da iluminação é possibilitar que as pessoas vejam. Fica claro então que existe uma relação intrínseca entre a luz e a arquitetura. A luz nos permite enxergar a forma, o espaço, a textura e a cor, características determinantes da arquitetura (PEREIRA, 2017).

Apesar de a luz que revela a arquitetura poder ser também a luz artificial, já que do ponto de vista físico o objetivo de possibilitar a visão também seria alcançado, a luz natural tem uma relação de longa data com os espaços habitados. Por muito tempo a iluminação natural era a única opção disponível, depois surgiu o fogo e com ele artefatos como velas e lamparinas, que faziam suplementação à luz solar (MOORE, 1991). Porém, a iluminação natural continuava sendo a mais abundante e tamanha era sua importância que a rotina dos seres humanos era delimitada principalmente por ela. A maior parte das atividades precisavam ser feitas sob a luz do dia, no espaço temporal entre o nascente e o poente do Sol, o que por consequência determinava também os horários de descanso, os intervalos escuros, as noites.

Até meados de 1800 os arquitetos utilizavam principalmente a envoltória das edificações para permitir o contato entre as condicionantes ambientais externas e internas (MOORE, 1991). Quando as edificações eram planejadas e construídas, se buscava então trazer a luz natural para seu interior através das aberturas. Não era possível ignorar as condições do meio externo, não só porque a maior fonte de luz estava justamente do lado de fora das janelas, mas por outras questões climáticas também, como insolação e ventilação. A construção precisava ser adaptada ao seu local de implantação.

Após a Revolução Industrial, no entanto, a arquitetura começou a traçar novos caminhos. Recursos tecnológicos estavam disponíveis e os projetistas foram gradativamente modificando suas prioridades. Não só a luz elétrica passou a estar amplamente disponível, mas também sistemas artificiais de aquecimento e

resfriamento. Questões de iluminação e ventilação, que até então eram determinantes nas soluções projetuais, a partir daquele momento poderiam ser resolvidas artificialmente sem muitas dificuldades, então novos aspectos foram tornando-se centrais. Acrescenta-se ao contexto o momento pós Primeira Guerra Mundial, no qual as cidades precisavam ser reconstruídas de maneira rápida, e a Arquitetura Moderna também buscou atender essa demanda trazendo uma maior racionalização das construções. Cabe salientar, porém, que nem todos arquitetos dessa época deixaram de lado as questões ambientais, a exemplo do Le Corbusier, que tem a insolação nas edificações como uma preocupação, e inclusive utilizou os elementos conhecidos quebra-sóis em seus projetos (BITTENCOURT, 2004).

Todavia, muitos profissionais continuaram a usufruir indiscriminadamente dos novos recursos e surgiu um movimento conhecido como Arquitetura Internacional, que buscava expressar poder, utilizar as novas tecnologias e parecia ignorar o contexto climático em seus projetos. Esse movimento incorporava o pensamento da época de que os recursos eram abundantes e difundiu práticas até então tidas como impossíveis, como a ampla utilização de fachadas envidraçadas em regiões tropicais, o que exige o uso de sistemas de ar-condicionado para alcançar o conforto térmico da edificação, aumentando assim seu consumo energético (BITTENCOURT, 2004).

Apesar de Bittencourt (2004) apontar que a crise energética que aconteceu nos anos 1970 fez com que esses valores fossem revistos, infelizmente alguns exemplares dos modelos internacionais seguem sendo reproduzidos até os dias atuais. No entanto, a abundância da Revolução Industrial não é mais realidade, os recursos hoje são mais caros e escassos também. Conde (2003 *in* CORBELLA; YANNAS, 2009, prefácio) enfatizou: “No século XXI a arquitetura, sem desprezar o belo e a plasticidade das formas, o conforto e a funcionalidade, terá que forçosamente reencontrar o meio ambiente cujo equilíbrio é de fundamental importância para a sobrevivência da espécie humana na terra”. Aos poucos a arquitetura vem resgatando princípios ambientais, agora aliando os recursos naturais com as inovações tecnológicas. Os selos verdes atribuídos para as edificações, por exemplo, são ferramentas que de certa maneira encaminham os profissionais na direção da otimização de recursos.

A iluminação natural desempenha um papel fundamental nas edificações, pois sua utilização adequada ajuda a reduzir o custo energético (LAM, 1977), e também afeta diretamente o conforto visual dos usuários. Por isso o ideal é que exista um sistema integrado no qual a iluminação artificial seja requisitada quando a natural não

estiver alcançando os níveis desejados. É importante então que os projetos, não só arquitetônicos, mas também elétricos e de iluminação, sejam bem dimensionados para que o máximo potencial seja extraído da luz natural.

A boa iluminação, no entanto, vai além do conhecimento de física aplicada (MOON, 1961). O autor explica que o sistema de iluminação deve prezar a boa visão, o maior objetivo da iluminação, mas que ao mesmo tempo não deve se restringir apenas a considerações físicas (puramente os níveis de iluminância desejados, por exemplo), por mais que elas sejam muito importantes, os usuários e suas implicações (tarefas, particularidades, posição no ambiente etc.) também devem ser considerados. Para Moon (1961), o projeto se torna não só extremamente complexo por ter que levar em consideração todos esses fatores, mas também imensamente fascinante.

Reinhart e Wienold (2011) propõe uma definição particular de um bom projeto de iluminação natural, os autores dizem que ele deve otimizar a disponibilidade de luz natural durante o ano inteiro dentro do espaço, enquanto garante também a sua eficiência energética e a alta satisfação dos usuários. Todos esses fatores estão ligados à quantidade de luz que vai adentrar nos ambientes, o que por sua vez, se relaciona diretamente com o tamanho das aberturas projetadas.

2.2 Tamanho das aberturas

Um elemento determinante e indispensável no projeto de iluminação natural são as aberturas, conseqüentemente a determinação de suas áreas é de fundamental importância. Ao longo da história da arquitetura o tamanho das aberturas foi acompanhando as transformações que as próprias edificações iam sofrendo. De maneira sucinta, na medida do possível, segue um breve histórico de acordo com Moore (1991): no Egito antigo, os tamanhos das aberturas eram limitados de acordo com a capacidade estrutural das pedras utilizadas na construção das vigas e pilares; na Roma antiga, a criação do arco pleno, abóboda de berço e a cúpula possibilitaram que materiais naturalmente pouco resistentes à flexão, passassem a ser utilizados sob esforço de compressão permitindo grandes vão e menos pilares, o que viabilizou a utilização de grandes aberturas; no período Românico, paredes não portantes podiam conter aberturas maiores (porém menores que as da Roma antiga) e as rosáceas começaram a surgir; no período Gótico a alvenaria estrutural de pedra atingiu seu maior refinamento com o arco ogival e a abóboda nervurada, e uma importante

mudança estrutural aconteceu, as paredes não mais precisavam sustentar os telhados, os contrafortes então estenderam-se como aletas, o que permitiu a utilização de extensos vitrais laterais; no Renascimento, a luz do dia também foi usada para enfatizar as formas arquitetônicas, as cúpulas renascentistas pareciam flutuar sobre os tambores perfurados por grandes aberturas. Foi depois de séculos de história, a partir da Revolução Industrial e dos seus já comentados desdobramentos, chegando no Modernismo, que os projetistas não tiveram mais que necessariamente se adequar às limitações impostas pela estrutura para dimensionar as aberturas.

Até então, além das limitações estruturais, como a iluminação natural era dominante, o clima do local e o uso do ambiente também determinavam o dimensionamento e a localização das aberturas. Porém, quando a iluminação elétrica e os sistemas de resfriamento e aquecimento passaram a estar disponíveis, a iluminação não dependia mais exclusivamente da proximidade da abertura com o exterior (MOORE, 1991).

As fachadas livres do modernismo permitiram a utilização de panos de vidro, que aumentavam a área de captação de luz natural, mas sem proteção adequada nas regiões tropicais, também poderiam ser responsáveis por causar um efeito estufa na edificação (BITTENCOURT, 2004). Além de questões térmicas como maior aquecimento e necessidade de resfriamento artificial, as fachadas envidraçadas podem se tornar um problema para a iluminação. Os grandes panos de vidro desprotegidos podem aumentar a ocorrência de ofuscamento e levar os usuários a utilizarem proteções solares internas (telas, persianas, cortinas) que acabam diminuindo, ou mesmo bloqueando totalmente, a entrada da luz natural, e ainda impedem a integração do ambiente com a vista externa (PEREIRA, 2017).

Segundo Pereira e Mueller (2007), não é raro que projetos de iluminação desconsiderem totalmente a utilização da luz natural, esse tipo de prática segue reproduzindo o princípio dos recursos abundantes da Revolução Industrial. Moore (1991) explica que é simples para os clientes apoiarem mudanças que gerem economia de energia, basta eles olharem para a relação custo-benefício. Por outro lado, para os arquitetos o autor diz que a tarefa não é tão simples, pois pode implicar em mudanças de estratégias de projetos repetidas muitas vezes por anos, além de requerer a aquisição de novos conhecimentos técnicos para buscar um projeto integrador.

A gradual retomada da preocupação com a otimização de recursos impacta

diretamente no dimensionamento das aberturas, já que essas estão ligadas não só à disponibilidade da luz natural, mas também ao conforto visual e térmico do usuário e ainda à eficiência energética da edificação como Reinhart e Wienold (2011) explicam. Os arquitetos precisam considerar em seus projetos elementos essenciais como o entorno, presença ou não de obstruções externas, contato com o exterior, ventilação natural, clima e materiais mais adequados para cada situação estudada. O dimensionamento então precisa encontrar um ponto ótimo entre as diferentes condicionantes.

A determinação da área ideal de janela deve considerar ainda um equilíbrio entre provisão de luz natural e carga térmica (GHISI; TINKER, 2005). É essencial que os projetistas estejam atentos à radiação direta, pois além de poder causar ofuscamento, uma condição de intensa exposição aos raios solares diretos pode elevar muito a carga térmica da edificação. Pereira (2017) aponta que sombrear as aberturas é a forma mais eficaz de proteger os ambientes da radiação solar direta. A autora explica que quando os elementos de sombreamento são bem dimensionados, eles não devem impedir totalmente a luz solar, apenas a parcela direta, permitindo assim a entrada da luz refletida. Portanto, na hora da especificação e dimensionamento dos elementos, se faz necessário buscar também a otimização entre iluminação natural e insolação.

As condicionantes para a determinação do tamanho das aberturas foram se alterando ao longo do tempo, mas de maneira geral desde que as estruturas das edificações deixaram de ser o cerne da questão, outros aspectos passaram a ser abordados, como a quantidade de luz natural que chega no interior de um ambiente, por exemplo. A partir do raciocínio inicial de padronizar de alguma maneira os ambientes sob o ponto de vista luminoso, foram surgindo as recomendações que hoje integram diversos guias, normas e códigos de obras, que tratam de itens como as dimensões mínimas das aberturas em relação à área de piso do ambiente, ou em relação à parede que contém a abertura, dentre outros.

2.2.1 Normativos baseados no tamanho das aberturas

Os normativos e as recomendações de projeto são ferramentas destinadas a regulamentar as construções, abrangendo aspectos fundamentais como segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Boubekri (2004) analisou a legislação de diversos

países com relação à iluminação natural, classificando-as de acordo com o princípio em que foram baseadas, sendo estes: iluminância, Fator de Luz do Dia (FLD), tamanho da abertura e zoneamento solar.

As regulamentações utilizadas nos Estados Unidos, Canadá, França e Alemanha estabelecem valores mínimos de iluminância que devem ser garantidos em diferentes tipos de ambientes e para diferentes atividades visuais (BOUBEKRI, 2004). Já o Fator de Luz do Dia é utilizado em regulamentações como a norma europeia EN 17037 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2018), código indiano IS 2440 (BUREAU OF INDIAN STANDARDS, 1975) e a resolução nº 180540 da Colômbia (COLÔMBIA, 2010).

É interessante perceber que diversos países baseiam suas normativas no tamanho das aberturas e estabelecem uma relação direta entre a área da abertura e a área de piso e/ou de parede. Por exemplo, no Reino Unido, a parte 2 do código britânico BR 8206 estipula que em salas com menos de 8 metros de profundidade, a área das janelas deve representar mais de 20% da área da parede externa, e para salas com mais de 14 metros de profundidade, essa proporção aumenta para 35% (BOUBEKRI, 2004 apud DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, 1971); para escritórios, o mínimo é 35% da área e para edifícios institucionais a exigência mínima é de 25% (BOUBEKRI, 2004 apud LITTLEFAIR, 1999). Nos Estados Unidos a área envidraçada não pode ser inferior a 8% da área de piso (BOUBEKRI, 2004 apud BUILDING OFFICIALS AND CODE ADMINISTRATORS, 1990). No Japão, o código de construção estipula que a área das janelas de ambientes de uso contínuo deve corresponder a pelo menos 14% (1/7) da área de piso em residências e entre 20% e 40% para demais tipos de edifícios (BOUBEKRI, 2004). Além disso, países como Austrália, Nova Zelândia e Venezuela determinam que o tamanho mínimo das janelas em residências deve ser 10% da área de piso (BOUBEKRI, 2004; SIEM; SOSA, 2001; STEWART, 2008).

As legislações que se baseiam no zoneamento solar geralmente são regulamentações locais e municipais, e sua aplicação pode variar devido a inúmeros fatores. Essas regulamentações não têm como finalidade estabelecer ou assegurar níveis específicos de iluminação no interior dos edifícios. Em vez disso, o seu propósito principal é restringir a altura e o volume das construções, com o objetivo de proteger o direito ao acesso à luz solar nas ruas e nas edificações vizinhas. Exemplos notáveis dessas regulamentações incluem a Portaria de Zoneamento de Nova Iorque

de 1916 e o Padrão de Construção Japonês de 1977 (BOUBEKRI, 2004).

No Brasil, a Constituição Federal de 1988 atribuiu ao município a responsabilidade pela política urbana. O código de obras municipal é a legislação que rege, dentro dos limites do município, todas as atividades relacionadas à construção, reforma e ampliação de edificações. Essa legislação é essencial para a administração local, uma vez que permite o controle e fiscalização das edificações com o objetivo de garantir padrões de segurança, higiene, salubridade e conforto (ABNT, 1992).

Laranja, Gazzaneo e Cabús (2009) analisaram abordagens referentes à iluminação natural nos códigos de obras das seguintes capitais brasileiras: Vitória, Curitiba, Fortaleza, Maceió, São Paulo, Florianópolis e Porto Alegre. Foi observado que os critérios mais utilizados que influenciam a iluminação natural no interior do ambiente estão relacionados com a proporção entre a área de abertura e área de piso, bem como a profundidade dos compartimentos em função da altura ou largura do ambiente.

Analisando os códigos de obras das capitais brasileiras, a área de abertura para ambientes residenciais possui intervalos que variam entre $1/5$ e $1/8$ para ambientes de permanência prolongada, e entre $1/7$ até $1/15$ para ambientes de permanência transitória. No entanto, os valores que mais se repetiram foram $1/6$ e $1/8$ para permanência permanente (p.p.) e permanência transitória (p.t.), respectivamente, conforme Quadro 1. Para elaboração do quadro não foram consideradas situações especiais como ambientes integrados a uma varanda, por exemplo, apenas as situações gerais.

Embora as legislações que baseiam seus critérios na proporção entre área de abertura e área de piso estejam, ainda que indiretamente, relacionadas à iluminação natural, tais requisitos não têm como principal objetivo proporcionar luz natural, mas, sim, garantir uma adequada taxa de renovação de ar (BOUBEKRI, 2008). Portanto, uma abertura adequada para a ventilação natural pode apresentar insuficiência ou excesso de luz natural, uma vez que os critérios utilizados não levam em consideração fatores importantes como, por exemplo, orientação das fachadas, obstruções e desempenho luminoso do ambiente.

Quadro 1 – Proporções mínimas de área de janela/piso das capitais brasileiras

UF	Cidade/Fonte	Área de janela/área de piso
AC	Rio Branco (2018)	1/8 em ambientes de p.p. e 1/10 em ambientes de p.t.
AL	Maceió (2007)	O atendimento aos níveis de iluminação é de competência e responsabilidade do projetista
AM e RO	Manaus (2014) e Porto Velho (1973)	1/5 para todos os ambientes
AP	Macapá (2004)	1/5 em ambientes de p.p. e 1/7 em ambientes de p.t.
CE, RN, SE e TO	Fortaleza (1981), Natal (2004), Aracaju (1966) e Palmas (1990)	1/6 em ambientes de p.p. e 1/8 em ambientes de p.t.
BA	Salvador (1988)	1/6 em ambientes de p.p. e 1/10 em ambientes de p.t.
DF	Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2022)	1/8 para sala, quarto e cozinha e 1/10 para banheiro
ES	Vitória (1998)	1/8 para sala, quarto e cozinha e 1/15 para banheiro
GO e MT	Goiânia (2023) e Cuiabá (2022)	Determinação da área mínima de iluminação a critério e responsabilidade do projetista
MA	São Luís (1976)	1/7 em ambientes de p.p. e 1/8 em ambientes de p.t.
MG	Belo Horizonte (2009)	1/6 para sala e quarto e 1/8 para cozinha e banheiro
MS	Campo Grande (1979)	1/7 em ambientes de p.p. e 1/10 em ambientes de p.t.
PA	Belém (1988)	As áreas mínimas das aberturas serão definidas em regulamentações posteriores
PB	João Pessoa (1971)	1/6 ambientes de p.p. e 1/10 ambientes de p.t.
PE e PI	Recife (1997) e Teresina (2015)	1/6 para sala e quarto, 1/8 para cozinha e área de serviço e 1/10 para banheiro
RJ	Rio de Janeiro (2019)	1/8 para sala e quarto e 1/10 para cozinha e banheiro
RR	Boa Vista (1974)	1/6 para dependências principais e cozinhas e 1/8 para sanitários, circulações e depósitos
SP	São Paulo (2017)	Não especificado

Fonte: A autora (2024).

Apesar dos normativos de maneira geral estipularem proporções mínimas para o tamanho das aberturas, para fazer um dimensionamento adequado das mesmas e dos elementos de sombreamento quando forem necessários, do ponto de vista de desempenho luminoso, é necessário estipular qual ou quais critérios desejados. Um critério pode ser, por exemplo, valores mínimos de iluminância de luz natural no plano de trabalho do ambiente pretendido. A escolha da(s) métrica(s) mais adequada(s) é

de fundamental importância de acordo com os objetivos a serem alcançados, pois elas irão permitir avaliar o que se deseja, de maneira isolada ou utilizando um conjunto de métricas caso necessário.

2.3 O comportamento da luz natural e o surgimento das métricas

Estipular valores de referência ou valores-alvos para a quantidade de luz natural é um verdadeiro desafio. Além de questões subjetivas do conforto visual, as diferentes configurações e características das aberturas e dos ambientes podem alterar totalmente a percepção final. O exato mesmo valor de iluminância, ou de alguma outra métrica, pode ser muito adequado para uma situação e totalmente inadequado/desconfortável em outra. Por exemplo, uma iluminância de 1.000 lx pode ser uma ótima referência para uma sala de aula, simultaneamente, no entanto, pode ser desconfortável e até excessiva em um ambiente de sala de estar.

Ao longo das décadas diversas ferramentas e métricas foram sendo desenvolvidas com o objetivo de estudar o comportamento da luz natural e avaliar o seu desempenho. As cartas solares (ATKINSON, 1912), utilizadas até hoje, se propõem a representar de maneira gráfica e planejada a trajetória aparente que o Sol faz na abóboda celeste ao longo do dia, em todos os dias do ano. Elas são uma ferramenta simplificada, porém de extrema utilidade, não só por facilitar a visualização e aprendizagem do caminho do Sol, mas também pelas contribuições projetuais que possibilitam, através de estudos de insolação, desenho de máscaras de sombra e dimensionamento de elementos de proteção. Posteriormente foram criados os modelos físicos em escala, as edificações e/ou elementos passaram a ser representados em maquetes. Nessa categoria cabe destacar o equipamento nomeado de heliodon (DUFTON E BECKETT, 1932), que simula o Sol em sua trajetória aparente. O heliodon permite a inserção dos modelos físicos desejados nele, proporcionando a observação tridimensional da interação do Sol com as edificações ao longo do ano, o que torna o entendimento mais didático. Assim como as cartas solares, ele também possibilita contribuições projetuais.

Enquanto o comportamento da luz natural e sua interação com as edificações eram estudados, já existia a preocupação de também quantificar e avaliar essa luz no interior dos ambientes construídos, foi a partir dessa necessidade que as métricas foram criadas. Mardaljevic, Heschong e Lee (2009) conceituam métricas como uma

combinação matemática de (provavelmente) diferentes medidas e/ou dimensões e/ou condições, em uma escala contínua. Os autores explicam ainda que o objetivo de uma métrica deve ser auxiliar no processo de tomada de decisão, para isso ela deve ser uma combinação de diversos fatores, que juntos irão prever com sucesso resultados de desempenho, sejam eles melhores ou piores. Porém, esse desempenho não precisa necessariamente ser explicado por uma única métrica, até porque seria muito complicado agrupar todos possíveis fatores relevantes em uma métrica só.

As métricas podem avaliar diferentes aspectos e serem combinadas entre si permitindo uma análise mais completa. Cabe ao projetista, ou a quem estiver realizando a avaliação de desempenho, escolher, de acordo com as características de cada métrica, qual ou quais as que melhor auxiliam no processo de tomada de decisão em cada situação particular analisada.

2.4 Métricas estáticas de avaliação de desempenho da luz natural

As métricas de iluminação consideradas como estáticas, determinam a previsão de luz em um determinado instante desejado, data e hora específica, e com determinadas condições também pré-definidas, como o tipo de céu (RIZZARDI, 2018). As métricas estáticas não abrangem variações ao longo do tempo, como mudanças diárias ou sazonais da luz natural, portanto, são métricas mais simplificadas. Todavia, apesar das suas limitações, são métricas de suma importância e utilizadas até os dias atuais. Antes dos computadores estarem disponíveis, as técnicas gráficas eram as principais formas de estimar os níveis de luz natural com o mínimo necessário de cálculos, destacando-se os diagramas de Waldram e os transferidores e nomogramas da *Building Research Station*, BRS (TREGENZA; WILSON, 2011).

2.4.1 Iluminância (E)

A iluminância é uma grandeza fotométrica que diz respeito à quantidade de luz que incide sobre uma superfície. Seu resultado é um dado pontual e seu símbolo é E pois tem origem na palavra francesa *éclairage*, que significa iluminação. Sua unidade é o lux (lx), um lux equivale a um lúmen, medida de fluxo luminoso (fluxo total de luz a partir de uma fonte), incidindo uniformemente em uma superfície de um metro quadrado (TREGENZA; LOE, 2009). As normativas geralmente informam um

determinado valor mínimo de iluminância a ser atingido em um plano de trabalho, que é considerado o mínimo ideal para a realização das tarefas com conforto visual (ABNT 2021; 2013a; 2013b). Apesar do conceito original de métrica estática, a iluminância também é passível de ser utilizada de maneira dinâmica e anualizada, a partir da variação nomeada de Iluminância Média Anual, EMA.

2.4.2 Fator de Luz do Dia (FLD)

O Fator de Luz do Dia (FLD) ou *Daylight Factor* (DF) foi a primeira métrica proposta para avaliar o desempenho luminoso dos ambientes. A criação do conceito é atribuída a Alexander Trotter em 1895 (LOVE, 1992 apud MARDALJEVIC, 2012). No entanto, segundo Mardaljevic (2012), a autoria não é completamente certa, pois não parece haver um artigo que apresente o desenvolvimento inicial dessa abordagem. Embora o termo FLD propriamente dito não tenha sido utilizado, seu conceito está definido no livro de autoria de Trotter, onde ele se refere à métrica como coeficiente (TROTTER, 1911).

O FLD pode ser definido como sendo a razão, no mesmo instante, entre a iluminância interna e externa (na condição de céu encoberto completamente desobstruído), resultando na iluminância, expressa em porcentagem, de um determinado ponto (HOPKINSON, 1963). O autor explica ainda que essa proporção é mais ou menos constante, ou seja, o valor do FLD em si não é constante, mas sim a proporção, na medida em que a luminância do céu aumenta ou diminui, a relação entre a iluminância interna e externa permanece aproximadamente constante. Segundo Tregenza e Wilson (2009), de maneira a tornar viável a quantificação de algo tão complexo quanto a luz natural, algumas suposições simplificadoras foram feitas para o cálculo do FLD: não há luz solar, o céu é encoberto com um padrão de luminância simples, todas as superfícies internas e externas apresentam refletância difusa e o ambiente é considerado vazio. O céu geralmente considerado nos cálculos do FLD é semelhante ao céu encoberto padrão da CIE (TREGENZA; LOE, 2009).

De maneira simplificada, o Fator de Luz do Dia representa através de uma porcentagem a iluminância, quantidade de luz natural, que chega a um ponto contido em um plano horizontal, no interior de um ambiente, a partir da luz disponível em um plano horizontal exterior desobstruído, em condição de céu encoberto. Para ilustrar, se a iluminância interna (E_i), for de 500 lx e no mesmo instante, a iluminância externa

(E_e), no topo da edificação, com céu desobstruído, for de 20.000 lx, tem-se então que $FLD = (500/20000) \cdot 100\% = 2,5\%$. Em outras palavras, de toda a luz natural externa disponível naquele instante, 2,5% dela está atingindo o ponto interno estudado.

Como no caso do céu encoberto não existe a componente luz solar direta e a maior parte da luz natural disponível é difusa (bem como as superfícies são consideradas para o FLD, por definição), a iluminância externa pode ser substituída pela iluminância horizontal difusa externa (E_{HD}) que é mais representativa nesse caso, e refere-se à iluminância que atinge a superfície horizontal uniformemente. Esse valor pode ser encontrado em normativos ou relatórios técnicos, bem como também é possível de ser simulado. Em ambas opções diferentes considerações são possíveis, uma mais simplificada considera como referência a iluminância medida às 12h do dia do equinócio de primavera (para o hemisfério Sul) sob o céu encoberto da CIE. Considerações mais sofisticadas também podem ser feitas, a norma europeia EN 17037 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2018), por exemplo, que apresenta valores de referência para capitais dos países membros da *European Committee for Standardization* (CEN), utilizou como base arquivos climáticos padronizados (*EnergyPlus Weather, Meteonorm, Satel-Light* etc.) com uma série temporal de valores da iluminância horizontal difusa disponíveis. A norma propõe que a seleção para o valor mediano considere um critério de 50% do horário diurno. A Tabela 1 apresenta valores de E_{HD} das cidades brasileiras estudadas nesse trabalho e também algumas europeias, bem como dois valores de referência de iluminâncias, 300 lx (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012) e 500 lx, para observação dos valores de FLD que seriam necessários em cada localização para atingir a iluminância desejada.

Tabela 1 – Valores de referência para iluminância horizontal difusa

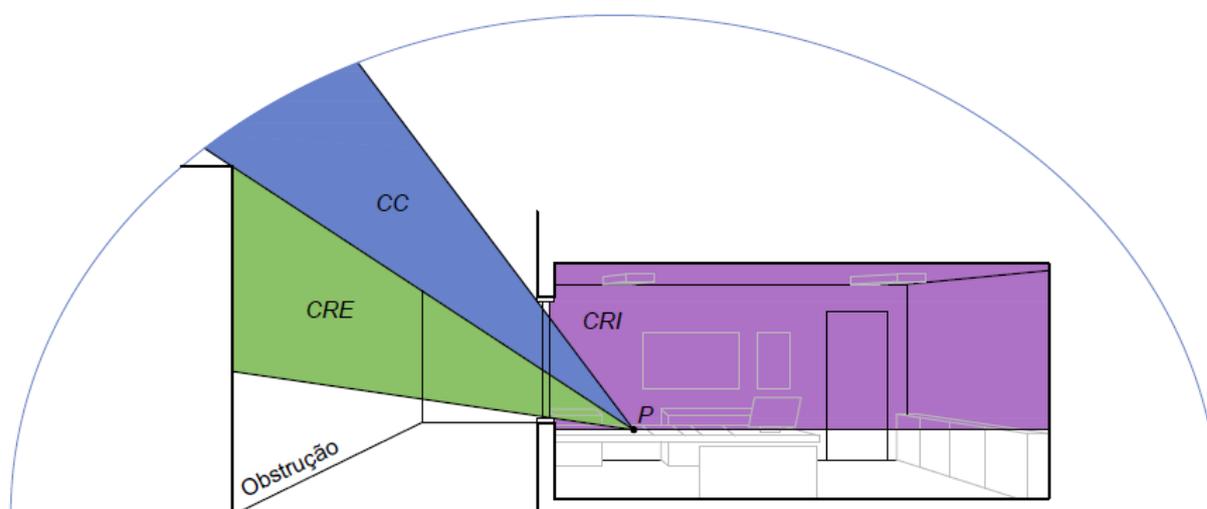
Cidade	País	Latitude (°)	E_{HD} (lx)	Fonte da E_{HD}	FLD para atingir 300 lx	FLD para atingir 500 lx
Macapá (AP)	Brasil	0,04 N	21.299	TropLux	1,4%	2,3%
Maceió (AL)		9,66 S	20.961		1,4%	2,4%
Vitória (ES)		20,32 S	19.911		1,5%	2,5%
Lisboa	Portugal	38,73 N	18.220	(CEN, 2018)	1,6%	2,7%
Paris	França	48,73 N	15.900		1,9%	3,1%
Estocolmo	Suécia	59,65 N	12.100		2,5%	4,1%

Fonte: A autora (2024).

Hopkinson (1963) explica que o FLD também pode ser obtido através da combinação de três componentes, como mostrado nas Figura 1 e Figura 2, sendo elas: a componente do céu, CC (a luz que chega no ponto analisado da sala vinda diretamente do céu), a componente refletida externa, CRE (composta pela luz que entra pela janela após ter sido refletida em superfícies externas, como obstruções de maneira geral, edificações, vegetação etc.) e a componente refletida interna, CRI (que é a luz que atinge um ponto interno do ambiente depois de ter sofrido reflexão em uma ou mais superfícies internas).

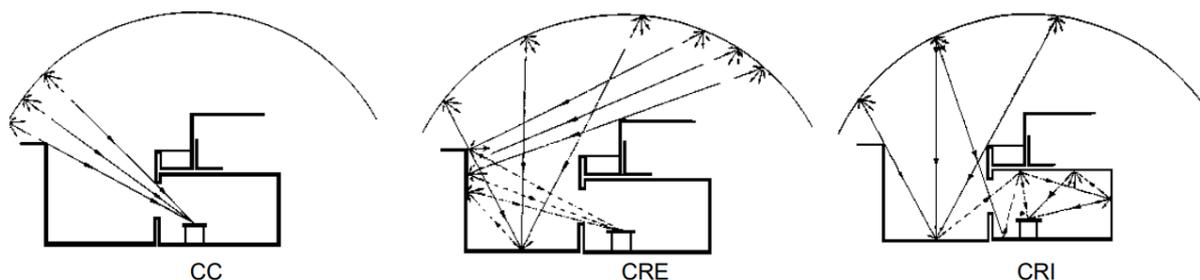
Tregenza e Loe (2009) evidenciam que se uma considerável parcela de céu for visível, a componente do céu, CC, é a mais predominante e, também, pode ser a mais simples de calcular. Apesar das simplificações inerentes ao Fator de Luz do Dia, que a fazem não considerar as condições climáticas, para obtenção das iluminâncias intrinsecamente são considerados os seguintes fatores: geometria das edificações, obstruções externas e propriedades das superfícies — cor, difusividade, especularidade, transmitância e refletância (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

Figura 1 – Componentes do FLD



Fonte: A autora (2024).

Figura 2 – Componentes da luz natural que atinge o ponto interno



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Apesar do Sol ser a principal fonte de luz natural, de acordo com Hopkinson (1963) a abordagem padrão do Fator de Luz do Dia é baseada em condições próximas da região Noroeste da Europa, onde céus encobertos são comuns. Portanto, para esses locais, tanto o dimensionamento das janelas quanto o seu posicionamento baseiam-se na condição de céu encoberto predominante. Por consequência, como a luz do Sol direta não é considerada na análise, o FLD não sofre alterações devido à orientação solar, pois a luz estará distribuída da mesma maneira em todas as orientações. Pela mesma razão, o FLD não é afetado por qualquer fator ou estratégia que dependa do ângulo, intensidade ou redirecionamento solar (MARDALJEVIC; HESCHONG; LEE, 2009). Por outro lado, Hopkinson (1963) pontua que nas regiões tropicais o inverso acontece, a luz solar direta é a fonte mais frequente de luz natural. Dessa maneira, os parâmetros de projeto e avaliação para os trópicos não serão necessariamente os mesmos das regiões com céu predominantemente encoberto.

O Fator de Luz do Dia é importante por ser um indicador da aparência luminosa geral de um ambiente. Porém, um ambiente bem iluminado pela luz do dia não depende apenas da quantidade de luz recebida, a iluminância absoluta, depende também do contraste entre as superfícies internas e a vista exterior. Por definição, o FLD é uma medida de contraste entre o interior e o exterior (TREGENZA; WILSON, 2011; TREGENZA; LOE, 2009). Ainda segundo Tregenza e Loe (2009), para essa análise geral todo o campo visual deve ser considerado, não somente o plano de trabalho. Pode ser necessário, inclusive, utilizar a iluminação artificial durante o dia em algumas situações com o objetivo de diminuir o contraste entre o fundo de uma sala muito profunda e as áreas próximas da janela, bem como entre o interior e o exterior do ambiente, já que o contraste também é uma causa do ofuscamento (TREGENZA; LOE, 2009).

O FLD está presente até hoje em diversas normativas (CEN, 2018; ABNT, 2021; 2013b). Uma crítica feita é que essas recomendações geralmente não estipulam um valor máximo para a métrica, o que pode dar a sensação de que quanto maiores forem seus valores, mais bem iluminado o ambiente estará (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Mardaljevic, Heschong e Lee (2009) explicam que não raramente as diretrizes de iluminação baseadas no Fator de Luz do Dia entram em conflito com outros critérios importantes de projeto, como conforto e eficiência energética da edificação, já que para atingir os níveis de FLD estipulados nas recomendações, em muitos casos as edificações serão excessivamente envidraçadas (é fundamental lembrar que os autores se referem a regiões de clima predominantemente temperado).

2.4.3 Fator de Luz do Dia Médio

O Fator de Luz do Dia Médio (\overline{FLD}) ou *Average Daylight Factor* (ADF), determina o fator médio de luz natural em uma determinada área, normalmente a área engloba o plano de trabalho horizontal mais as superfícies de parede que estão abaixo de uma certa altura média da janela (TREGENZA; LOE, 2009). É uma extensão do raciocínio do Fator de Luz do Dia e as simplificações feitas para este também se aplicam ao Fator de Luz do Dia Médio (não há luz solar direta, o céu adotado é encoberto, as superfícies possuem refletâncias difusas e o ambiente é considerado vazio). Os autores afirmam que essa é uma métrica valiosa para prever a iluminação natural em um espaço, além de ser particularmente útil para projetar as aberturas nas fases iniciais de concepção de um projeto. É importante destacar que tanto o FLD quanto o FLD Médio não representam níveis absolutos de iluminância, mas sim, proporções.

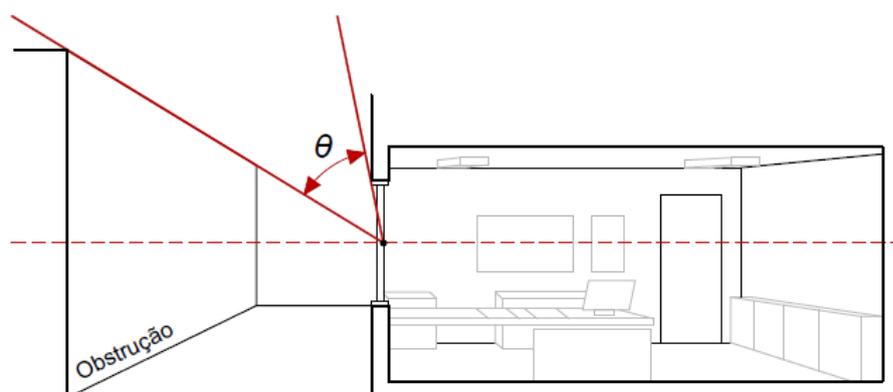
O FLD é uma métrica teoricamente simples de ser calculada, mas apresenta certa dificuldade na prática, tanto no cálculo manual de suas componentes quanto na realização de medições simultâneas da iluminância interna e externa. Quando os dados da iluminância não estavam facilmente acessíveis e as ferramentas computacionais não existiam, o cálculo se tornava ainda menos prático. Além disso, o Fator de Luz do Dia calcula a proporção de iluminância em apenas um ponto, o que reduz sua representatividade. Essas são algumas das razões pelas quais o Fator de Luz do Dia Médio foi desenvolvido, além de ter o cálculo simplificado, ele considera

diversos pontos obtendo como resultado a média das suas iluminâncias, sendo mais adequado para avaliar planos de trabalho, por exemplo.

Apesar de geralmente ter como objetivo avaliar um plano de trabalho horizontal, o raciocínio por trás do \overline{FLD} tem início a partir da superfície vertical da janela. De acordo com Tregenza e Wilson (2011), o cálculo do Fator de Luz do Dia Médio na superfície vertical externa de uma janela (FLD_j) pode ser realizado de forma prática através da equação (1), em que θ é o ângulo de céu visível, em graus, medido em corte a partir do centro da janela na sua face interna (conforme Figura 3).

$$FLD_j \approx \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

Figura 3 – Ângulo de céu visível, medida obtida em corte



Fonte: A autora (2024).

Essa equação se baseia em duas considerações segundo Tregenza e Wilson (2011). A primeira é que, em condições de céu desobstruído, a iluminância direta na superfície vertical equivale a cerca de 40% da iluminância em terreno aberto, enquanto a contribuição da luz refletida do solo geralmente representa aproximadamente 5%. A segunda consideração é que o céu é mais claro no zênite, mas o ângulo de incidência na janela também aumenta conforme o ponto de análise esteja mais ao alto, de modo que a contribuição de um determinado valor de θ tende a ser independente da elevação.

Aplicando o princípio do fluxo total, em que toda a luz que atinge a janela é transmitida através do vidro para as superfícies internas, é possível calcular o Fator de Luz do Dia Médio nas superfícies da sala (\overline{FLD}) conforme equação (2). Nesta

equação, A_j é a área da janela, enquanto A_t é a área de todas as superfícies da sala (paredes, teto e piso) (TREGENZA e WILSON, 2011).

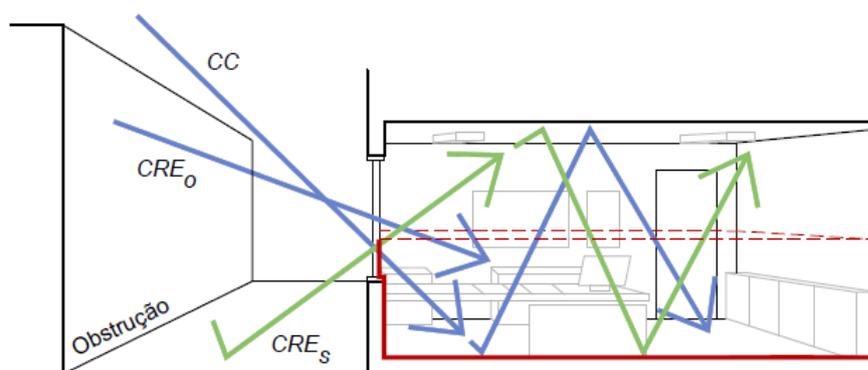
$$\overline{FLD} = FLD_j \frac{A_j}{A_t} \quad (2)$$

Para levar em consideração que uma parte da luz é absorvida pelo vidro e pela sujeira, e que há um aumento da quantidade de energia luminosa devido às reflexões internas na sala, a equação (2) pode ser reescrita pela equação (3), em que τ é a transmitância do vidro e R é a refletância média de todas as superfícies da sala.

$$\overline{FLD} = FLD_j \frac{A_j \cdot \tau}{A_t(1 - R)} \quad (3)$$

A equação (3) fornece o Fator de Luz do Dia Médio em todas as superfícies da sala. No entanto, é útil compreender a quantidade de luz que atinge apenas o plano de trabalho e as superfícies inferiores. Para isto, os autores dividem a sala obtendo duas partes, uma superior e outra inferior, como ilustrado na Figura 4. O que também justifica a substituição de A_t por $\frac{A_t}{2}$ na equação (4) apresentada adiante.

Figura 4 – Componentes da porção inferior da sala (contendo o plano de trabalho)



Fonte: Adaptado de Tregenza e Wilson (2011).

Supõe-se então, ainda conforme Figura 4, que toda luz externa que chega na sala de maneira descendente incide inicialmente nas superfícies internas da parte inferior, enquanto toda luz que adentra o ambiente de maneira ascendente atinge primeiramente as superfícies da parte superior da sala. Dessa maneira, o Fator de Luz do Dia Médio nas superfícies inferiores ($\overline{FLD}_{inferior}$), que contém o plano de

trabalho e por isso o foco apenas nessa divisão da sala, pode ser calculado por meio da equação (4). R_s e R_i são as respectivas refletâncias médias da parte superior e inferior. CC é a componente do céu na janela, CRE_o é a componente da luz refletida nas obstruções e CRE_s é a componente da luz refletida no solo e em outras superfícies abaixo da janela (TREGENZA e WILSON, 2011).

$$\overline{FLD}_{inferior} = (CC + CRE_o + CRE_s \cdot R_s) \frac{A_j \cdot \tau}{\left(\frac{A_t}{2}\right) (1 - R_s \cdot R_i)} \quad (4)$$

A equação (4) pode ser simplificada ao considerar que $(CC + CRE_o + CRE_s \cdot R_s)$ resulta no FLD_j , aproximadamente igual $\theta/2$, conforme equação (1). Além disso, pode-se assumir que o produto $R_s \cdot R_i$ é igual a R^2 , sendo R a refletância média de todas as superfícies da sala. Diante disto, a equação (4) pode ser reescrita para a equação (5). Essa equação foi desenvolvida no *Building Research Establishment* (BRE), e é amplamente utilizada no Reino Unido (TREGENZA e WILSON, 2011).

$$\overline{FLD}_{BRE} = \frac{A_j \cdot \tau \cdot \theta}{A_t (1 - R^2)} \quad (5)$$

Sendo A_j = área da janela, τ = transmitância do vidro, θ = ângulo de céu visível medido em corte a partir do centro da janela na sua face interna, A_t = área das superfícies envoltórias internas do ambiente (teto, piso e paredes, incluindo janelas) e R = refletância média ponderada por área. Tregenza e Loe (2009) utilizam área envidraçada no lugar de área da janela já que, segundo os autores, essa variável não deve considerar caixilhos e demais obstruções desse tipo.

Se o ambiente analisado possuir mais de uma janela, caso as janelas tenham características semelhantes, o \overline{FLD} poderá ser obtido normalmente a partir da utilização da área total (soma das áreas das janelas). No entanto, caso os tipos de vidros ou ângulos de obstrução externa sejam diferentes, o Fator de Luz do Dia Médio deve ser calculado para cada janela separadamente e os resultados serão somados.

Quando o objetivo do \overline{FLD} for o dimensionamento das janelas, a fórmula pode ser reorganizada para a equação (6):

$$A_j = \frac{\overline{FLD} \cdot A_t (1 - R^2)}{\theta \cdot \tau} \quad (6)$$

Tregenza e Loe (2009) apontam os valores apresentados no Quadro 2 como referência para o \overline{FLD} em climas temperados e para ambientes com janelas laterais. No Brasil, nenhuma norma utiliza valores de Fator de Luz do Dia Médio como requisito, também não há recomendações oficiais de valores de referência.

Quadro 2 – Valores de FLD Médio para ambientes em climas temperados

≥ 5%	O ambiente aparenta ser bem iluminado naturalmente e a luz artificial durante o dia normalmente não é necessária; Altos níveis de iluminação natural podem estar associados a problemas térmicos, tanto superaquecimento quanto resfriamento.
2-5%	O ambiente aparenta ser bem iluminado naturalmente, no entanto, a luz artificial pode ser necessária para: - Melhorar a iluminância em superfícies distantes da janela; - Reduzir o contraste com a vista externa. Em termos de eficiência energética a iluminação natural associada com a iluminação artificial suplementar, normalmente é a melhor escolha.
2% <	A iluminação artificial é necessária e provavelmente predominante. As janelas podem ter a vista externa, mas provém somente iluminação natural localizada.

Fonte: Adaptado de Tregenza e Loe (2009).

Tregenza e Wilson (2011) sugerem que diferentes valores de \overline{FLD} seriam apropriados para outros tipos de climas. Para climas quentes e úmidos, por exemplo, os autores indicam um Fator de Luz do Dia Médio de 1,5% ou até de 1%, considerando que a altura solar é naturalmente maior nessas regiões, o que implica em maiores iluminâncias externas e, conseqüentemente, reduz o valor de \overline{FLD} mínimo necessário.

2.5 Métricas dinâmicas de avaliação de desempenho da luz natural

Apesar da relevância das métricas estáticas, existia a necessidade de buscar suprir suas limitações para obter avaliações mais completas e com novos critérios de

análise. Surgiram então as métricas dinâmicas de avaliação de desempenho da luz natural. Elas fazem parte do conceito nomeado de *Climate-Based Daylight Modelling* (CBDM), modelagem da luz natural baseada no clima, apresentado por Mardaljevic (2006). Essas métricas utilizam bases de dados climáticos na realização dos seus cálculos para suprir a lacuna das condições climáticas que não são consideradas nas métricas estáticas, já que a iluminação natural é por natureza dinâmica e sofre alterações diárias e sazonais. Com essas novas considerações, as métricas dinâmicas tornam os resultados obtidos mais próximos das situações reais e permitem ainda análises anualizadas, ou seja, podem processar e oferecer um volume de informações muito grande, referentes a um ano inteiro. Devido a sua complexidade, estas métricas são obtidas a partir da utilização de programas de simulação computacional.

2.5.1 Iluminância Média Anual (EMA)

A Iluminância Média Anual (EMA) deriva do conceito da iluminância e apresenta como resultado a média das iluminâncias, em um instante, dos pontos contidos em um plano de trabalho ao longo de um ano, sua unidade é o lux (lx). Quanto mais pontos e mais bem distribuídos estiverem, mais precisa é a média. Para o seu cálculo todos os dias do ano são considerados e o intervalo analisado é de 10 horas diárias. O intervalo deve considerar a utilização do ambiente estudado, os horários da disponibilidade de luz natural para a região e também a proporção entre os turnos (manhã e tarde, por exemplo). No caso dos trópicos o horário das 7h às 17h é considerado adequado. É ainda necessário escolher o(s) tipo(s) de céu a ser(em) estudado(s) e também determinar a malha de pontos apropriada consultando normativos, tal como a norma americana LM-83-12 (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012). É uma métrica adequada para estudos comparativos. A EMA vem sendo utilizada em trabalhos como Vasconcellos e Cabús (2021), Kontadakis *et al.* (2020), Ribeiro e Cabús (2019) e Ahmad e Reffat (2018).

2.5.2 Autonomia de Luz Natural (ALN)

A Autonomia de Luz Natural (ALN) ou *Daylight Autonomy* (DA) foi a primeira métrica dinâmica criada e, portanto, considerada então inovadora por ter como base

as informações climáticas anuais da localização geográfica escolhida. Ela é considerada a métrica anualizada mais simples, mas também a mais utilizada (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2011). A ALN foi conceituada por Reinhart e Walkenhorst (2001) como a fração de um intervalo de tempo definido durante o qual um nível mínimo de iluminância pode ser mantido apenas pela luz natural. Em outras palavras, refere-se ao período em que um determinado ambiente atende a um requisito de iluminação sem a necessidade de suplementação por iluminação artificial. É expressa em porcentagem. Os autores explicam ainda que normalmente o intervalo analisado corresponde à quantidade de horas que um local de trabalho é ocupado. Já os níveis mínimos de iluminância, ou iluminância-alvo, variam entre diferentes autores e normativos, mas também podem ser definidos de acordo com a experiência e necessidade do projetista. A *Illuminating Engineering Society* (IES) recomenda uma iluminância-alvo de 500 lx no plano de trabalho para tarefas de leitura, por exemplo (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2011).

Um ponto a ser considerado é que, por não prever um limite máximo de iluminância, apenas contabilizar o tempo de autonomia do ambiente, essa métrica não é capaz de identificar situações nas quais os níveis de iluminância sejam excessivos e causem algum tipo de desconforto visual, como o ofuscamento. Desta maneira, é recomendado que ao realizar a avaliação de um ambiente, mais de uma métrica seja calculada de maneira que os resultados e as análises sejam complementares.

2.5.3 Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe)

A Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe) ou *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) é uma métrica complementar ao ALN e refere-se ao percentual de área do plano de trabalho que atinge ou ultrapassa um valor mínimo de iluminância estipulado durante um determinado percentual de horas de utilização do ambiente analisado ao longo do ano (INMETRO, 2021, anexo).

A norma americana LM-83-12 (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012) recomenda que a porcentagem mínima considerada para os cálculos seja de 50% das horas utilizadas e que o valor de iluminância mínimo seja de 300 lx. O normativo propõe ainda duas classificações: favorável ou preferível – para 75% ou mais de área, e neutro ou aceitável – quando a área for maior que 55%.

O intervalo de tempo recomendado para os cálculos é de 10 horas/dia, para todos os dias do ano, totalizando 3.650 horas de análise.

2.5.4 Uniformidade Média Anual (UMA)

A uniformidade é a razão entre o valor mínimo de iluminância e a média das iluminâncias do plano de trabalho estudado (ABNT, 2013a). Seu valor varia entre 0 e 1 (podendo também ser expresso em porcentagem), e quanto mais próximo de 1, maior a uniformidade. A uniformidade permite avaliar a diferença entre a luz disponível na área de trabalho e no entorno próximo, quanto menor essa diferença, mais uniformemente a luz estará distribuída. Sua versão anualizada é conhecida como Uniformidade Média Anual (UMA) e representa a média de todas as uniformidades calculadas ao longo de um ano para cada ponto estudado.

A uniformidade avalia a qualidade da distribuição da iluminação natural em um espaço. Um bom valor de uniformidade pode indicar a ausência de alto contraste, ou seja, grandes diferenças de brilho entre os pontos analisados, bem como ausência de regiões muito iluminadas ou muito escuras no mesmo ambiente. Dispositivos de sombreamento e obstruções podem ajudar a aumentar a uniformidade no interior dos ambientes. Por exemplo, a luz solar direta que adentraria um ambiente pode refletir primeiro em uma obstrução de refletância difusa e em seguida atingir o plano de trabalho de maneira mais “espalhada”, melhor distribuída.

Para a iluminação artificial valores entre 0,7 e 0,8 geralmente são recomendados (SLATER, BOYCE, 1990; BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1985; CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS, 1984). Para a luz natural, devido à sua grande variabilidade, a uniformidade é mais difícil de ser alcançada. Mangkuto, Rohmah e Asri (2016) utilizaram 0,2 como referência em um estudo para regiões tropicais.

2.6 A simulação computacional e suas barreiras

Com o surgimento das métricas dinâmicas, o uso da simulação computacional tornou-se indispensável para avaliações mais completas de disponibilidade da luz natural e do seu desempenho. Os programas de simulação permitem o desenvolvimento de estudos dos mais variados tipos, o que justifica a diversidade de

usuários, que inclui desde estudantes e professores de graduação e pós-graduação, consultores em grandes empresas, funcionários de órgãos responsáveis pela elaboração de normativas, até projetistas em escritórios de diversos tamanhos. No entanto, apesar da ampla gama de usuários, os programas de simulação de conforto ambiental e eficiência energética ainda não fazem parte da rotina dos escritórios de arquitetura. O uso dessas ferramentas está concentrado na academia (DELBIN, 2006) ou é feito por especialistas do setor de avaliação de desempenho (FREIRE; AMORIM, 2011; TSAGRASSOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015).

Para os projetistas, os programas podem ser muito úteis, pois, desde que as informações inseridas sejam coerentes, é possível, por exemplo, simular, ainda na fase de concepção, como será o comportamento da luz natural naquele objeto arquitetônico quando construído. Diversas opções de volumetria e dimensões de aberturas podem ser testadas para determinar a melhor solução que atenda aos objetivos específicos de cada situação. Claro que algumas simplificações precisam ser feitas, já que, por definição, a simulação computacional é uma representação simplificada da realidade (FREIRE; AMORIM, 2011). De maneira geral, no entanto, os resultados são satisfatórios e podem ter maior ou menor grau de precisão.

Apesar das diversas possibilidades de utilização e aplicação dos resultados, esses programas encontram diversas barreiras para utilização nos escritórios de arquitetura. Segundo Delbin (2006), os obstáculos estão divididos em três categorias principais: cultural, econômica e tecnológica, e elas se interrelacionam. A autora explica que no âmbito cultural as partes envolvidas no projeto não estão plenamente cientes das vantagens de utilizar a simulação. Outro obstáculo nessa categoria é que a maioria dos projetistas, arquitetos e engenheiros utiliza no cotidiano ferramentas de desenho, e não de modelagem e simulação, não estando, portanto, familiarizados com estas.

Seguindo a divisão proposta por Delbin (2006), a autora aponta os honorários dos serviços como uma barreira econômica e também cultural, já que o mercado é competitivo e as empresas buscam concluir seus projetos no menor tempo e com o menor custo possível. Os programas demandam tempo para aprendizado, modelagem, simulação e análise dos resultados. Mesmo que os resultados ajudem na tomada de decisões, permitindo encontrar melhores soluções projetuais, parte dos profissionais ainda não utilizam as ferramentas devido à falta de tempo. O tempo necessário para o processamento da simulação ou para qualquer outra etapa do

processo foi apontado como uma barreira em diversos estudos (LI *et al.*, 2023; PAULE; KAMPF; DUBOIS, 2015; TSAGRASSOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015; REINHART; WIENOLD, 2011). Dentro da dinâmica dos honorários pagos e dos prazos apertados nos escritórios, o tempo se torna um problema econômico.

A categoria tecnológica apresenta o maior número de barreiras, sendo uma delas, conforme apontado por Ribeiro (2019), a necessidade de critérios técnicos desde a etapa inicial, na escolha do programa a ser utilizado, já que a gama de programas disponíveis é ampla. Um ponto trazido por Reinhart e Wienold (2011) é que muitos desses programas apresentam interfaces gráficas que não são convidativas, o que torna o processo de aprendizagem longo e o uso não intuitivo. Freire e Amorim (2011) explicam que os projetistas apresentam resistência para utilização de ferramentas de avaliação, especialmente quando as variáveis são tratadas apenas por valores numéricos. Os autores também mencionam a dificuldade de modelagem como obstáculo, uma questão que combina aspectos técnicos e culturais. Como Delbin (2006) explica, essa dificuldade está relacionada ao cotidiano dos projetistas que, culturalmente, utilizam mais programas de desenho do que de modelagem.

Paule, Kampf e Dubois (2015) identificaram em sua pesquisa que, juntamente com o tempo demandado, a complexidade das ferramentas é uma das principais barreiras encontradas. É necessário um conhecimento especializado para manipular os programas e normalmente essa habilidade não é encontrada de imediato nos escritórios de arquitetura, o que leva à contratação de especialistas externos para realizar as avaliações (LI *et al.*, 2023; TSAGRASSOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015).

Além da escolha, aprendizado e utilização, as questões técnicas também estão presentes na etapa dos resultados. Ribeiro (2019) destaca que o volume de dados gerados por essas ferramentas é grande e, muitas vezes, não atende às necessidades dos usuários, que podem estar em busca de resultados específicos. A quantidade de informações oferecidas ao final do processamento exige do usuário um bom nível de conhecimento não só do assunto, mas também da ferramenta, para que seja possível extrair exatamente as informações úteis para cada situação. Reinhart e Wienold (2011) colocam a incapacidade de interpretar os resultados da simulação como obstáculo ao seu uso, o que corrobora com Ribeiro (2019) e pode indicar que as maneiras como os resultados são apresentados pelos programas poderiam ser mais claras. Delbin (2006) afirma que a apresentação dos resultados da avaliação é crucial para que a simulação

seja entendida, o usuário precisa compreender o que os resultados significam. Além disso, uma eficiente exibição dos resultados é fundamental também para facilitar a apresentação deles para terceiros.

Diante do exposto, é evidente que há espaço para melhorias na construção das ferramentas e em sua interação com os diferentes tipos de usuários em momentos variados de utilização. Itens como interfaces mais amigáveis, apresentação didática das variáveis com suas respectivas significâncias, não apenas a exibição de valores numéricos, e uma melhor organização e explicação dos dados de saída podem contribuir para uma experiência mais satisfatória. Essas melhorias podem aproximar mais os usuários existentes e estender o alcance dos programas para outros públicos.

Reinhart e Wienold (2011) apontam uma limitação que, caso resolvida, também pode atrair mais projetistas. Os autores explicam que as ferramentas não conseguem acomodar solicitações específicas. Por exemplo, não é possível para o usuário informar que nos resultados ele não deseja ofuscamento em determinado ambiente pela manhã, mas que pela tarde é aceitável no verão. Segundo eles, o objetivo não é que o *software* proponha soluções para os projetistas, mas permitir que metas sejam estipuladas para avaliações mais específicas dos resultados.

Diante das dificuldades apresentadas, fica evidente o distanciamento entre pesquisadores, desenvolvedores e escritórios de arquitetura, como indicado por Ribeiro (2019). Os projetistas ainda não estão suficientemente familiarizados com as ferramentas, que acabam sendo mais utilizadas no meio acadêmico ou por consultores especializados. A inclusão da simulação como método de avaliação em normativas, como a LM-83-12 (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, 2012) e a NBR 15575-1 (ABNT, 2021), é importante, pois incentiva uma parcela dos profissionais a ter algum contato com essa ferramenta, mesmo que seja por meio da contratação de especialistas. Esse contato inicial pode motivar os profissionais a explorar as opções de programas disponíveis e, gradualmente, a tornarem-se usuários dessas ferramentas para realizar suas próprias análises.

2.7 O *software* TropLux

Uma das opções disponíveis de *software* de simulação computacional para a luz natural e que foi utilizado para o desenvolvimento dessa dissertação é o TropLux, na versão 8 (CABÚS *et al.*, 2020), a mais atual disponível. O *software* é gratuito e foi

desenvolvido pelo professor Ricardo Carvalho Cabús durante sua pesquisa de doutorado (CABÚS, 2002) na Universidade de Sheffield, sob orientação do professor Peter Tregenza.

O TropLux foi validado (CABÚS, 2005) e continua sendo atualizado pelo Grupo de Pesquisa em Iluminação (GRILU) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) até o momento da elaboração deste trabalho. Desde sua criação diversos pesquisadores têm utilizado o *software*, entre outros trabalhos, em artigos (FARKAS, LARANJA, 2019; TOLEDO, PELEGRINI, 2013; RAMOS; GHISI, 2010), teses (MARTINS, 2022; RIBEIRO, 2020; LUZ, 2014) e dissertações (SANTOS, 2022; VASCONCELLOS, 2020; NETTO, 2015).

Os dados geométricos são inseridos no programa a partir das coordenadas dos pontos que formam os vértices, que por sua vez integram planos. A combinação dos planos criados compõe as geometrias desejadas, que podem ser tanto simples quanto complexas e as aberturas estão contidas nos planos. De maneira rápida é possível inserir elementos pré-configurados, sejam de proteção, como marquises, brises horizontais e verticais, como também obstruções externas. Depois das geometrias modeladas é permitido configurar as características dos materiais, por exemplo, determinar se uma superfície é especular ou difusa, quais suas refletâncias e transmitâncias.

Além de contemplar os 15 tipos de céu definidos pela CIE (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, 2002), o TropLux oferece a opção de céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (DDL). Nessa opção, o *software* utiliza bases de dados climáticos para selecionar o tipo de céu mais provável para os dias e horários analisados em um determinado local. Isso permite simular automaticamente a situação mais provável e extrair dados de um ano inteiro de forma mais eficiente. Por exemplo, em Maceió, o céu predominante é o parcialmente nublado, embora outros tipos, como céus nublados e claros, também ocorram (CABÚS, 2002). A opção DDL combina todos esses tipos de céu (de acordo com sua probabilidade de ocorrência) em uma única simulação, eliminando a necessidade de realizar simulações separadas para cada tipo de céu.

Outra opção interessante oferecida pelo TropLux é a divisão das iluminâncias a partir de suas fontes: Sol ou céu. Além disso, o *software* diferencia se a luz de cada fonte atinge a superfície estudada de maneira direta ou refletida a partir de outras superfícies. Com essa funcionalidade, é possível quantificar a contribuição de cada

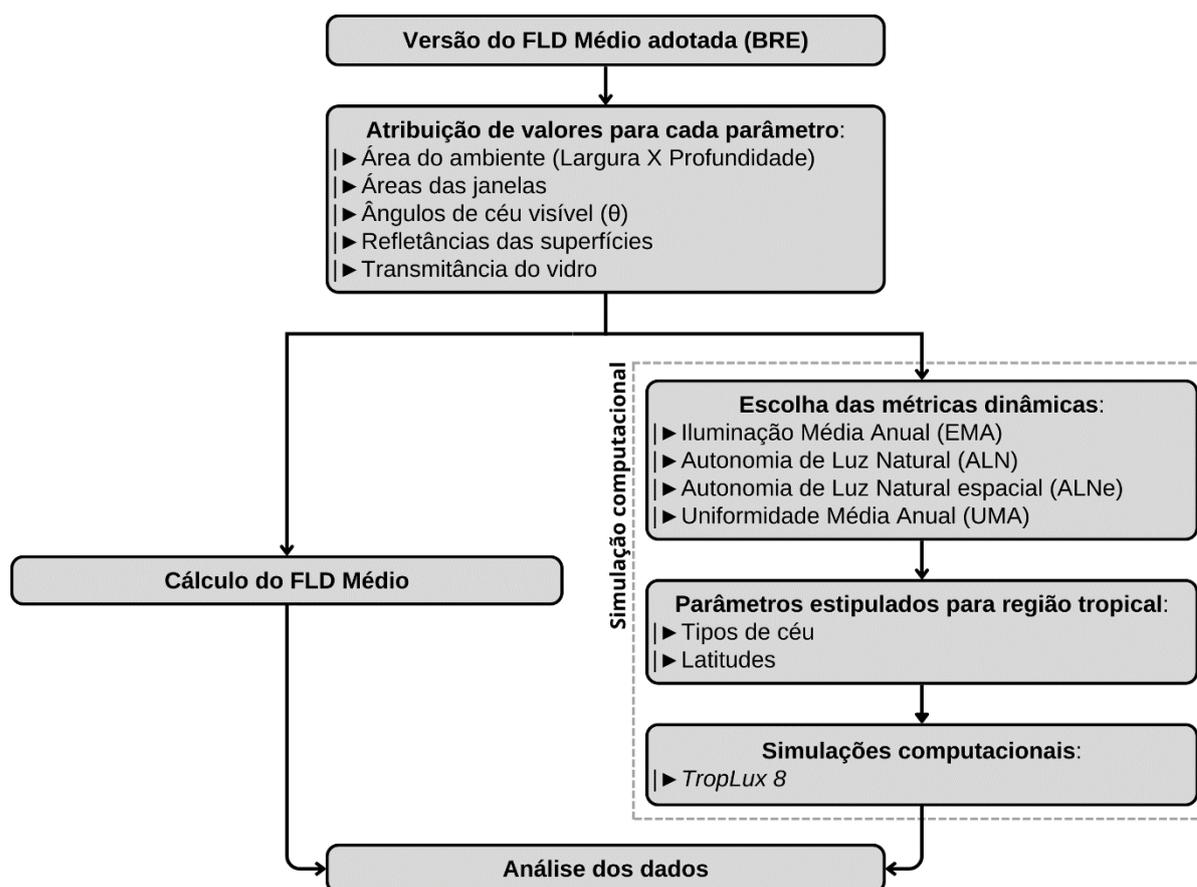
componente para a iluminância final, o que permite análises detalhadas da influência isolada de cada componente da luz.

3 METODOLOGIA

A partir de um mesmo modelo hipotético, este estudo utilizou uma metodologia baseada em análises comparativas entre os dados obtidos pelo cálculo do Fator de Luz do Dia Médio (\overline{FLD}) e os resultados das simulações computacionais.

A metodologia foi composta por sete etapas, conforme apresentado na Figura 5. De maneira resumida, partindo da versão do FLD Médio adotada neste trabalho, equação (5), foram atribuídos valores para seus parâmetros de maneira que fosse possível calcular essa métrica para as situações propostas (seção 3.1). Os mesmos parâmetros foram utilizados para a entrada de dados no *software* TropLux, acrescidos dos parâmetros necessários para os cálculos das métricas dinâmicas (etapas detalhadas nas seções 3.2 e 3.3). Após todos os parâmetros definidos, as simulações foram realizadas. Por fim, foram relacionados os dados obtidos pelo cálculo do \overline{FLD} com os dados provenientes das simulações e análises foram feitas.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia

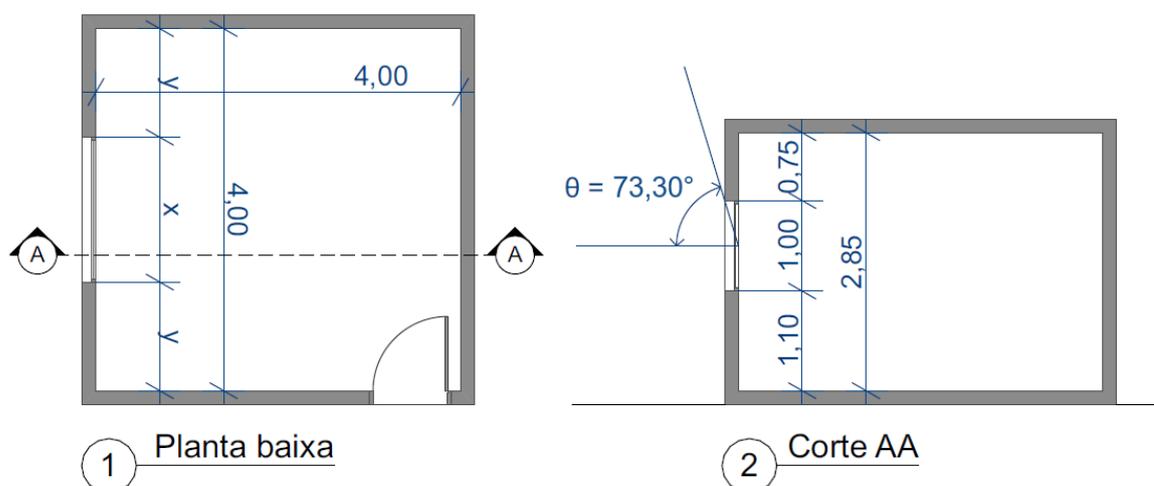


Fonte: A autora (2024).

3.1 Parâmetros do FLD Médio

Considerando a equação (5) apresentada no capítulo anterior, foram atribuídos valores para cada uma de suas variáveis. Inicialmente, foi necessário determinar quais seriam as dimensões do ambiente estudado, o que implica na área das superfícies internas (A_t). Para possibilitar as análises e compreensão da relação entre o \overline{FLD} e a iluminância, e também entre o \overline{FLD} e as métricas dinâmicas baseadas na iluminância, um ambiente hipotético foi determinado. Trata-se de uma sala térrea com dimensões 4,00 m de largura (L) x 4,00 m de profundidade (P) e com pé-direito de 2,85 m, mostrada na Figura 6.

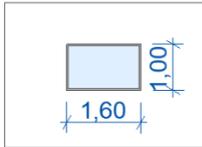
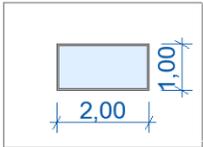
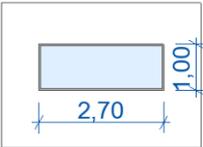
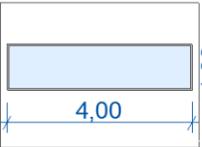
Figura 6 – Planta baixa e corte da sala sem obstrução



Fonte: A autora (2024).

As áreas das aberturas (A_j) foram definidas com base nas proporções entre a área da janela e a área do piso, conhecidas em inglês como *Window to Floor Ratio* (WFR). As proporções utilizadas foram: 1/10, 1/8, 1/6 — valores encontrados nos códigos de obras das capitais brasileiras conforme a seção 2.2.1 do capítulo anterior — e 1/4, para análise de uma situação mais favorável. Todas as janelas estão centralizadas na parede, com peitoril a 1,10 m e altura de 1,00 m, a largura foi ajustada em cada caso para alcançar a área desejada, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Proporções e janelas utilizadas

Sala (m ²) (L x P)	Área de janela/área de piso			
	1/10	1/8	1/6	1/4
16,0 (4,0 x 4,0)				

Fonte: A autora (2024).

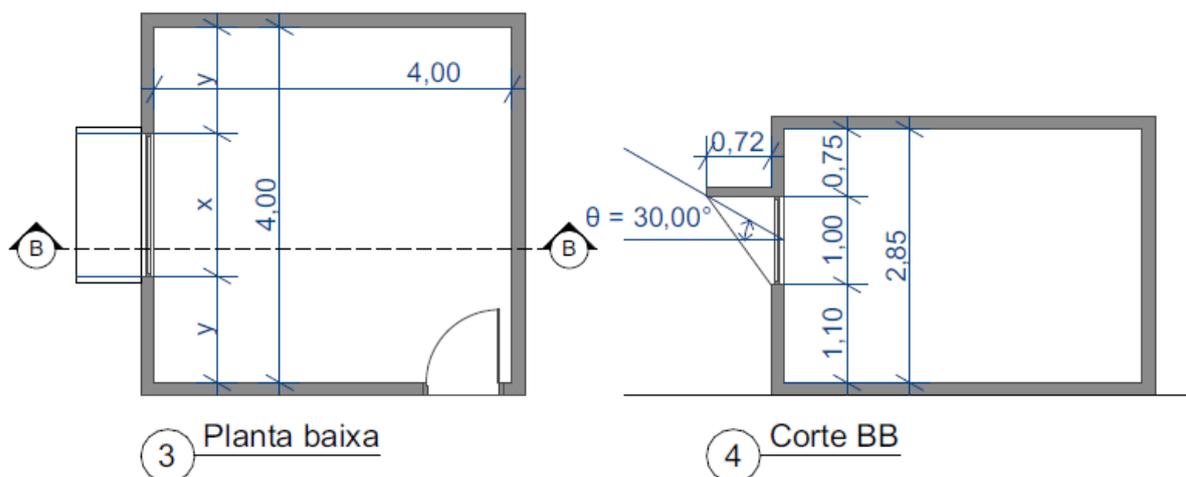
A situação proposta inicialmente representa salas sem nenhum tipo de proteção solar e sem obstruções externas, de maneira que a luz natural consegue adentrar facilmente. Para este caso, o ângulo de céu visível da janela (θ) tem descontado apenas a espessura da parede, que barra uma pequena parcela da luz. Esse desconto resulta em um ângulo de céu visível (θ) de $73,30^\circ$, situação apresentada no Corte AA da Figura 6.

Uma edificação que não possui nenhum tipo de obstrução retrata apenas uma parte das situações urbanas. Portanto, para tornar o estudo mais representativo, mais duas situações foram propostas, acrescentando obstruções na sala anteriormente apresentada e mantendo as proporções utilizadas para as áreas das janelas. As obstruções adicionadas foram um dispositivo de proteção solar do tipo marquise e um muro frontal. A marquise foi escolhida pois é uma proteção horizontal que pode ser muito eficiente em termos de proteção da luz solar direta nas regiões tropicais. Porém, geometricamente outros elementos poderiam ter impactos semelhantes a ela, como um beiral, por exemplo. As obstruções influenciam nos resultados do \overline{FLD} apenas através do ângulo de céu visível, θ , a sua interferência espacial na iluminância dentro da sala foi considerada nas simulações computacionais. Apesar das obstruções adotadas serem diferentes, ambas foram dimensionadas para proporcionar o mesmo ângulo de céu visível, $\theta = 30,00^\circ$, como mostram as Figura 8 e Figura 10.

A marquise, apresentada na Figura 8, está localizada rente ao topo da janela, tem profundidade de 0,72 m (consequência geométrica do θ adotado) e tem largura igual à da janela que protege em todas as situações. Apresenta ainda abas laterais anguladas com o objetivo de simular uma marquise infinita (FROTA, 2004), como mostrado na perspectiva da Figura 9. Desta maneira, a proteção solar fornecida é equivalente em todas as situações, evitando que as proporções de janelas

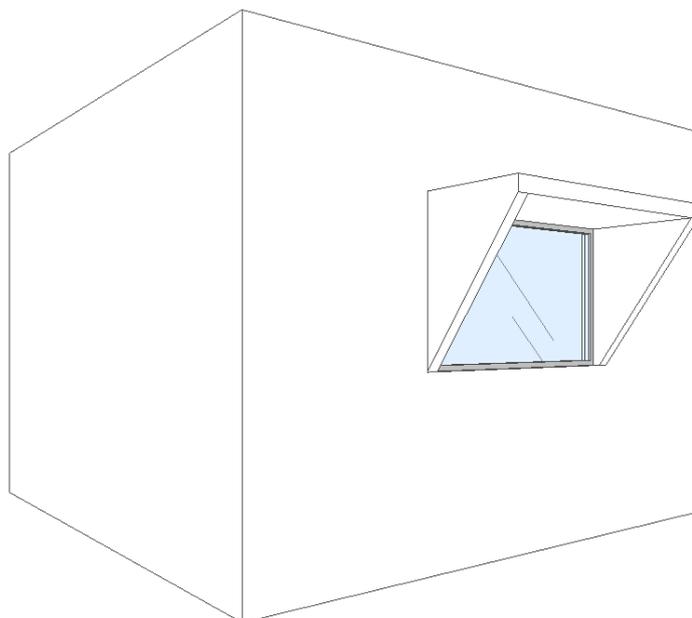
consideradas possam possuir diferentes ângulos verticais laterais.

Figura 8 – Planta baixa e corte da sala com marquise infinita



Fonte: A autora (2024).

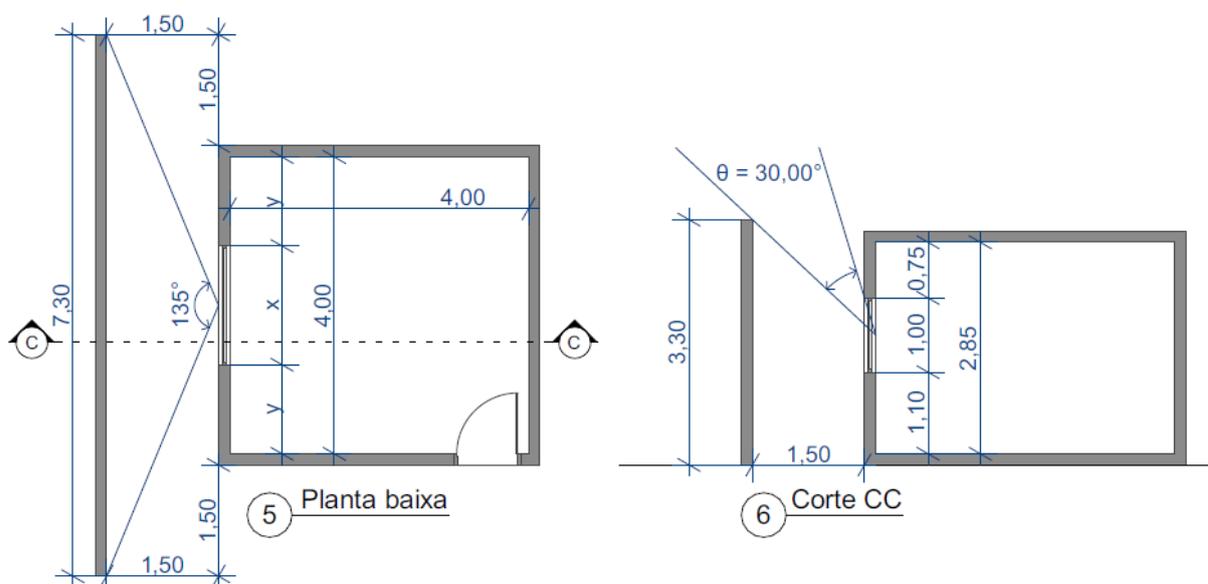
Figura 9 – Perspectiva da sala com marquise infinita



Fonte: A autora (2024).

A Figura 10 ilustra a situação na qual o muro frontal atua como obstrução. O muro está a 1,50 m de distância da edificação, conforme o recuo comumente exigido pelos códigos de obras entre paredes com aberturas e muros externos. Ele também se prolonga 1,50 m para cada lado da edificação, totalizando 7,30 m de comprimento e possui 3,30 m de altura, consequência geométrica do ângulo θ adotado.

Figura 10 – Planta baixa e corte da sala com muro frontal



Fonte: A autora (2024).

A transmitância (τ) adotada para os vidros de todas as janelas foi de 0,88, valor correspondente ao vidro transparente comum com 6 mm de espessura (AHMAD; AHMAD; TALIB, 2012; ARAÚJO, 2012).

As superfícies internas do ambiente estudado (A_t), já que o ambiente é considerado vazio como explicado no capítulo anterior, são as paredes, o teto e o piso. As paredes foram consideradas pintadas de branco, com tinta do tipo látex PVA fosca do fabricante Suvinil, na cor Branco Gelo, que possui refletância (R) de 0,715 (DORNELLES, 2008). A cor Branco Neve, do mesmo fabricante, foi estipulada para o teto, mas no acabamento tipo acrílico fosco, que possui refletância de 0,900 (DORNELLES, 2008). Para o piso foi adotada a refletância de 0,300 (ARAÚJO; CABÚS, 2007).

Todas as definições referentes ao \overline{FLD} estão resumidas na Tabela 2 apresentada a seguir:

Tabela 2 – Definições utilizadas para o FLD Médio

Parâmetros		Valores atribuídos
Aberturas		Peitoril: 1,10 m Altura: 1,00 m
Área das janelas (A_j) – WFR		1/10, 1/8, 1,6 e 1/4
Ângulos de céu visível (θ)		73,30° 30,00°
Transmitância (τ)		0,88
Refletâncias (R)		Paredes: 0,715 Teto: 0,900 Piso: 0,300
L x P da sala	(A_t)	4,00 m x 4,00 m
Pé-direito		2,85 m

Fonte: A autora (2024).

3.2 Métricas dinâmicas adotadas

As métricas dinâmicas adotadas para esse trabalho foram a Iluminância Média Anual (EMA), Autonomia de Luz Natural (ALN) e a sua variação, Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe), e Uniformidade Média Anual (UMA). As métricas dinâmicas foram escolhidas por fornecerem análises mais precisas e completas, conforme descrito na seção 2.5, em contraste com o Fator de Luz do Dia Médio (\overline{FLD}), uma métrica simplificada mais indicada para as etapas iniciais de projeto, conforme explicado na seção 2.4.3. O objetivo de estudar simultaneamente o \overline{FLD} e as métricas dinâmicas foi analisar as relações entre todas as métricas e seus respectivos comportamentos. Para cada situação proposta foram calculados os valores de \overline{FLD} e simuladas as métricas EMA, ALN, ALNe e UMA, permitindo análises e comparações.

3.3 Parâmetros das métricas dinâmicas

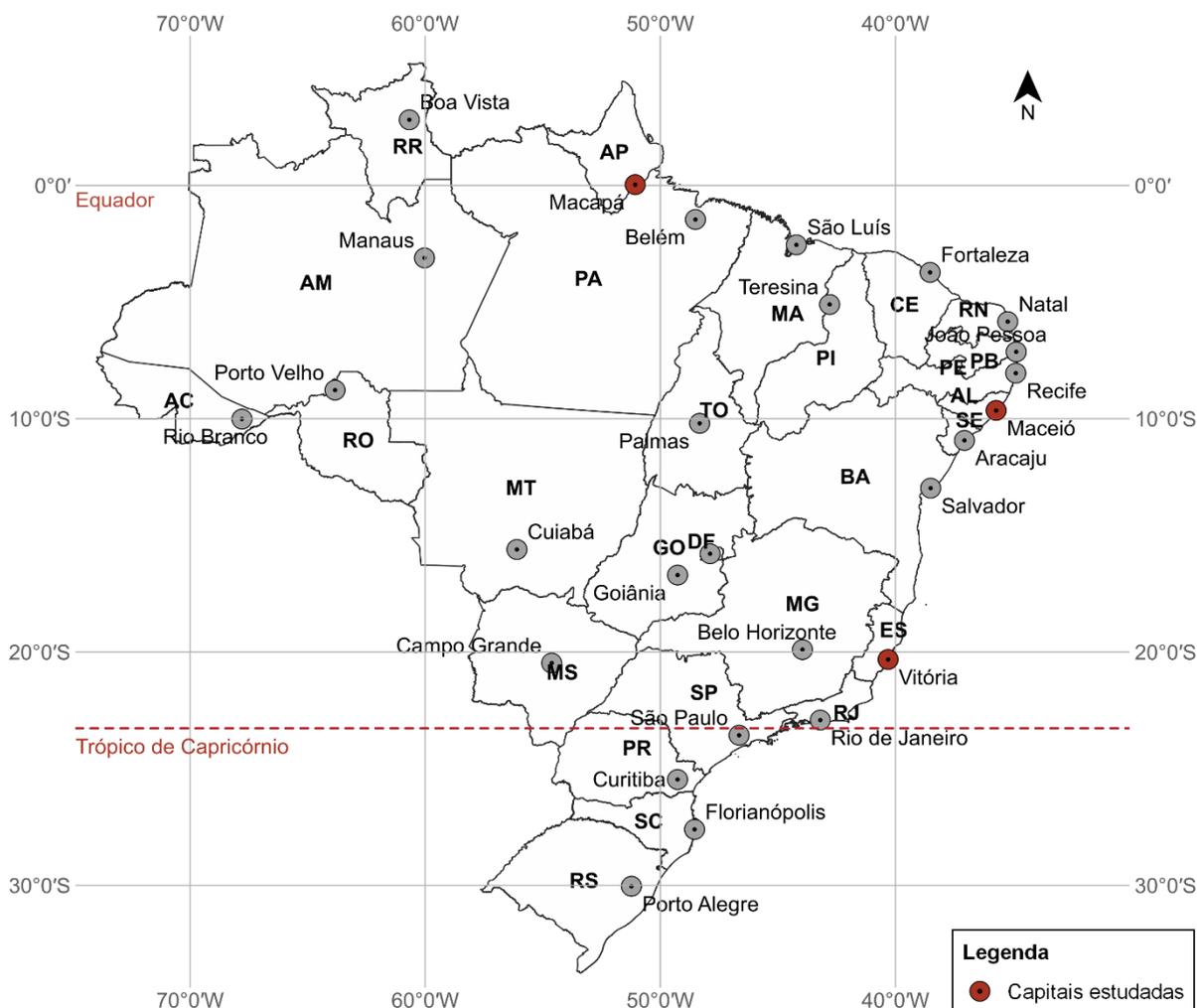
Os valores atribuídos aos parâmetros para o cálculo do \overline{FLD} também foram utilizados como base para as simulações computacionais das métricas dinâmicas. Como as simulações dependem de dados climáticos, é necessário definir o(s) local(is) de estudo para acessar os dados requeridos aos cálculos. Além da localização, outras informações, como o tipo de céu e o intervalo temporal desejado para o estudo, são essenciais.

A incidência da radiação solar não é uniforme em todo o planeta Terra, sendo

maior na região central, entre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio, conhecida como Zona Tropical. Mesmo dentro da região tropical, a incidência varia com a latitude, diminuindo à medida que se afasta da linha do Equador. Porém, estar na mesma latitude não implica que o clima seja necessariamente o mesmo, nem também, por consequência, a iluminância medida em um ponto ou plano, já que, além da latitude, a nebulosidade também é um fator determinante para a disponibilidade da luz natural de cada localidade. Por exemplo, a radiação solar pode ser aproximadamente a mesma para duas cidades, mas se em uma o céu predominante for claro, e na outra for encoberto, a Iluminância Média Anual que atinge as superfícies no nível abaixo das nuvens, como em um plano de trabalho, será menor na cidade que apresenta o céu encoberto com mais frequência, considerando apenas esse parâmetro.

Para este trabalho apenas a parte da zona tropical localizada no Brasil foi explorada e três cidades foram escolhidas. As cidades foram selecionadas de maneira que a distância entre elas fosse aproximadamente equidistante em termos de latitude, então há um intervalo aproximado de 10 graus entre elas, como mostrado na Figura 11. As cidades estudadas foram: Macapá, capital do estado do Amapá, com coordenadas: latitude: $0^{\circ} 2' N$, longitude: $51^{\circ} 4' O$; Maceió, capital do estado de Alagoas, cujas coordenadas geográficas são: latitude $9^{\circ} 40' S$, longitude $35^{\circ} 44' O$ e Vitória, capital do Espírito Santo, com coordenadas: latitude: $20^{\circ} 19' S$, longitude: $40^{\circ} 20' O$. Também foram considerados climas mais similares entre as cidades, o que minimiza a interferência desse fator e pode evidenciar a diferença pela latitude. Isso justifica, por exemplo, a escolha de Vitória – ES para a latitude de $20^{\circ} S$, já que a cidade tem clima tropical Atlântico, assim como Maceió, em vez de Belo Horizonte – MG, que possui clima tropical de altitude.

Figura 11 – Capitais escolhidas com base nas latitudes



Fonte: A autora (2024).

Outro parâmetro muito relevante para o estudo é o tipo de céu utilizado nas análises. Para o cálculo do \overline{FLD} o céu é considerado sempre encoberto, como explicado no capítulo anterior. No entanto, essa não é a situação mais comum nas regiões tropicais. Uma das premissas para estudar a viabilidade do dimensionamento de aberturas nessas regiões a partir do \overline{FLD} é justamente verificar se a métrica é aplicável a outros tipos de céu, especialmente os mais frequentes nas áreas de estudo. Foram analisados então quatro tipos de céu: três deles são tipos padrão da CIE (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, 2002), céu tipo 1 – céu encoberto, céu tipo 10 – parcialmente nublado e céu tipo 14 – céu claro. Além desses, foi estudado também o céu com Distribuição Dinâmica de Luminâncias (DDL). Segundo Ribeiro (2020), o céu DDL é determinado pela escolha do tipo de céu da

CIE (2002) mais provável para os dias e horas simulados, essa determinação é feita automaticamente pelo *software* TropLux baseada nos dados climáticos disponíveis. Dessa maneira, o céu tipo DDL leva em consideração a nebulosidade de cada localidade.

Por fim, os demais parâmetros necessários como dados de entrada para o TropLux foram determinados. O plano de trabalho adotado tem a mesma altura em todas as análises, 0,75 m a partir do piso. Quanto ao intervalo temporal foram analisadas 10 horas por dia, das 7 h às 17 h, no meio do intervalo de cada hora e no tempo solar, durante todos os dias do ano. A malha de pontos foi determinada de acordo com a IES LM-83-12 (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012), sendo de 7 x 7 para a sala adotada. Por fim, o erro da componente difusa adotado no processamento foi de 5 %. As configurações foram resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos dados de entrada para o TropLux

Parâmetros	Dados
Refletância das obstruções	0,400
Altura do plano de trabalho	0,75 m
Localização geográfica	Macapá/AP: 0° 2' N / 51° 4' O Maceió/AL: 9° 40' S / 35° 42' O Vitória/ES: 20° 19' S / 40° 20' O
Intervalo temporal	10 h/dia, 7 h às 17 h, 365 dias/ano
Malha de pontos	7x7
Tipos de céu	CIE 1, CIE 10, CIE 14 e DDL

Fonte: A autora (2024).

3.4 Cálculo do FLD Médio e simulações computacionais

Com todos os valores atribuídos nas etapas anteriores, foram calculados os valores do \overline{FLD} para cada situação proposta através de planilhas configuradas no *software* Excel, bem como foram realizadas as simulações computacionais no *software* TropLux. Os resultados estão apresentados na seção a seguir.

4 RESULTADOS

Para que a análise dos resultados fosse possível, primeiramente foram elaborados gráficos de dispersão utilizando o *software* Excel, que permitiram relacionar os valores de \overline{FLD} obtidos a partir da equação (5) com os valores da Iluminância Média Anual (EMA), Autonomia da Luz Natural (ALN), Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe) e Uniformidade Média Anual (UMA), obtidos por meio das simulações computacionais. O memorial do cálculo para \overline{FLD} está disponível no apêndice A, e o modelo exemplificativo da base dos dados utilizados para a elaboração dos gráficos comparativos do \overline{FLD} com as métricas dinâmicas está disponível no apêndice B. Posteriormente, os dados contidos em cada gráfico de dispersão foram selecionados e linhas de tendências foram adicionadas, obtidas por meio de regressão linear, ainda utilizando o *software* Excel, o que permitiu analisar as correlações entre o \overline{FLD} e as demais métricas. O coeficiente de determinação (R^2), também foi extraído para cada situação, esse valor pode variar entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1 indica que a variabilidade dos dados analisados é melhor explicada pelo modelo de regressão.

Os símbolos utilizados estão relacionados à proporção entre a área da janela e a área de piso (conforme legenda presente em todos os gráficos apresentados), os quadrados representam a proporção 1/4, os losangos referem-se à proporção de 1/6, os círculos correspondem à proporção 1/8 e os triângulos à proporção 1/10. As cores indicam as diferentes obstruções: os ambientes sem obstrução são representados pela cor azul, os ambientes com marquise são identificados pela cor verde e os ambientes com muro frontal são mostrados na cor vinho.

4.1 Iluminância Média Anual (EMA)

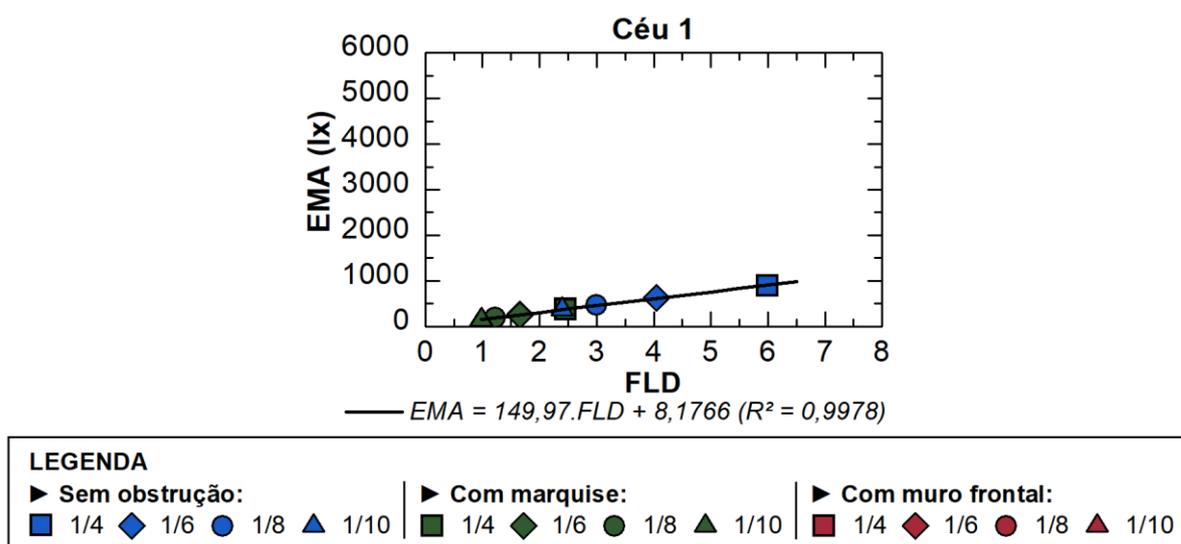
Para o céu do céu tipo 1, encoberto, como não há incidência de luz solar direta, não ocorre variação entre as diferentes orientações. Por isso, os gráficos da EMA para esse tipo de céu são idênticos, independentemente da orientação considerada. Assim, o gráfico mostrado na Figura 12, que utiliza dados da cidade de Maceió (AL), representa todas as orientações.

Observou-se que, para esse tipo de céu, a interferência das obstruções, tanto da marquise quanto do muro frontal, nos valores da EMA foi bastante similar. Os

valores simulados para ambos os tipos de obstrução foram muito próximos, resultando na sobreposição dos pontos no gráfico.

O comportamento da relação entre o \overline{FLD} e a EMA para o céu tipo 1 da CIE (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, 2002) resulta em uma equação linear (representada nos gráficos pela linha contínua preta) e a correlação entre as duas métricas é muito forte, apresentando coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9978, valor muito próximo de 1.

Figura 12 – EMA (Céu 1): Norte, Leste, Sul e Oeste (Maceió-AL)



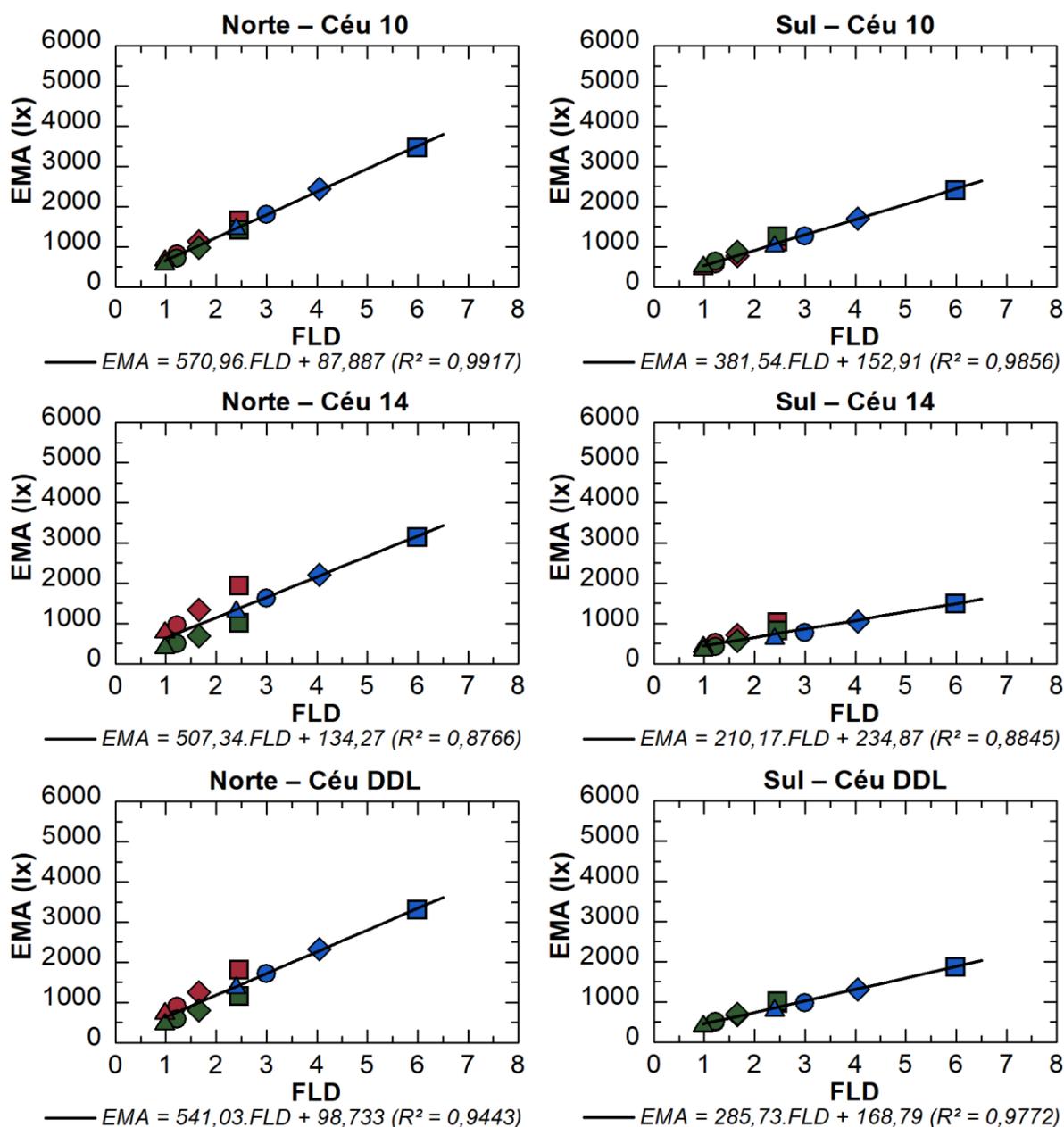
Fonte: A autora (2024).

Um resultado que se repete em todos os tipos de céu e orientações, como é possível observar em todos os gráficos apresentados a seguir, é que quanto maior a abertura, maior o valor do \overline{FLD} . Isso ocorre porque há uma relação direta entre a área das janelas e o \overline{FLD} . Além disso, uma maior abertura permite a entrada de mais luz, aumentando também a iluminância e, conseqüentemente, a EMA.

A seguir são apresentados na Figura 13 os resultados da EMA dos céus tipo 10, 14 e DDL para as orientações Norte e Sul, e na Figura 14 os mesmos céus para as orientações Leste e Oeste, todos referentes à cidade de Maceió-AL. Quando traçada a linha de tendência em todas as situações que relacionam o \overline{FLD} e a EMA, é possível observar que existe uma correlação e que ela é forte, com o coeficiente de determinação (R^2) muito próximo de 1 em diversos casos, principalmente para o Leste e Oeste. O menor valor encontrado de R^2 para a EMA na cidade de Maceió foi de 0,8766 para o céu 14 (céu claro) na orientação Norte, ou seja, os modelos lineares

encontrados explicam, no mínimo, 87,66% da variabilidade dos valores observados. O R^2 menor nessa situação pode ser explicado pela diferença que ocorreu entre os valores da EMA nas situações com a marquise e o muro frontal, fazendo com que os pontos se distanciassem da reta, diminuindo o coeficiente de determinação. Os resultados podem indicar a viabilidade de utilizar equações baseadas no \overline{FLD} para estimar valores de EMA através de equações do tipo linear.

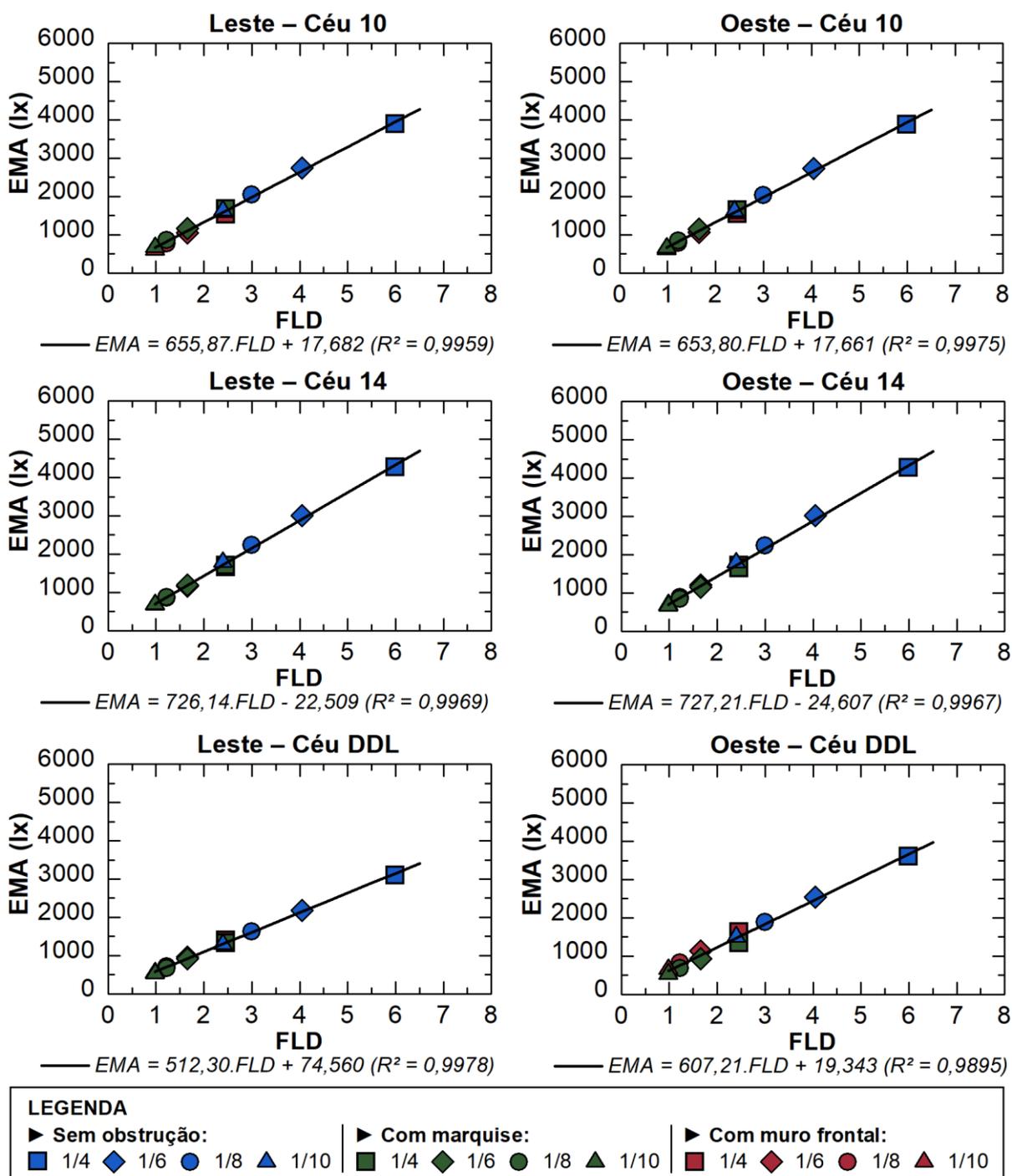
Figura 13 – EMA (Céus 10, 14 e DDL): Norte e Sul (Maceió-AL)



SEM OBSTACULO			COM MARQUISE			COM MURO FRONTAL		
▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶
■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4
◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6
● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8
▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10	■ 1/4	◆ 1/6	● 1/8	▲ 1/10

Fonte: A autora (2024).

Figura 14 – EMA (Céus 10, 14 e DDL): Leste e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

O comportamento é semelhante em todas as orientações para as demais capitais estudadas, com maiores valores de EMA encontrados nas orientações Leste e Oeste, o que pode ser explicado pela geometria solar, ângulos mais baixos de incidência e mais luz solar direta, aumentando a iluminância nessas orientações. O Sul e o Norte apresentam valores menores pelas maiores alturas solares, que

implicam em menos luz atingindo o ambiente interno.

De modo geral, para os céus tipo 10, 14 e DDL, que incluem as componentes solares (direta e refletida), há uma maior variação das iluminâncias entre as diferentes orientações dependendo do tipo de obstrução, diferentemente do que ocorreu no céu tipo 1. Para as orientações Norte e Sul, que recebem a luz do Sol mais lateralizada, a marquise infinita protege parte da luz solar (principalmente no Sul, onde sua eficiência é maior) e, conseqüentemente, as iluminâncias são menores com esse dispositivo do que com a obstrução do tipo muro. O muro frontal apresenta menor influência nessas orientações para barrar a luz direta, portanto, os ambientes com esse tipo de obstrução apresentaram, no geral, maiores iluminâncias do que aqueles protegidos por marquise. Porém, ambas as obstruções reduzem consideravelmente as iluminâncias em comparação com a situação sem obstrução.

Para um mesmo valor de \overline{FLD} , os valores de EMA são muito semelhantes nas orientações Leste e Oeste. Para o Norte, com o mesmo valor de \overline{FLD} do Leste e Oeste, a iluminância simulada diminuiu consideravelmente, e a redução é ainda maior na orientação Sul. Essa variação sugere que o \overline{FLD} pode ter diferentes valores de referência conforme a orientação, com valores menores para as orientações que apresentam maiores iluminâncias (Leste e Oeste) e valores maiores para aquelas com menores iluminâncias (Norte e Sul). As correlações mostraram-se satisfatórias em todas as orientações, mas ainda melhores para o Leste e Oeste. Caso um único valor seja adotado, ele terá que atender a pior situação de acordo com o valor de referência de iluminância-alvo adotado, o que pode implicar em um superdimensionamento para as janelas orientadas a Leste e Oeste.

Os valores de iluminância obtidos para as três capitais estudadas foram coerentes entre si nos céus tipo 1, 10 e 14, diminuindo, em geral, à medida que a cidade se afasta da linha do Equador. Uma exceção a esse comportamento foi observada na orientação Norte em Vitória-ES, cujos valores da EMA foram superiores aos de Maceió-AL que, por sua vez, apresentou valores superiores aos de Macapá-AP. Esse comportamento pode ser explicado pela trajetória aparente do Sol, que se modifica gradualmente de acordo com a latitude. À medida que a latitude aumenta, a porção Norte da carta solar se expande e essa orientação recebe mais horas de exposição solar. Por outro lado, as aberturas voltadas para o Sul estão dentro do comportamento esperado, com uma redução gradativa nas iluminâncias à medida que as cidades se afastam do Equador, devido à menor disponibilidade de luz natural. No

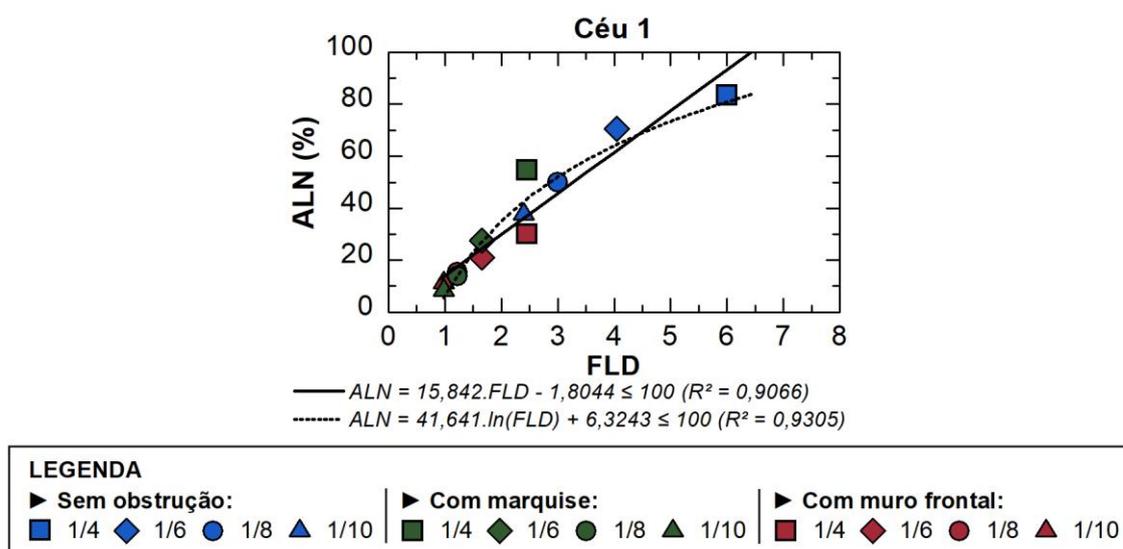
entanto, no céu tipo DDL, esse padrão nem sempre se repete, pois a nebulosidade de cada cidade é considerada, e a presença de nuvens altera significativamente as iluminâncias ao longo dos dias. Esse céu é o que mais se aproxima das situações reais sendo, portanto, o mais relevante para o estudo, e é importante destacar os elevados valores de R^2 obtidos para ele.

Como os gráficos são semelhantes, já que o comportamento observado em Maceió-AL se repete nas demais cidades, os gráficos referentes às cidades de Macapá-AP e Vitória-ES estão apresentados nos apêndices C e D, respectivamente.

4.2 Autonomia de Luz Natural (ALN)

Para a ALN, assim como na EMA, o gráfico do céu encoberto (tipo 1) é o mesmo para todas as orientações. Não há luz solar direta nesse tipo de céu, a luz é difusa e está distribuída de maneira uniforme, resultando em um mesmo padrão para todas as orientações. A Figura 15 apresenta os dados da cidade de Maceió-AL. A iluminância-alvo inicialmente utilizada para as simulações foi de 300 lx (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012).

Figura 15 – ALN (Céu 1): Norte, Leste, Sul e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

Para esse tipo de céu, a situação sem obstrução, considerada a mais favorável entre as estudadas, apresentou valores de autonomia luminosa em torno de 50% para janelas com 1/8 da área do piso, uma proporção frequentemente recomendada (conforme seção 2.2.1). Esse comportamento se repetiu em todas as capitais

analisadas. Com a presença das obstruções, as autonomias variaram entre menos de 10% (para janelas com 1/10 de área do piso) até, no máximo, valores próximos de 60% com as maiores janelas (1/4 da área do piso). De modo geral, os resultados demonstram baixas autonomias, principalmente quando há obstruções externas. A situação com muro frontal apresentou os piores resultados, apesar do mesmo ângulo de céu visível e de valores de EMA quase idênticos aos da situação com marquise (Figura 12), evidenciando a significativa influência do tipo de obstrução sobre a ALN.

Era esperado que, à medida que as aberturas aumentassem, maiores fossem também os valores do \overline{FLD} e da ALN. Esse comportamento se confirmou, como é possível observar tanto na Figura 16, que exibe os dados das orientações Norte e Sul, quanto na Figura 17, que apresenta as orientações o Leste e Oeste.

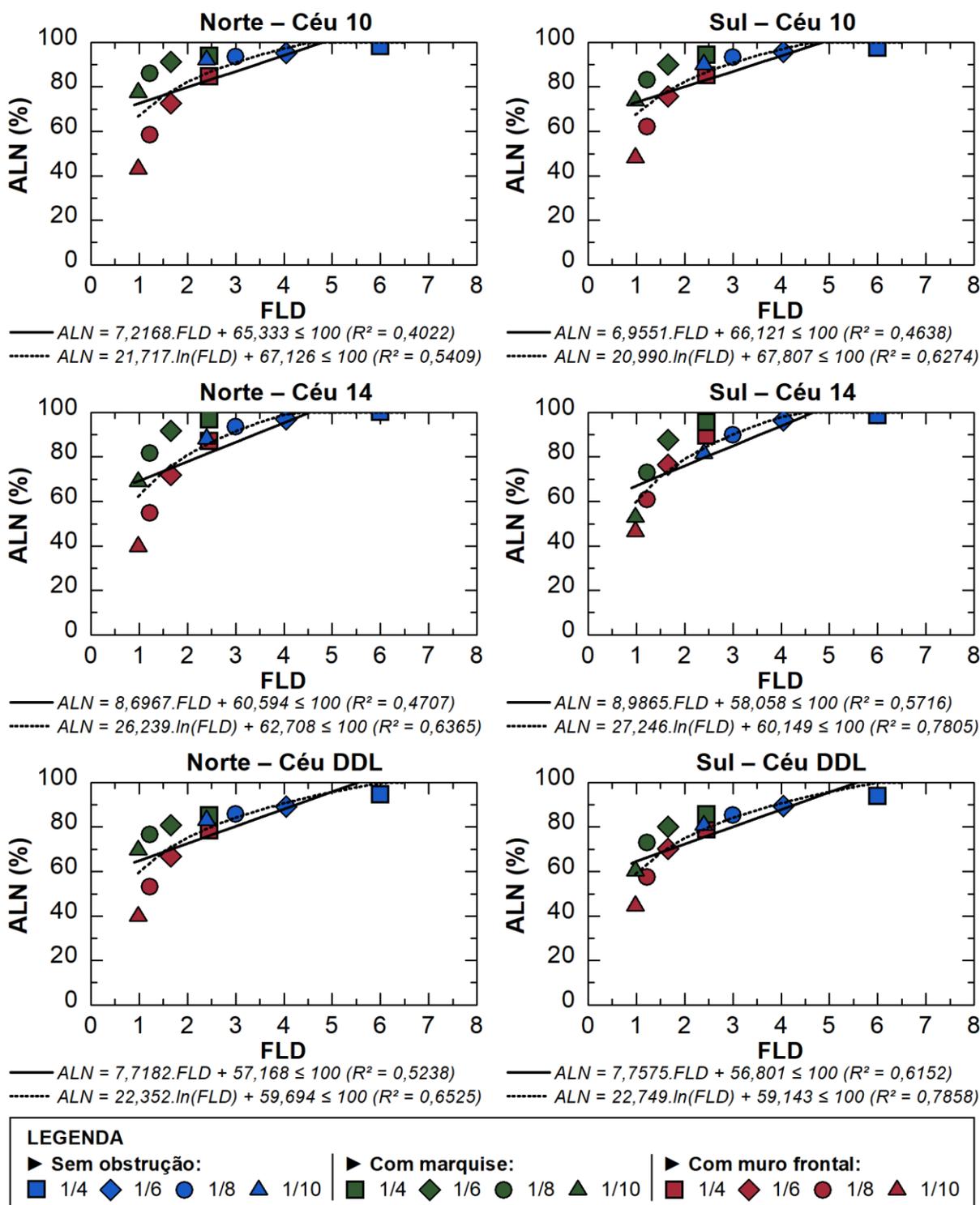
Assim como ocorreu com a EMA, foi possível estabelecer uma relação entre as métricas. No entanto, a equação que obteve o melhor ajuste e, conseqüentemente, maiores valores de R^2 para relacionar o \overline{FLD} com a ALN, não foi do tipo linear mas, logarítmica. Embora as equações logarítmicas (representadas nos gráficos pelas linhas tracejadas pretas) tenham proporcionado melhores ajustes, as equações lineares (representadas pelas linhas contínuas pretas) também podem ser adotadas, pois seu cálculo é mais simples, o que pode torná-las mais atrativas aos profissionais.

Para encontrar a equação que melhor explica a relação entre o \overline{FLD} e a ALN foram consideradas simultaneamente as três situações: sem obstrução, com marquise e com muro frontal. Essa escolha foi intencional, visando encontrar uma relação que abrangesse todos os cenários de forma aproximada. Caso fosse necessário recomendar um valor de \overline{FLD} , seria preferível indicar um valor único que se adequasse aos três casos, já que seria inviável adotar diferentes valores para cada situação específica (considerando que, embora neste estudo sejam três casos, na prática podem ser dezenas ou mais).

Pelas linhas de tendência é possível observar que as equações apresentadas para a ALN não conseguem explicar tão bem as variações quanto às equações encontradas para a EMA, já que foram obtidos menores valores de R^2 (entre 0,3523 e 0,7858 para a cidade de Maceió). Nota-se graficamente que um valor de \overline{FLD} recomendado a partir das equações propostas estaria, por exemplo, superdimensionado para a situação do muro frontal e subdimensionado para a situação da marquise. Os valores correspondentes às situações com obstruções são

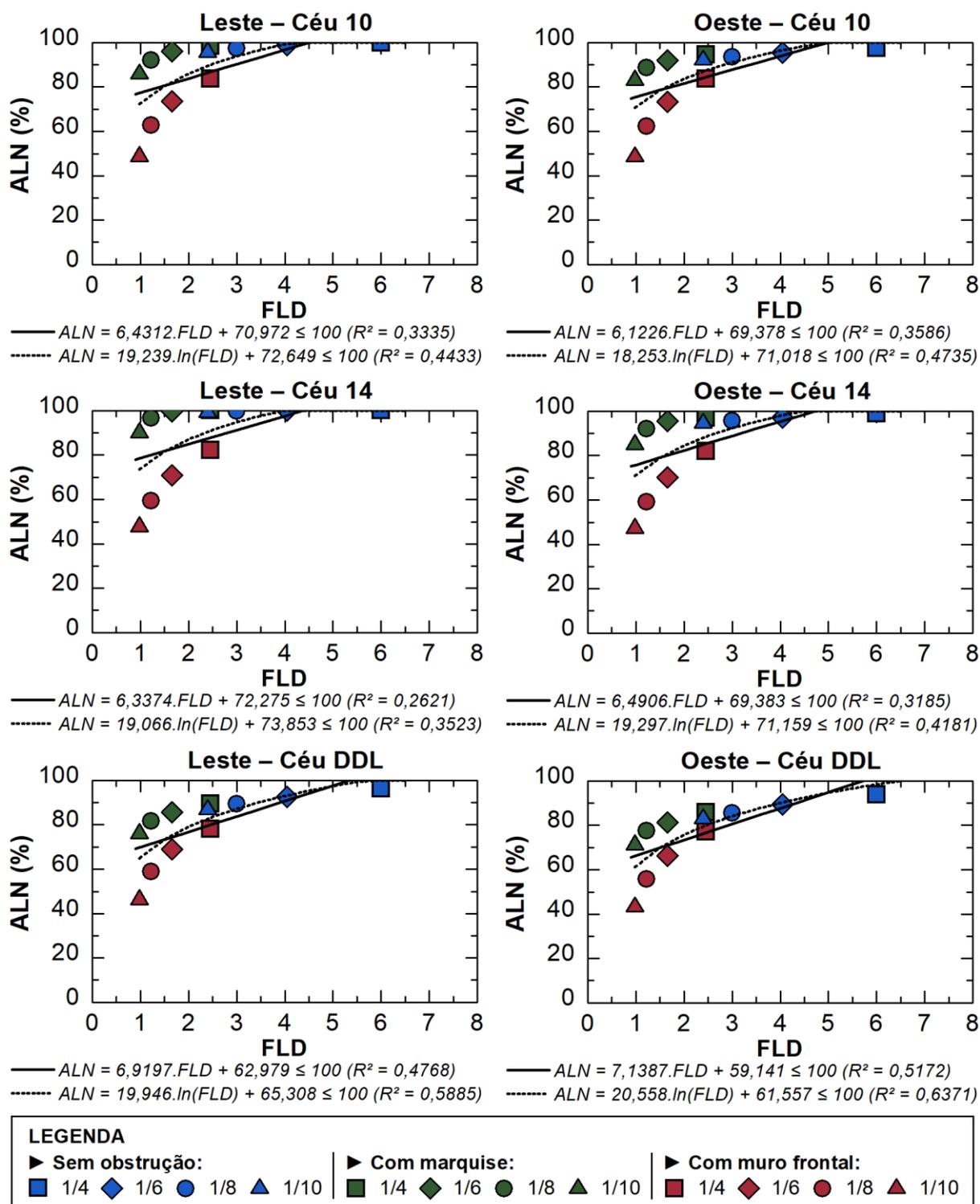
os que mais se distanciaram da linha única de tendência, causando a diminuição do R^2 . O comportamento se repetiu nas orientações Leste e Oeste e aconteceu com menor intensidade no Norte e Sul.

Figura 16 – ALN: (Céus 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

Figura 17 – ALN: (Céus 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

Diferentemente do céu nublado, para os céus com presença da luz solar, o ganho de iluminância é notável. Para as orientações Leste e Oeste, que recebem mais luz por questões de geometria solar, os ganhos são ainda maiores mesmo com as

obstruções. Os ambientes mais desfavoráveis, com obstrução do muro frontal e com menores aberturas, ainda conseguem atingir valores maiores que a maioria das situações no céu nublado. Para um mesmo valor de \overline{FLD} , utilizando a linha de tendência e equações propostas, os valores são próximos entre todas as orientações (diferente do que aconteceu com a iluminância, que apresentou diferenças consideráveis entre Norte/Sul e Leste/Oeste), o que pode indicar que um valor único de \overline{FLD} pode ser utilizado simultaneamente para todas as orientações.

O comportamento se repete para as demais cidades estudadas, por esse motivo, os gráficos referentes à ALN das cidades de Macapá-AP e Vitória-ES estão contidos nos apêndices C e D, respectivamente.

4.2.1 Influência das iluminâncias-alvo no ajuste das regressões

Embora as equações logarítmicas encontradas para a ALN tenham apresentado coeficientes de determinação superiores em comparação às equações lineares, os valores de R^2 obtidos ainda permaneceram relativamente baixos, especialmente quando comparados aos da EMA. Isso indica que existem variáveis influentes na ALN que não foram consideradas nos modelos de regressão. Dado que a iluminância-alvo é um critério crucial para a ALN, foi elaborado um novo modelo de regressão que incluiu além do \overline{FLD} – já considerado inicialmente – a iluminância-alvo (E_{alvo}) também como variável independente, visando melhorar o ajuste anterior e verificar se maiores coeficientes de determinação poderiam ser alcançados. Nesse novo modelo, foram consideradas três iluminâncias-alvo: 300 lx, 500 lx e 1.000 lx

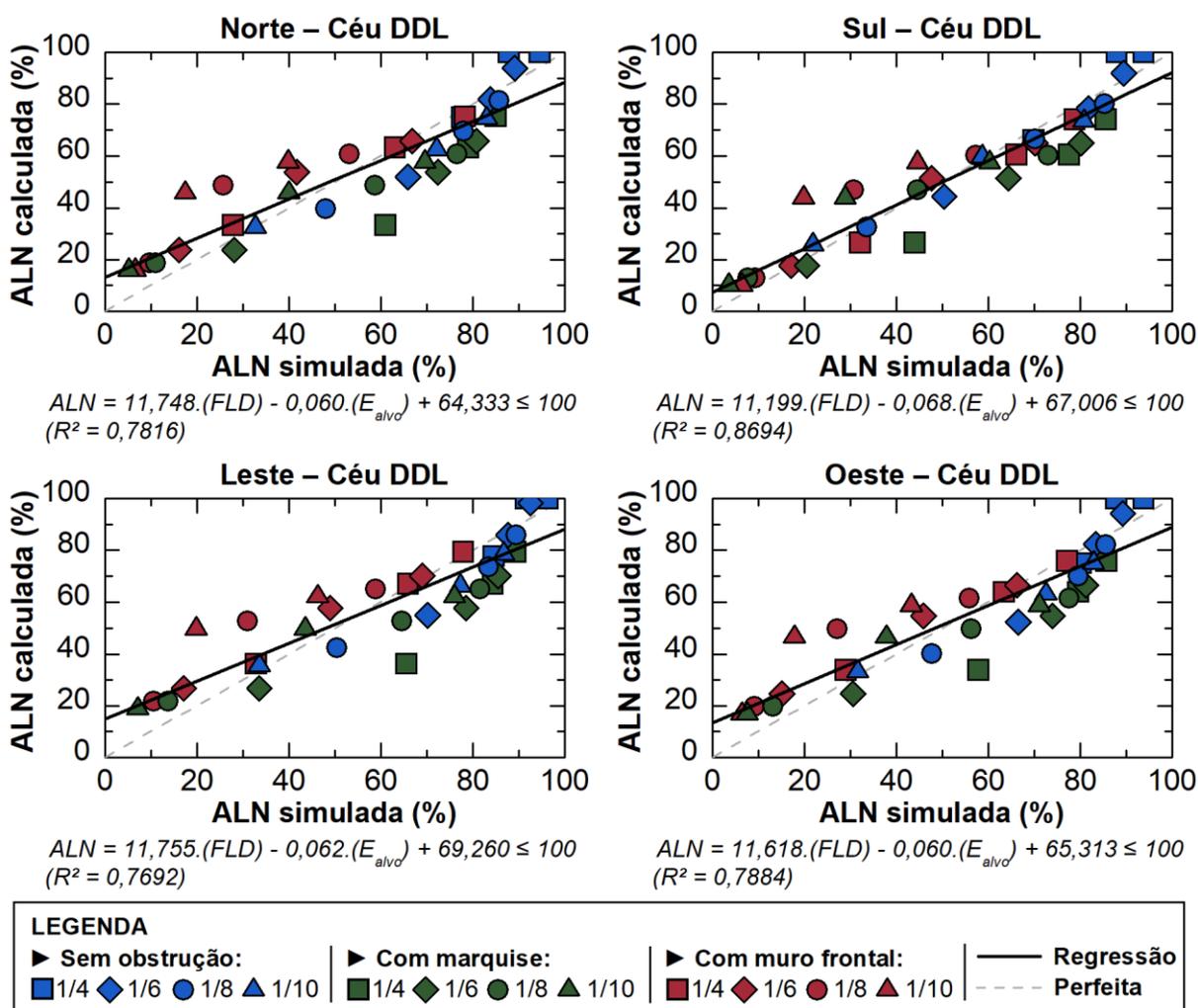
Os céus tipo 1, 10 e 14 da CIE, que representam padrões genéricos de céu encoberto, parcialmente nublado e claro, respectivamente, foram analisados anteriormente nas seções 4.1 e 4.2. No entanto, para o novo modelo, apenas o céu tipo DDL foi utilizado, pois ele considera a nebulosidade local e é o que mais se aproxima das condições reais de iluminação natural sendo, portanto, o mais adequado para o uso cotidiano dos profissionais.

Após a coleta dos novos dados no *software* TropLux, considerando as iluminâncias-alvo de 500 lx e 1.000 lx, além do valor de 300 lx utilizado anteriormente, as regressões lineares foram obtidas no *software* Excel com o auxílio do *plugin* Action. A Figura 18 apresenta os gráficos de aderência entre os valores de ALN simulados no TropLux e os valores calculados por meio das equações encontradas para todas as

orientações estudadas para a cidade de Maceió-AL. Assim como nos gráficos apresentados anteriormente, quanto mais próximos das linhas de tendência das regressões (representadas pelas linhas contínuas pretas) os pontos estiverem, mais ajustada está a equação e maior é o coeficiente de determinação, R^2 .

Considerar a iluminância-alvo como uma variável independente permitiu obter melhores ajustes dos dados às equações. Os valores de R^2 alcançados foram superiores aos das equações logarítmicas e, conseqüentemente, aos das equações lineares obtidas anteriormente. Para o céu DDL na cidade de Maceió-AL os valores de R^2 nas equações logarítmicas variaram entre 0,5885 e 0,7858. Quando a iluminância-alvo foi considerada como variável independente no modelo de regressão, o intervalo de variação aumentou para 0,7692 a 0,8694. Em ambos os intervalos, os menores R^2 foram obtidos na orientação Leste e os maiores na orientação Sul.

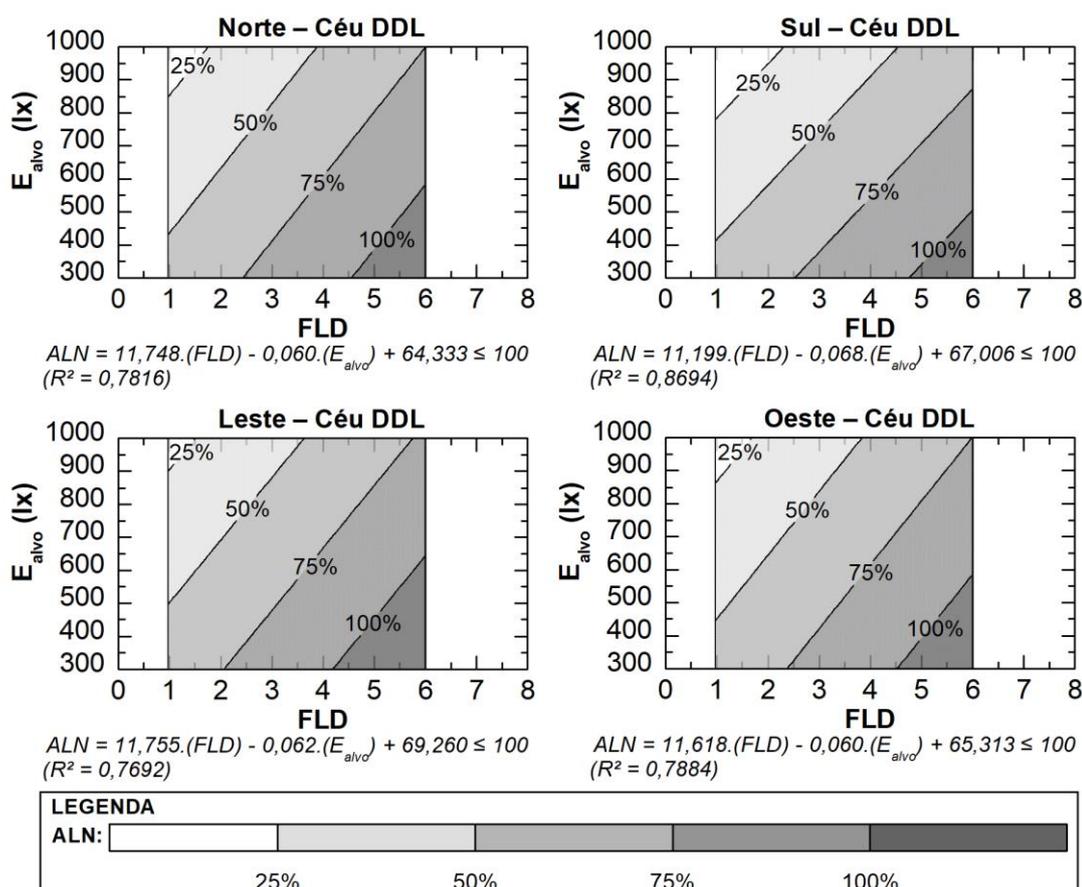
Figura 18 – ALN simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL)



A comparação entre a ALN calculada (pelos modelos de regressão) e simulada (TropLux), apresentada na Figura 18, permite visualizar a linha de tendência do modelo de regressão (linha contínua preta) em relação à linha de referência que representa o ajuste perfeito ($R^2 = 1,0$), representada pela linha tracejada cinza com inclinação de 45 graus. Embora os novos modelos apresentem maiores valores de R^2 , o comportamento das equações permaneceu consistente com os resultados anteriores. De maneira geral, as equações tendem a superestimar os valores de ALN na presença do muro frontal e subestimar os valores quando há uma marquise ou, em alguns casos, na ausência de obstruções.

Para analisar a influência das duas variáveis utilizadas no modelo de regressão, foram gerados gráficos de superfície de contorno relacionando a ALN em função do \overline{FLD} e da iluminância-alvo (E_{alvo}), como mostra a Figura 19. Esses gráficos permitem, a partir do \overline{FLD} desejado, encontrar a ALN correspondente para cada iluminância-alvo. Observa-se que o modelo tende a reduzir os valores da ALN à medida que a iluminância-alvo aumenta.

Figura 19 – FLD Médio X ALN X E_{alvo} : Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL)



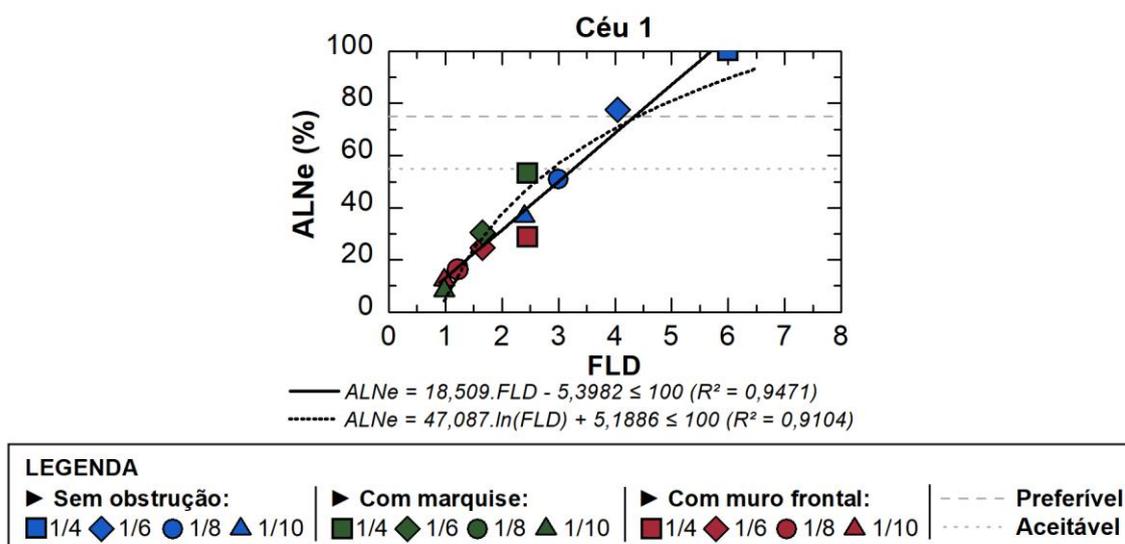
Fonte: A autora (2024).

Não há diferenças significativas entre o comportamento analisado em Maceió-AL e o das demais cidades estudadas. Portanto, os gráficos para as cidades de Macapá-AP e Vitória-ES estão apresentados, respectivamente, nos apêndices C e D.

4.3 Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe)

Para a ALNe, os parâmetros inicialmente utilizados para as simulações foram: iluminância-alvo de 300 lx durante 50% do tempo (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012). O comportamento gráfico da ALNe é bastante semelhante ao da ALN e a equação que inicialmente melhor representou o seu comportamento também foi do tipo logarítmica para todos os céus, exceto o tipo 1, encoberto, no qual a equação linear apresentou melhores resultados. Novamente, os valores das equações lineares também podem ser utilizados para fins de simplificação do cálculo. A ALNe para o céu encoberto da cidade de Maceió-AL está apresentada na Figura 20. Considerando as equações lineares, o coeficiente de determinação do modelo de regressão linear para a ALNe foi de 0,9471, enquanto o R^2 para a ALN, com os mesmos parâmetros foi de 0,9066 (Figura 15), indicando que para as duas métricas existem correlações muito fortes com os valores do \overline{FLD} .

Figura 20 – ALNe: (Céu 1) Norte, Leste Sul e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

Ainda no céu encoberto, nenhuma das proporções de janela nas situações com obstrução atingiu o valor de 55%, considerado aceitável, o que indica baixas

autonomias. Mesmo nas situações sem obstrução, apenas as duas maiores áreas de janela, 1/4 e 1/6, atingiram o nível preferível, 75%. Para esse tipo de céu, em todas as cidades e condições estudadas, os valores de \overline{FLD} indicados pela equação encontrada, levando em consideração apenas a ALNe, precisariam ser superiores a 4,5% para atingir a autonomia preferível. Esse valor é relativamente elevado até mesmo para os padrões dos normativos europeus (ver Quadro 2).

Nos céus tipo 10, 14 e DDL, a maioria das situações atinge 100% de ALNe, como mostram as Figura 21 e Figura 22. As figuras também mostram os valores de R^2 encontrados, nas equações logarítmicas os coeficientes variaram entre 0,2766 e 0,5434. A grande disponibilidade da luz natural nas cidades de baixas latitudes, Macapá e Maceió, possibilita que a maior parte das situações atinja 100% de área com autonomia superior a 300 lx em pelo menos metade do tempo analisado. Nessas cidades, quando não há obstrução, a ALNe atinge o nível preferível em todas proporções de janelas, mesmo nas orientações com menores EMA, como Norte e Sul. Porém, com obstrução, as janelas de 1/10 com muro frontal não atendem aos requisitos mínimos em nenhuma orientação e para nenhuma cidade estudada.

Apesar das duas obstruções (marquise e muro frontal) resultarem em valores de EMA muito próximos, suas respectivas ALN e a ALNe são significativamente diferentes. Os cenários com marquises obtiveram valores de ALN e ALNe sempre iguais ou superiores aos do muro frontal em todas orientações e cidades analisadas.

Considerando o céu tipo DDL como referência, os modelos de regressão indicam que, para as cidades de Macapá e Maceió, um \overline{FLD} em torno de 1% é suficiente para que as situações sem obstrução e com marquise atinjam níveis de autonomia espacial acima do preferível. Porém, no caso do muro frontal, as equações tendem a superdimensionar os valores de ALNe, o que implica na necessidade de um valor de \overline{FLD} maior. Os resultados sugerem que o valor mais apropriado seria superior a 1,5% quando a obstrução for o muro frontal.

Para a cidade de Vitória, ainda analisando o céu DDL, os gráficos (disponíveis no apêndice D) mostram que a ALNe é consideravelmente afetada pela menor disponibilidade de luz natural, principalmente na orientação Sul, que por questões de geometria solar recebe menos luz nessa latitude (a EMA do Sul é aproximadamente metade das orientações Norte, Leste e Oeste). Porém, novamente o tipo de obstrução apresentou grande influência, já que na EMA os valores de todos os cenários em todas as orientações são muito próximos (Figura 42 e Figura 43), mas na ALNe o cenário

com muro frontal apresenta o pior desempenho. De acordo com as equações encontradas, o \overline{FLD} necessário seria em torno de 2% para que níveis de ALNe acima do preferível fossem atingidos quando não há obstrução e com a presença da marquise. Na situação com muro frontal, valores acima de 2,5% seriam adequados.

Figura 21 – ALNe: (Céus 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Maceió-AL)

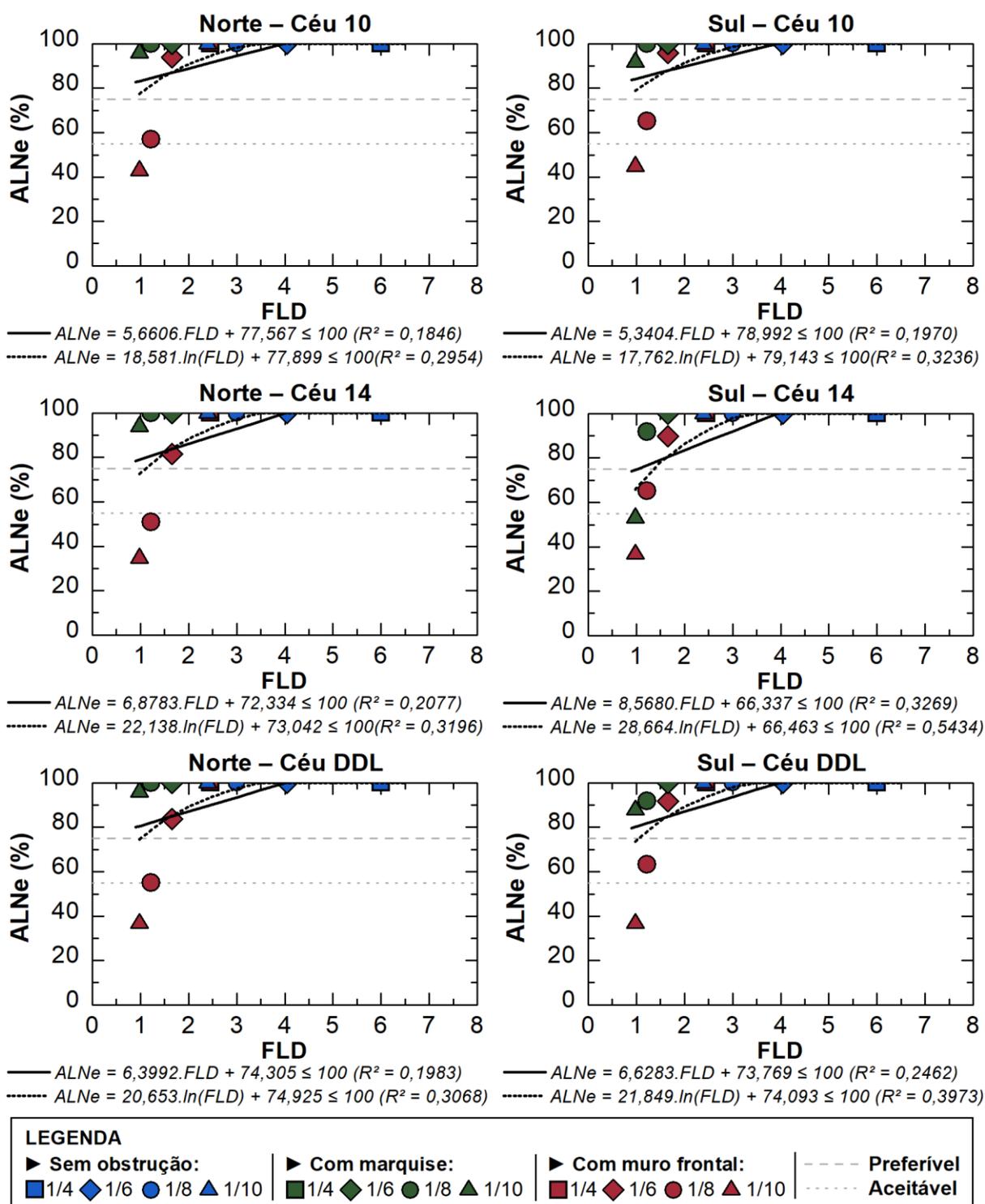
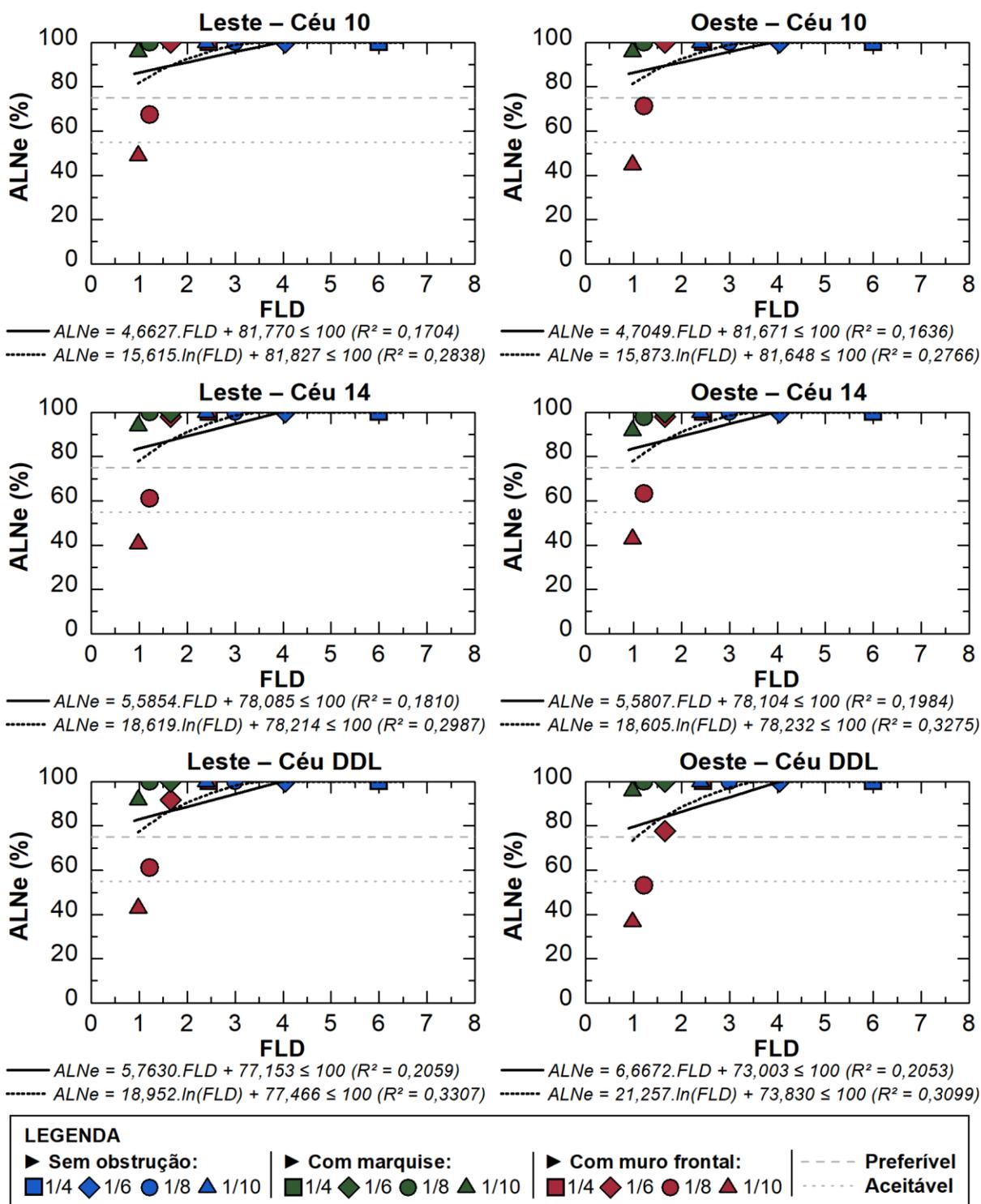


Figura 22 – ALNe: (Céus 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

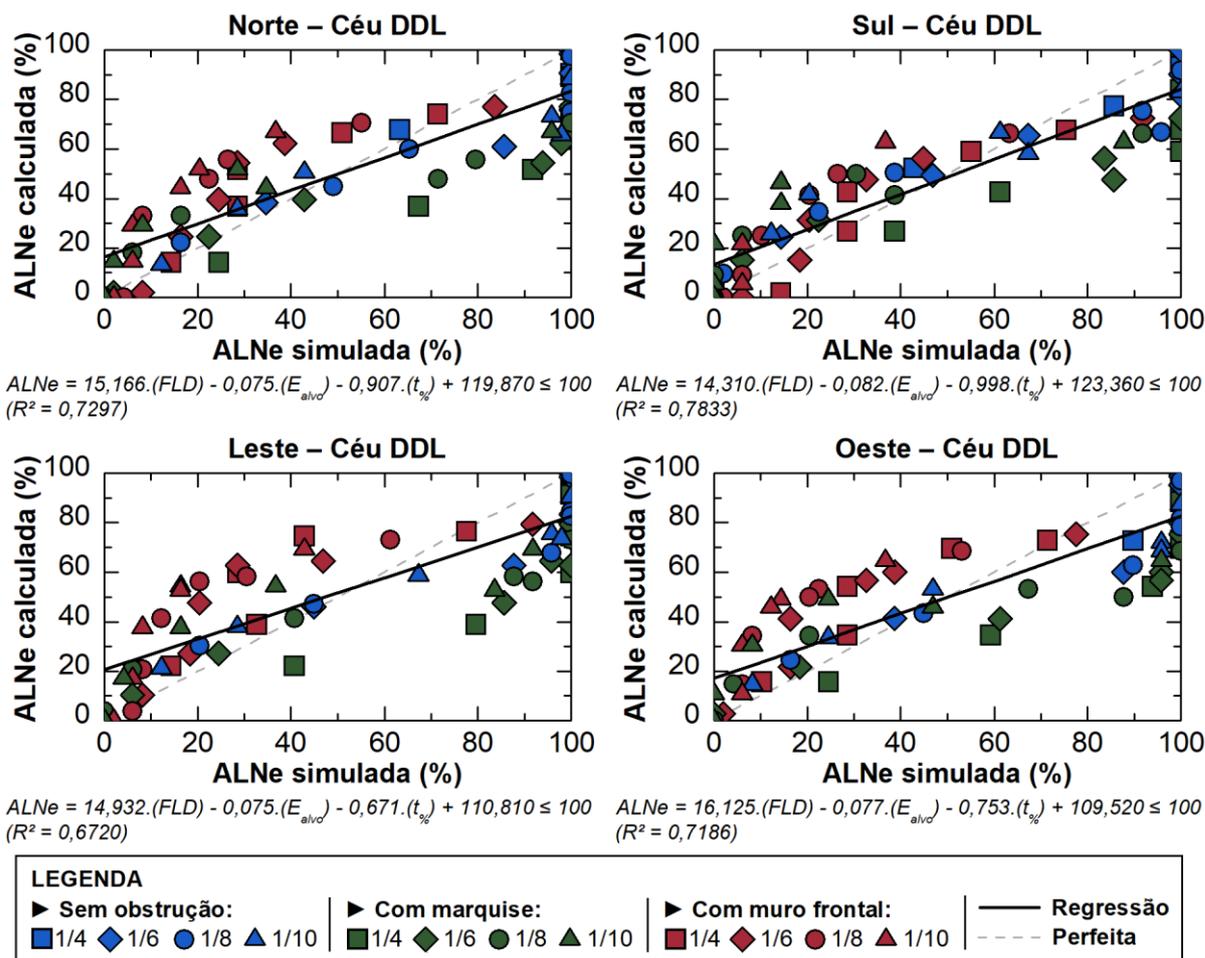
Todos os gráficos da ALNe para a cidade de Macapá-AP e Vitória-ES estão disponíveis nos apêndices C e D, respectivamente.

4.3.1 Influência das iluminâncias-alvo e da fração de tempo no ajuste das regressões

Assim como na ALN, as equações logarítmicas alcançaram maiores valores de R^2 do que as equações lineares obtidas para a ALNe. No entanto, os coeficientes de determinação ainda foram significativamente baixos. Para aumentar os valores de R^2 , o mesmo procedimento adotado para a ALN foi aplicado, e um novo modelo de regressão foi criado. Na autonomia de luz natural espacial, além da iluminância-alvo, um critério fundamental é a fração de tempo em que se deseja analisar se a iluminância-alvo foi atingida. Assim, o novo modelo de regressão considerou a iluminância-alvo (E_{alvo}) e a fração de tempo ($t\%$) como variáveis independentes. As iluminâncias-alvo utilizadas foram novamente 300 lx, 500 lx e 1.000 lx, e, além do percentual de tempo de 50% já adotado anteriormente, foi analisado também o valor de 75%. Apenas o céu DDL foi considerado nas novas análises, pelas razões apresentadas na seção 4.2.1. A Figura 23 apresenta os gráficos de aderência entre os dados e as equações encontradas para todas as orientações estudadas na cidade de Maceió-AL.

Considerar a iluminância-alvo e a fração de tempo como variáveis independentes permitiu obter melhores ajustes dos dados às equações. Os valores de R^2 alcançados foram superiores aos das equações logarítmicas e, conseqüentemente, aos das equações lineares anteriores. Para o céu DDL na cidade de Maceió-AL os valores de R^2 nas equações logarítmicas variaram entre 0,3068 e 0,3973. No novo modelo o intervalo aumentou para 0,6720 a 0,7833.

Figura 23 – ALNe simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL)

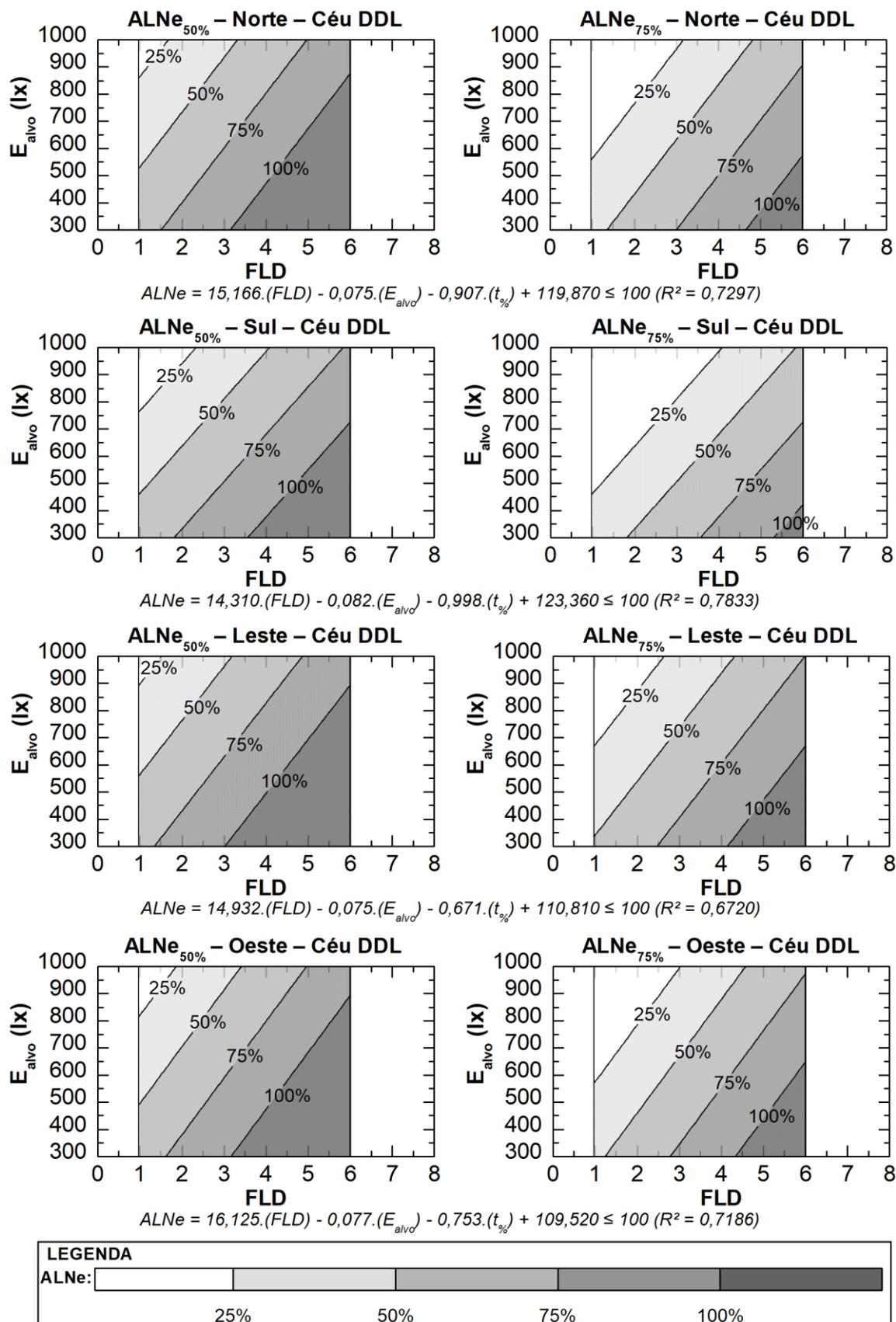


Fonte: A autora (2024).

Gráficos de superfície de contorno relacionando a ALNe em função do \overline{FLD} e da iluminância-alvo (E_{alvo}) foram elaborados para as frações de tempo ($t_{\%}$) 50% e 75% e estão apresentados na Figura 24. Conforme a fração de tempo analisada aumenta de 50% para 75%, os valores do \overline{FLD} necessários para que as autonomias sejam atingidas também são maiores. A porção do gráfico que contém as faixas acima do preferível, 75%, e também as situações que atingem 100% de área de ALNe, reduzem consideravelmente com a elevação da fração do tempo analisada, elevando os valores de \overline{FLD} requeridos para atingir essas autonomias. As orientações que apresentam menores iluminâncias, Norte e Sul, são as que precisam dos maiores valores de \overline{FLD} para atingir as autonomias, seja aceitável ou preferível.

O comportamento é semelhante tanto em Macapá-AP quanto em Vitória-ES, e por essa razão seus gráficos estão apresentados nos apêndices C e D, respectivamente.

Figura 24 – ALNe X FLD Médio X E_{alvo} X t%: Norte, Sul, Leste e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

A partir das equações obtidas foram calculados valores de \overline{FLD} que poderiam ser utilizados como valores de referência para as três cidades estudadas, considerando o nível preferível de ALNe. Estão apresentados na Tabela 4 valores para cada orientação, para cada uma das três iluminâncias-alvo, 300 lx, 500 lx e 1000 lx, e também para as duas frações de tempo analisadas, 50% e 75%.

É interessante notar que, para a cidade de Macapá, próxima da linha do Equador, os valores de \overline{FLD} encontrados para as orientações Norte e Sul são iguais ou muito próximos. Essa proporcionalidade está de acordo com o que se observa nas cartas solares: para essa latitude, as porções Norte e Sul são simétricas, o que sugere que a quantidade de luz nessas orientações tende a ser equivalente. As variações observadas podem ser atribuídas à nebulosidade. À medida que a latitude aumenta no hemisfério Sul, a porção Norte se expande e a Sul diminui (comportamento comentado na seção 4.1). Isso explica os valores encontrados nas cidades de Maceió e Vitória, que apresentam maiores diferenças entre essas orientações, com a porção Sul necessitando de maiores valores de \overline{FLD} para atingir as autonomias estabelecidas.

Para fins de simplificação, em uma possível norma que estabelecesse essas recomendações, poderia ser adotado um único valor, correspondente ao maior encontrado entre todas as orientações, para cada combinação de iluminância-alvo, fração de tempo e cidade. Alternativamente, poderiam ser sugeridos dois valores: um para as orientações Norte e Sul, e outro para as orientações Leste e Oeste.

Tabela 4 – Sugestões de FLD Médio para ALNe preferível em regiões tropicais

Cidade	Orientação/ E _{alvo} (lx)	t% = 50%			t% = 75%		
		300	500	1000	300	500	1000
Macapá-AP (Latitude 0,04 N)	Norte	1,5%	2,6%	5,6%	2,7%	3,9%	6,8%
	Sul	1,5%	2,7%	5,6%	2,8%	3,9%	6,9%
	Leste	1,2%	2,2%	4,6%	2,3%	3,3%	5,7%
	Oeste	1,2%	2,2%	4,6%	2,4%	3,3%	5,7%
Maceió-AL (Latitude 9,66 S)	Norte	1,5%	2,5%	5,0%	3,0%	4,0%	6,5%
	Sul	1,8%	3,0%	5,8%	3,6%	4,7%	7,6%
	Leste	1,4%	2,4%	4,9%	2,5%	3,5%	6,0%
	Oeste	1,6%	2,6%	5,0%	2,8%	3,7%	6,1%
Vitória-ES (Latitude 20,32 S)	Norte	2,6%	3,5%	5,6%	4,5%	5,3%	7,4%
	Sul	3,2%	4,2%	6,6%	4,8%	5,8%	8,2%
	Leste	2,3%	3,1%	5,1%	4,2%	5,0%	7,0%
	Oeste	2,4%	3,2%	5,2%	4,4%	5,2%	7,2%

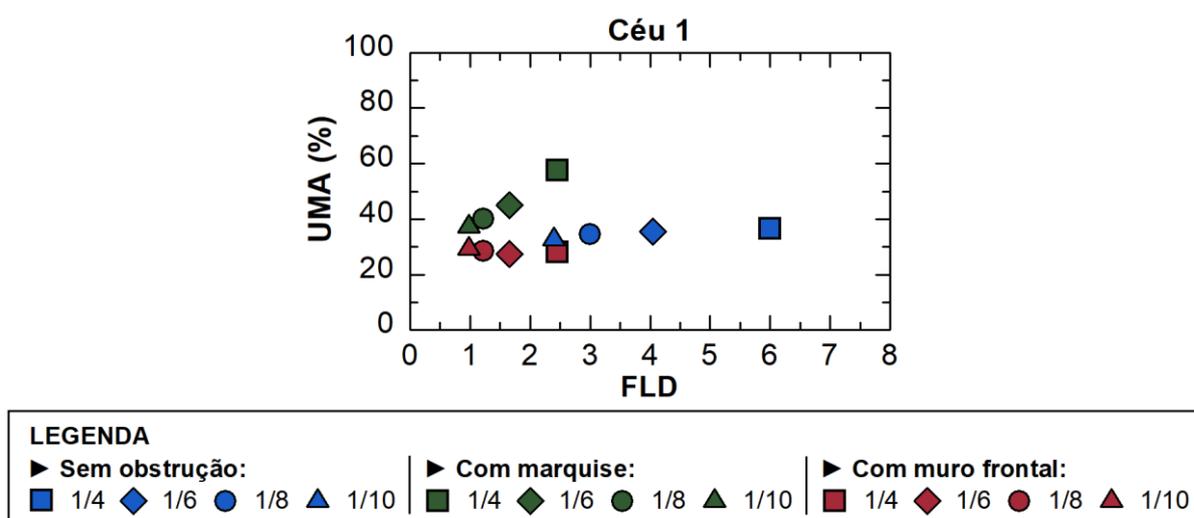
Fonte: A autora (2024).

Os valores de \overline{FLD} encontrados, considerando a iluminância-alvo de 300 lx durante 50% do tempo, conforme sugerido pela norma LM 83-12 (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, 2012), variaram entre 1,2% e 1,8% nas cidades de Macapá e Maceió. Esses resultados são próximos aos valores sugeridos por Tregenza e Wilson (2011), que recomendaram um Fator de Luz do Dia Médio de 1,5%, ou até 1% para climas quentes e úmidos (ver seção 2.4.3). Além disso, esses valores se aproximam dos FLD calculados e apresentados na Tabela 1, que foram baseados na iluminância horizontal difusa necessária para atingir o valor de referência de 300 lx. Em Vitória, localizada próxima ao Trópico de Capricórnio, na transição entre a zona tropical e a temperada, a iluminância recebida é menor do que em Macapá e Maceió, como mostrado nos gráficos de EMA (Apêndice D). Por isso, Vitória requer valores mais elevados de \overline{FLD} para alcançar a mesma autonomia observada nas outras capitais estudadas, com variações entre 2,3% e 3,2%.

4.4 Uniformidade Média Anual (UMA)

A UMA foi a métrica mais desafiadora de ser analisada em relação aos valores do \overline{FLD} . Diferentemente das métricas anteriores, os gráficos para todos os céus são muito semelhantes, como mostrado nas Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

Figura 25 – UMA: (Céu 1) Norte, Leste Sul e Oeste (Maceió-AL)

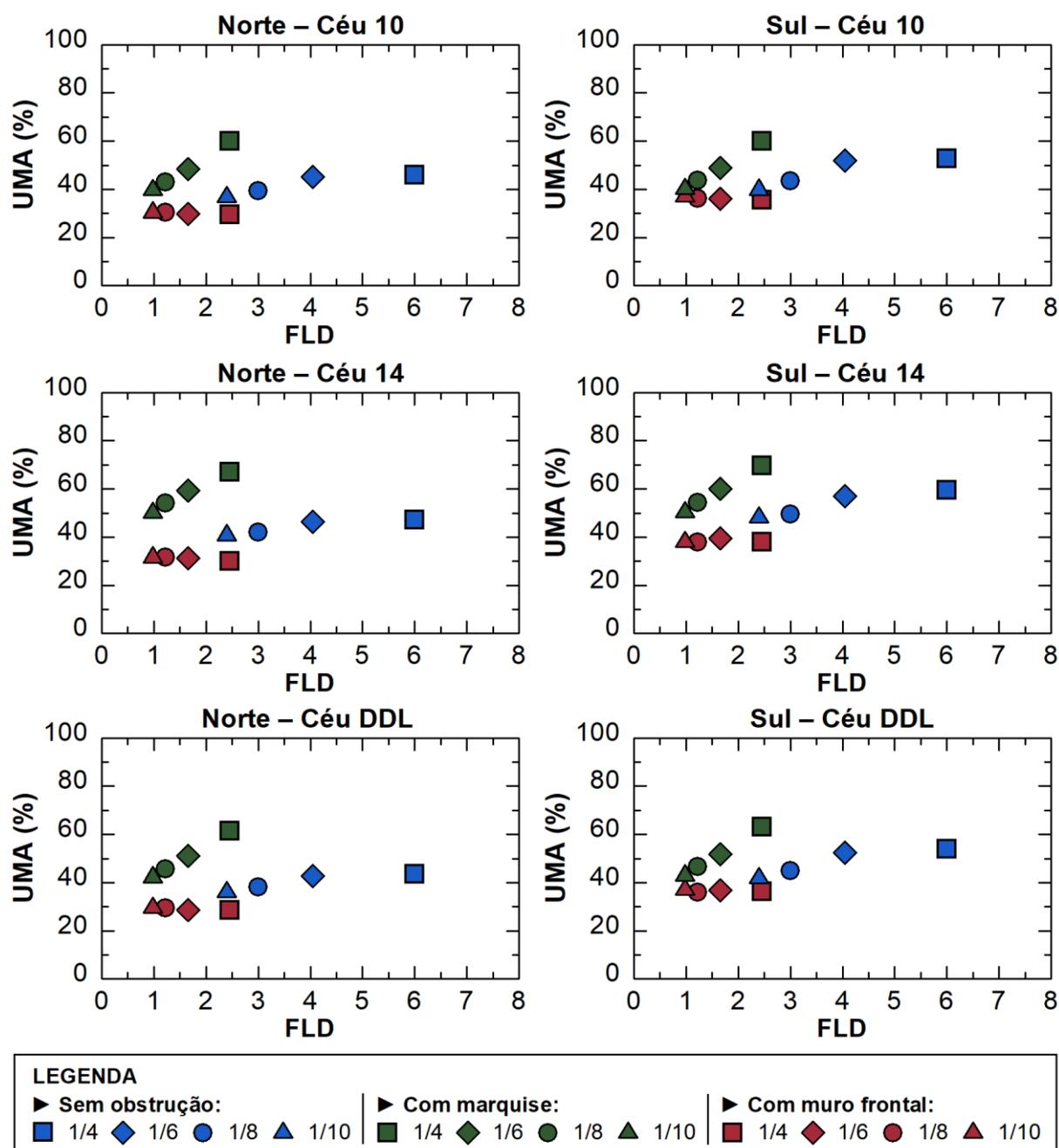


Fonte: A autora (2024).

Não foi possível estabelecer uma correlação entre o \overline{FLD} e a uniformidade. Cada situação apresentou comportamentos distintos, e, na condição sem obstrução,

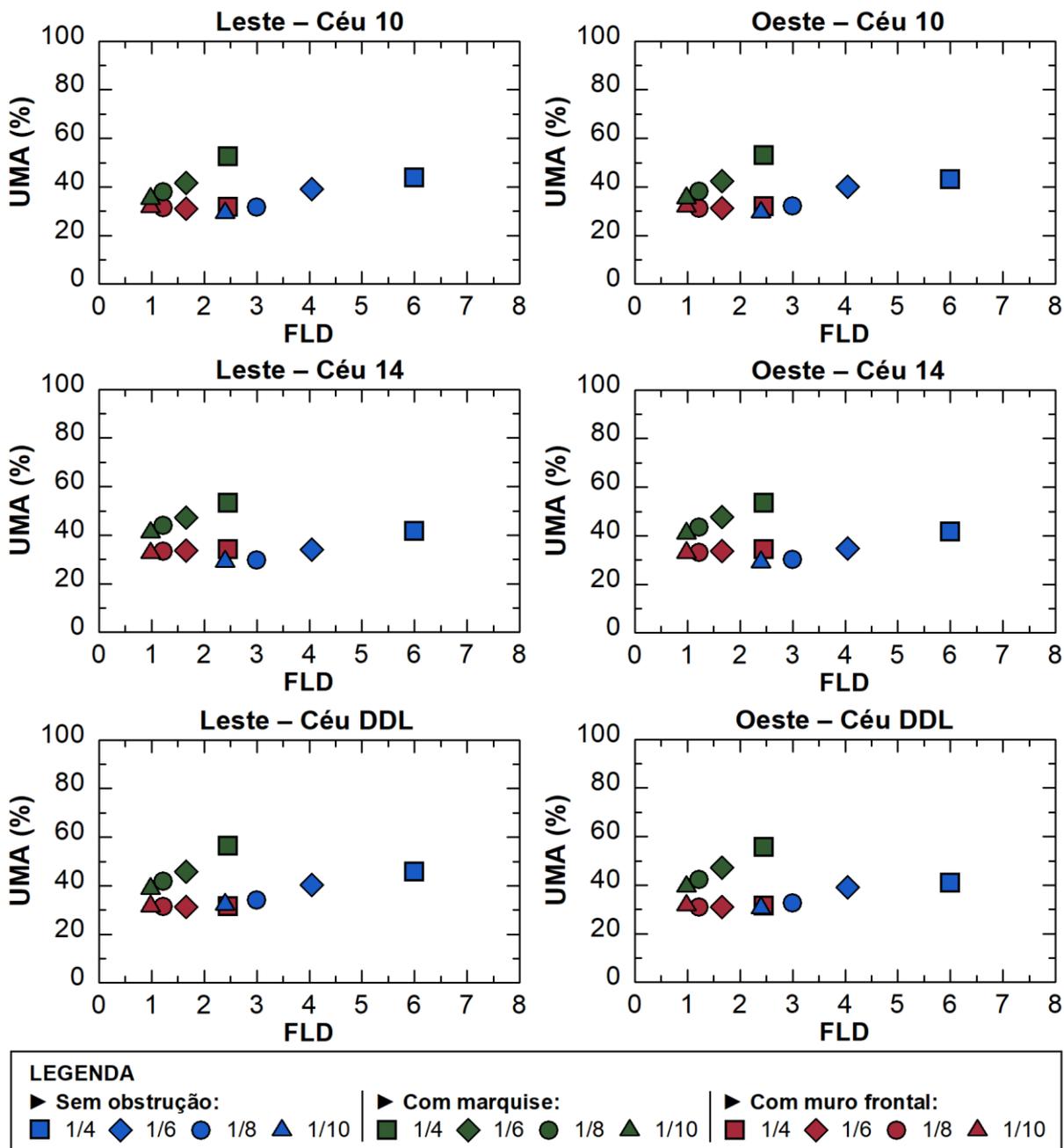
a uniformidade manteve um padrão quase constante, sugerindo que o aumento nos valores do \overline{FLD} não teve impacto significativo sobre a uniformidade. Dessa forma, os modelos de regressão não foram capazes de explicar o comportamento conjunto das duas métricas, resultando em valores de R^2 extremamente baixos.

Figura 26 – UMA: (Céus 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

Figura 27 – UMA: (Céus 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Maceió-AL)



Fonte: A autora (2024).

Os maiores valores de uniformidade foram encontrados na situação com a marquise infinita, pois, nesse caso o dispositivo de proteção desempenha sua principal função de bloquear a luz solar direta em alguns momentos. Para as orientações Norte e Sul, que já recebem menos luz solar direta devido à geometria solar, a marquise ainda oferece proteção contra o Sol lateral. Nas orientações Leste e Oeste, a marquise bloqueia principalmente o Sol mais alto, mas em horários limitados, devido ao seu tamanho. Em todas as orientações, o dispositivo de sombreamento

reduz a incidência de luz solar direta, o que diminui o contraste das iluminâncias no ambiente e, conseqüentemente, aumenta a uniformidade em comparação com as demais situações.

A situação com o muro frontal apresenta um comportamento distinto. Devido à sua posição, nas orientações Leste e Oeste, o muro permite maior entrada de luz do Sol alto (maiores iluminâncias) em comparação com o Sol mais baixo. Isso também reduz a penetração da luz no ambiente, concentrando as maiores iluminâncias nas áreas mais próximas da janela, o que diminui a uniformidade. Nas orientações Norte e Sul, o muro tem pouca influência na obstrução da luz solar direta, mas pode atuar aumentando as componentes refletidas. Isso faz com que os valores de uniformidade fiquem próximos, ou até ligeiramente maiores, em comparação à situação sem obstruções.

O \overline{FLD} e a UMA analisam aspectos diferentes do desempenho luminoso. Enquanto o \overline{FLD} se refere à quantidade de luz natural recebida, medida como uma porcentagem de iluminância, a UMA avalia a uniformidade da distribuição da luz, considerando a diferença de intensidade luminosa entre os pontos do ambiente. Dessa maneira, é possível um ambiente ter um valor de \overline{FLD} baixo, porém ter um valor elevado de UMA, se a pouca luz disponível estiver uniformemente distribuída, bem como o contrário também é possível, que um ambiente tenha um \overline{FLD} elevado e a UMA baixa. Portanto, os comportamentos dessas métricas podem divergir mesmo em situações semelhantes, como observado nos cenários estudados, o que explica a ausência de correlação entre elas.

O mesmo comportamento observado para a cidade Maceió-AL se repetiu nas demais cidades e os gráficos referentes às cidades de Macapá-AP e Vitória-ES estão apresentados nos apêndices C e D, respectivamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo identificar as relações entre o Fator de Luz do Dia Médio (\overline{FLD}) e as métricas dinâmicas em regiões tropicais. As métricas dinâmicas utilizadas foram a Iluminância Média Anual (EMA), Autonomia de Luz Natural (ALN), Autonomia de Luz Natural espacial (ALNe), e Uniformidade Média Anual (UMA). Para alcançar esse objetivo, foram elaborados gráficos de dispersão que relacionaram os valores calculados de \overline{FLD} com os valores simulados das métricas dinâmicas. Em seguida, foram realizadas regressões lineares, avaliando as relações por meio do coeficiente de determinação (R^2).

A relação encontrada entre os valores calculados de \overline{FLD} e os valores simulados da EMA apresentou uma correlação muito forte, explicada por equações lineares com coeficientes de determinação (R^2) muito próximos de 1. Esses resultados sugerem a existência de uma relação linear entre o \overline{FLD} e a EMA, indicando que equações baseadas no \overline{FLD} podem ser utilizadas de forma eficaz para estimar valores de EMA.

Em relação às autonomias, tanto para a ALN quanto para a ALNe, os modelos que consideraram apenas o \overline{FLD} como variável independente não apresentaram valores satisfatórios de R^2 . Foi necessário ajustar o modelo de regressão para incluir, além do \overline{FLD} , a iluminância-alvo e a fração de tempo como variáveis independentes. Após esse ajuste, os coeficientes de determinação mostraram-se satisfatórios, indicando a possibilidade de estimar valores de \overline{FLD} a partir de valores desejados de ALN e ALNe.

Com os gráficos de aderência, foi possível observar que o tipo de obstrução tem grande influência em ambas as autonomias. De maneira geral, as equações tendem a superestimar os valores de ALN e ALNe na presença do muro frontal, enquanto subestimam esses valores quando há uma marquise ou, em alguns casos, na ausência de obstruções.

Por meio dos modelos de regressão, foi possível calcular valores de \overline{FLD} que poderiam ser utilizados como referência para as três cidades estudadas. Considerando os critérios comumente adotados para o ALNe, que estabelecem uma iluminância-alvo de 300 lx durante 50% do tempo, os valores de \overline{FLD} encontrados nas cidades de Macapá e Maceió variaram entre 1,2% e 1,8%, enquanto para a cidade de

Vitória os valores ficaram entre 2,3% e 3,2%.

O tamanho das aberturas teve uma influência consistente nas métricas EMA, ALN e ALNe, onde aberturas maiores resultaram em maiores níveis de iluminância e autonomias. No entanto, a relação com a uniformidade apresentou variações. Na ausência de obstruções, a uniformidade se manteve praticamente constante. Com a marquise como obstrução, a uniformidade aumentou com o aumento do tamanho das aberturas. Em contrapartida, a presença do muro frontal causou uma diminuição da uniformidade à medida que as aberturas se tornaram maiores.

Como \overline{FLD} e a UMA analisam aspectos diferentes do desempenho luminoso – o \overline{FLD} se refere à quantidade de luz natural recebida, enquanto a UMA avalia a uniformidade da distribuição da luz – não foi possível estabelecer uma correlação entre o \overline{FLD} e a uniformidade. Os resultados mostraram que o aumento nos valores do \overline{FLD} não teve impacto significativo sobre a uniformidade, apresentando valores de R^2 extremamente baixos nos modelos de regressão.

Diante do exposto, os resultados do estudo indicam que é possível estabelecer relações entre o \overline{FLD} e as métricas EMA, ALN e ALNe em regiões tropicais, mas não com a UMA. Embora mais estudos sejam necessários para abranger outras situações, os resultados iniciais sugerem que o Fator de Luz do Dia Médio pode ser utilizado como ferramenta nas etapas iniciais de projeto em regiões tropicais.

Uma das limitações deste trabalho é que o estudo foi restrito a um ambiente quadrado, variando apenas o ângulo de céu visível (θ) entre os cenários. Para trabalhos futuros, recomenda-se explorar a influência de diferentes refletâncias, outras geometrias de ambientes e incluir mais tipos de obstruções, resultando em diferentes ângulos de céu visível. No contexto urbano, diversos tipos de vegetação, edificações e dispositivos de proteção solar podem atuar como obstruções, cada uma gerando um ângulo de céu visível distinto que merece investigação. Outra limitação refere-se às latitudes, embora três delas tenham sido consideradas, a extrapolação dos resultados para outras regiões tropicais e subtropicais requer cautela. Para regiões tropicais, é importante observar os aspectos relacionados aos dados da nebulosidade. Já nas regiões subtropicais, além na nebulosidade, também é necessário considerar as variações inerentes à geometria solar.

Por fim, os resultados deste estudo representam uma contribuição inicial para o aprimoramento de diretrizes e normativas voltadas ao uso de luz natural em

ambientes construídos nas regiões tropicais, oferecendo informações que auxiliam na construção de bases de dados adaptadas às especificidades apresentadas. Além disso, o trabalho reforça e incentiva a relevância de buscar adequações de métricas, normas e parâmetros de desempenho luminoso amplamente utilizados, ajustando-os a diferentes contextos climáticos e arquitetônicos

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12286**: Roteiro para elaboração e apresentação do Código de obras. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15215-3**: Iluminação Natural - Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/CIE 8995-1**: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.
- AHMAD, N.; AHMAD, S. S.; TALIB, A. Surface reflectance for illuminance level control in daylight historical museum gallery under tropical sky conditions. **Advanced Material Research**, [s. l.], v. 610-613, p. 2854-2858, 2012.
- AHMAD, R. M.; REFFAT, R. M. A comparative study of various daylighting systems in office buildings for improving energy efficiency in Egypt. **Journal of Building Engineering**, Netherlands, v. 18, p. 360-376, 2018.
- ARACAJU. **Lei nº 13, de 03 de junho de 1966**. Código de obras do município de Aracaju. Aracaju: Câmara Municipal, 1966.
- ARAÚJO, I. Á. L.; BITTENCOURT, L. S. Relação entre dimensões de janela e piso para iluminação natural e eficiência energética em edificações no trópico úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 121-135, out./dez. 2022.
- ARAÚJO, I. Á. L. de; CABÚS, R. C. Influência da luz natural refletida pelo entorno na iluminação de edifícios em cânions urbanos no trópico úmido. *In*: Encontro Latino-Americano, 5.; Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, 9., Ouro Preto. **Anais** [...] Ouro Preto: ANTAC, 2007.
- ARAÚJO, J de S. **Uma janela tropical**: Análise do desempenho luminoso de ambientes com aberturas sombreadas para o clima de Natal/RN. 2012. Tese (Dissertação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- ATKINSON, W. **The orientation of buildings or planning for sunlight**. New York: John Wiley & Sons, 1912.

BELÉM. **Lei nº 7400, de 25 de janeiro de 1988. Dispõe sobre as edificações no Município de Belém e dá outras providências.** Belém: Câmara Municipal, 1988.

BELO HORIZONTE. **Lei nº 9725, de 15 de julho de 2009.** Institui o código de edificações do município de Belo Horizonte e dá outras providências. Belo Horizonte: Câmara Municipal, 2009.

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares:** diretrizes para arquitetos. 4. ed. Maceió: EDUFAL, 2004.

BOA VISTA. **Lei nº 023, de 10 de outubro de 1974.** Dispõe sobre o código de edificações e instalações do município de Boa Vista. Boa Vista: Câmara Municipal, 1974.

BOUBEKRI, M. A Overview of the current state of daylight legislation. **Journal of the Human-Environmental System**, v. 7, n. 2, p. 57-63, 2004.

BOUBEKRI, M. **Daylighting, Architecture and Health:** building design strategies. Oxford: Elsevier Ltd., 2008.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8206-1:** Lighting for buildings. Part 1 Lighting for buildings. Code of practice for artificial lighting. [S. l.]: BSI, 1985.

BUILDING OFFICIALS AND CODE ADMINISTRATORS. **The BOCA National Building Code/1990.** 11 ed. Country Club Hills: Building Officials & Code Administrators International Inc., p. 26-127, 1990.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 2440:** Guide for daylighting of buildings (Second Revision). New Delhi: BIS, 1975.

CABÚS, R. C. **Tropical Daylighting:** predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil. 2002. Tese (Doutorado em Arquitetura) – University of Sheffield, Sheffield, 2002.

CABÚS, R. Validação do programa TropLux. *In:* Encontro Latino-Americano, 4.; Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, 8., Maceió. **Anais [...].** Maceió: ANTAC, 2005.

CABÚS, R. C.; RIBEIRO, P. V. S.; BASTOS, O. M. K.; SILVA, L. F. **TropLux 8.** Titulares: Universidade Federal de Alagoas, Instituto Lumeeiro. BR512020002087-9. Criação: 10 set. 2019. Registro: 06 out. 2020.

CAMPO GRANDE. **Lei nº 1866, de 26 de dezembro de 1979.** Institui o código de obras do município de Campo Grande – MS. Campo Grande: Câmara Municipal, 1979.

CARVALHO, M. L. S.; CABÚS, R. C. Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 191-209, abr./jun. 2020.

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. **Code for interior lighting**. Londres: CIBSE, 1984.

COLÔMBIA. Ministério de Minas e Energia. **Resolução nº 180540, de 30 de março de 2010**. Por la cual se modifica el reglamento técnico de iluminación y alumbrado público – retilap, se establecen los requisitos de eficacia mínima y vida útil de las fuentes lumínicas y se dictan otras disposiciones. Bogotá: Ministério de Minas e Energia, 2010.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 17037**: Daylight in buildings. Brussels: CEN, 2018.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **CIE DS 011.2/E:2002**: Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky. Vienna: CIE, 2002.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos**: Conforto ambiental. 2. ed. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

CORBUSIER, L. **Por uma arquitetura**. 2 ed. São Paulo: Perspectiva, 1977.

CUIABÁ. **Lei complementar nº 516, de 18 de julho de 2022**. Dispõe sobre o código de obras do município de Cuiabá. Cuiabá: Câmara Municipal, 2022.

DELBIN, S. **Inserção de simulação computacional de conforto ambiental de edifícios em ensino de projeto arquitetônico**: Proposta de metodologia. 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT. **Sunlight and daylight planning criteria and design of buildings**. London: HSMO, p. 22-26, 1971.

DISTRITO FEDERAL. **Decreto nº 43056, de 03 de março de 2022**. Regulamenta a lei nº 6138, de 26 de abril de 2018, que dispõe sobre o código de edificações do Distrito Federal – COE/DF, e dá outras providências. Brasília: Governo do Distrito Federal, 2022.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas**: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DUFTON, A. F.; BECKETT, H. The heliodon: an instrument for demonstrating the apparent motion of the sun. **Journal of Scientific Instruments**, [s. l.], v. 9, n. 8, p. 251-256, 1932

FARKAS, A. B.; LARANJA, A. C. Análise da influência do pé-direito na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 25, n. 37, p. 189-219, jun. 2018.

FORMOLLI, M.; KLEIVEN, T.; LOBACCARO, G. Solar accessibility at the neighborhood scale: A multi-domain analysis to assess the impact of urban

densification in Nordic built environments. **Solar Energy Advances**, [s. l.], v. 2, 2022.

FORTALEZA. **Lei nº 5530, de 17 de dezembro de 1981**. Dispõe sobre o código de obras e posturas do município de Fortaleza e dá outras providências. Fortaleza: Câmara Municipal, 1981.

FREIRE, M. R.; AMORIM, A. L. de. A abordagem BIM como contribuição para a eficiência energética no ambiente construído. *In: Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção*, 5. **Anais** [...]. Salvador: UFBA, 2011.

GOIÂNIA. **Lei complementar nº 364, de 13 de janeiro de 2023**. Institui o código de obras e edificações do município de Goiânia. Goiânia: Câmara Municipal, 2023.

GHISI, E.; TINKER J. A. An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 40, p. 51-61, 2005.

HOPKINSON, R. G. **Architectural physics: lighting**. Londres: Her Majesty's Stationery Office, 1963.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **LM-83-12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York: IES, 2012.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **The lighting handbook: Reference & Application**. 10 ed. New York: IES, 2011.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria n.º 42, de 24 de fevereiro de 2021. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) que aperfeiçoa os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), especificando os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 45. p. 44-82, 09 mar. de 2021. Revogado.

JOÃO PESSOA. **Lei nº 1347, de 27 de abril de 1971**. Institui o código de obras do município de João Pessoa e dá outras providências. João Pessoa: Câmara Municipal, 1971.

JOSAI, T; HRASKA, J.; BACIGÁL, T. A simplified approach for the evaluation of the non-visual potential of daylight in side-lit rooms. **Slovak Journal of Civil Engineering**, Bratislava, v. 32. p. 18-28, 2024.

KONTADAKIS, A.; DOULOS, L.; MANTZOURANI, A.; TSANGRASSOULIS, A. Performance assessment of an active sunlight redirection system in areas with different climate: A comparison. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Thessaloniki, v. 410, 2020.

LAM, W. **Perception and lighting as formgivers for architecture**. New York: McGraw-Hill, 1977.

LAM, K. P.; WONG, N. H.; HENRY, F. A study of the use of performance-based simulation tools for building design and evaluation in Singapore. *In: Building simulation 1999: International IBPSA Conference, 4.*, Kyoto. **Proceedings** [...]. Kyoto: IBPSA, 1999. p. 675-682.

LARANJA, A. C.; GAZZANEO, L. M. C.; CABÚS, R. C. Regulamentações urbanas e edifícios: considerações sob o aspecto da iluminação natural em ambientes internos. *In: Encontro Latino-Americano, 6.*; Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, 10., Natal. **Anais** [...] Natal: ANTAC, 2009.

LI, D. H. W.; LI, S.; CHEN, W.; LOU, S. Simple correlations between point daylight factor, average daylight factor and vertical daylight factor under all sky conditions and building design implications. **Indoor and Building Environment**, [s. l.], v. 31, ed. 6, p. 1700-1716, 2022.

LI, S.; LI, D. H. W.; CHEN, W.; LOU, S.; TSANG, E. K. W. Simple mathematical models to link climate-based daylight metrics with daylight factor metrics and daylighting design implications. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 5, 2023.

LITTLEFAIR, P. Daylighting and solar control in buildings regulations. **Building Research Establishment Client Report CR398/99**, p. 1-27, 1999.

LOVE, J. A. The evolution of performance indicators for the evaluation of daylighting systems. **Industry Applications Society Annual Meeting**, [s. l.], v. 2, p. 1830-1836, 1992.

LUZ, B. **Distribuição da luz natural a partir de dutos de luz**. 2014. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LYNES, J. A.; LITTLEFAIR, P.J. Lighting energy savings from daylight: Estimation at the sketch design stage. **Lighting Research & Technology**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 129-137, 1990.

MACAPÁ. **Lei Complementar nº 31, de 24 de junho de 2004**. Institui o código de obras e instalações do município de Macapá e dá outras providências. Macapá: Câmara Municipal, 2004.

MACEIÓ. **Lei Municipal nº 5593, de 08 de fevereiro de 2007**. Institui o código de urbanismo e edificações do município de Maceió, estabelece o zoneamento da cidade de acordo com os parâmetros de macrozoneamento do plano diretor de desenvolvimento urbano (lei municipal n. 5.486, de 30 de dezembro de 2005) e dá outras providências. Maceió: Câmara Municipal, 2007.

MANAUS. **Lei Complementar nº 3, de 16 de janeiro de 2014**. Dispõe sobre o código de obras e edificações do município de Manaus e dá outras providências. Manaus: Câmara Municipal, 2014.

MANGKUTO, R. A.; ROHMAH, M.; ASRI, A. D. Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. **Applied Energy**, [s. l.], v. 164, p. 211-219, 2016

MARDALJEVIC, J. Daylighting science: A brief survey and suggestions for inclusion in the architectural curriculum. *In*: MATUSIAK, B. S.; ANTER, K. F. **Nordic light and colour 2012**. Trondheim: NTNU-trykk, 2013. p. 73-94.

MARDALJEVIC, J. Validation of a lighting simulation program under real sky conditions. **Lighting Research & Technology**, [s. l.], v. 27, n. 4, p.181-188, 1995.

MARDALJEVIC, J; HESCHONG, L; LEE, e. Daylight metrics and energy savings. **Lighting Research & Technology**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 261-283, 2009.

MARTINS, L. de O. **Fachada de vidro: reflexos da luz natural em uma cidade dos trópicos**. 2022. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

MATTONI, B.; BISEGNA, F.; MANGIONE, A.; RIZZO, G.; SCACCIANOCE, G.; ZINZI, M. Towards a more sustainable city: The role of the daylight factor in evaluating the energy requirements of buildings. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 7, n. 4, 2018.

MOON, P. **The Scientific Basis of Illuminating Engineering**. New York: Dover Publications, Inc.,1961.

MOORE, F. **Concepts and practice of architectural daylighting**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

MOSCHELLA, A.; AMATO, D.; GAGLIANO, A. Lighting characterization of an Italian beginning twentieth-century school building. **Renewable Energies & Power Quality Journal**, [s. l.], v. 21, n.3, 2023

NATAL. **Lei Complementar nº 055, de 27 de janeiro de 2004**. Institui o código de obras e edificações do município de Natal e dá outras providências. Natal: Câmara Municipal, 2004.

NETTO, A. R. A. **Melhoria no desempenho lumínico e energético de edifícios com prateleiras de luz**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

PALMAS. **Lei nº 45, de 20 de abril de 1990**. Código de edificações de Palmas. Palmas: Câmara Municipal, 1990.

PAULE, B. A.; KÄMPF, J. H.; DUBOIS, M.-C. Lighting retrofit in current practice: Results from a survey of IEA Task 50. *In*: CISBAT 2015, 13., 2015, Lausanne. **Proceedings** [...]. Lausanne: EPFL, 2015. p. 277-282.

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação natural em edifícios de escritório: metodologia**

para a avaliação do desempenho luminoso. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 2017.

PEREIRA, D. C. L.; MUELLER, C. M. Iluminação e sustentabilidade: a integração entre luz natural e artificial. **Lume Arquitetura**, São Paulo, v. 26, p. 28-35, jul. 2007.

PHUONG, N. H.; NGUYEN, L. D. L.; NGUYEN, V. H. M.; CUONG, V. V.; TUAN, T. M.; TUAN, P. A. A new approach in daylighting design for buildings. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, Greece, v. 13, n. 4, p. 11344–11354, 2023.

PORTO VELHO. **Lei nº 63, de 13 de abril de 1973.** Estabelece normativas para as edificações em geral e dá outras providências. Porto Velho: Câmara Municipal, 1973.

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1948-1958, set. 2010.

RECIFE. **Lei nº 16292, de 29 de janeiro de 1997.** Regula as atividades de edificações e instalações, no município de Recife, e dá outras providências. Recife: Câmara Municipal, 1997.

REINHART, C.F. **Tutorial on the use of Daysim simulations for sustainable design.** Ottawa: IRC, 2006

REINHART, C.; BRETON, PF. Experimental validation of 3ds Max® design 2009 and Daysim 3.0. *In: Building simulation 2009: International IBPSA Conference*, 11., Glasgow. **Proceedings** [...]. Glasgow: IBPSA, 2009. p. 1514-1521.

REINHART, C.; FITZ, A. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 38, p. 824-835, jul. 2006.

REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces. **Building and Environment**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 386-396, 2011.

REINHART, C.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **LEUKOS**, Ottawa, v. 3, n. 1, p. 7-31, set. 2006.

REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 683-697, set. 2001.

RIBEIRO, P. V. S. **A malha de pontos de simulação e o cálculo das métricas de avaliação de desempenho da luz natural:** Estudo e proposta de distribuições não uniformes. 2020. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

RIBEIRO, P. V. S.; CABÚS, R. C. Análise da influência da malha de pontos em índices de avaliação de desempenho da luz natural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 317-333, out./dez. 2019.

RIBEIRO, P. V. S.; CABÚS, R. C. Ray tracing algorithm to simulate laser-cut panel light-redirecting elements. **Journal of Daylighting**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 87-98, jun. 2023.

RIO BRANCO. **Lei Complementar nº 48, de 25 de julho de 2018**. Aprova e institui a revisão do código de obras e edificações do município de Rio Branco e dá outras providências. Rio Branco: Câmara Municipal, 2018.

RIO DE JANEIRO. **Lei Complementar nº 198, de 14 de janeiro de 2019**. Institui o código de obras e edificações simplificado do município do Rio de Janeiro – COES. Rio de Janeiro: Câmara Municipal, 2019.

RIZZARDI, A. F. **Investigação sobre percepção visual e medidas de avaliação da iluminação natural**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2018.

RODZI, K. A. M.; MOHAMOUD, M. Z.; HANAPI, N. A. Sustainability assessment of mosque: A case study of design proposal in Bandar Bertam Jaya, Penang. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Thessaloniki, v. 1022, 2022.

SALVADOR. **Lei nº 3903, de 27 de julho de 1988**. Institui normas relativas à execução de obras do município do Salvador, alterando as Leis nº 2403/72 e 3077/79 e dá outras providências. Salvador: Câmara Municipal, 1988.

SANTOS, E. N. dos. **Sob a luz do habitar**: impacto de reformas autogeridas no desempenho luminoso de unidades habitacionais de interesse social. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

SÃO LUÍS. **Lei – Delegada nº 033, de 11 de maio de 1976**. Reestrutura o código de construções e dá outras providências. São Luís: Câmara Municipal, 1976.

SÃO PAULO (Município). **Lei nº 16642, de 9 de maio de 2017**. Aprova o código de obras e edificações do município de São Paulo; introduz alterações nas Leis nº 15.150, de 6 de maio de 2010, e nº 15764, de 27 de maio de 2013. São Paulo: Secretaria do Governo Municipal, 2017.

SIEM, G.; SOSA, M. E. Revisión de las normas venezolanas referentes a las exigências térmicas, acústicas y de iluminación bajo una perspectiva de sostenibilidad. **Tecnología y Construcción**, v. 17, n. 2, p. 29-34, 2001.

SLATER, A. I; BOYCE, P. R. Illuminance uniformity on desks: Where is the limit? **Lighting Research & Technology**, [s. l.], v. 4, n. 22, p. 165-174, 1990.

STEWART, K. **New Zealand building code clause G7 compliance assessment**

tool: development and implementation. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência da Construção) – Victoria University of Wellington, Wellington, 2008.

TERESINA. **Lei Complementar nº 4729, de 10 de junho de 2015.** Dispõe sobre o código de obras e edificações de Teresina e dá outras providências. Teresina: Câmara Municipal, 2015.

TOLEDO, G. E.; PELEGRINI, A. V. Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar. **Cadernos do PROARQ**, Rio de Janeiro, v. 20, p. 166-182, 2013.

TREGENZA, P.; LOE, D. **The design of lighting.** London: Routledge, 2009.

TREGENZA, P.; WILSON, M. **Daylighting: Architecture and lighting design.** Abingdon: Routledge, 2011.

TROTTER, A. P. **Illumination: Its distribution and measurement.** London: Macmillan and Co. Limited, 1911.

TSAGRASSOULIS, A.; KONTADAKIS, A.; ROETZEL, A. Comparing climate based daylight modelling with daylight factor assessment – implications for architects. *In: International Conference of the Architectural Science Association*, 49., 2015, Melbourne. **Proceedings** [...]. Melbourne: University of Melbourne, 2015. p. 1097-1106.

VASCONCELLOS, L. T. de. **Luz natural e latitude: A influência da localização geográfica no desempenho luminoso de projeto padrão de sala de aula.** 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

VASCONCELLOS, L. T. de M.; CABÚS, R. C. Influência do ângulo vertical de obstrução em diferentes latitudes no desempenho da luz natural em projeto padrão de sala de aula. **Cadernos do PROARQ**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 37, p. 139-158, 2021.

VITÓRIA. **Lei nº 4821, de 30 de dezembro de 1998.** Institui o código de edificações do município de Vitória e dá outras providências. Vitória: Câmara Municipal, 1998.

WARD, G. J. The Radiance lighting simulation and rendering system. *In: Computer Graphics and Interactive Techniques. Proceedings* [...]. Orlando: SIGGRAPH, 1994. p. 459-472.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO DO FLD MÉDIO

Figura 28 – Tabela utilizada como base para o cálculo do FLD Médio

Base para cálculo do FLD Médio		
Parâmetros comuns a todos os modelos	Valor	Unidade
Largura da sala	4,000	m
Profundidade da sala	4,000	m
Área do piso	16,000	m ²
Área das paredes	45,600	m ²
Área do teto	16,000	m ²
Área total das superfícies (At)	77,600	m ²
Altura das janelas	1,000	m
Espessura da parede	0,150	m
Pé-direito	2,850	m
Transmitância (T)	0,880	-
Refletância do piso	0,300	-
Refletância das paredes	0,715	-
Refletância do teto	0,900	-
Refletância média ponderada (R ²)	0,668	-
Variações		
Proporção área de janela/área de piso	1/4	-
	1/6	-
	1/8	-
	1/10	-
Área da janela 1/4 (1,00 m x 4,00 m)	4,000	m ²
Área da janela 1/6 (1,00 m x 2,70 m)	2,700	m ²
Área da janela 1/8 (1,00 m x 2,00 m)	2,000	m ²
Área da janela 1/10 (1,00 m x 1,60 m)	1,600	m ²
Ângulo de céu visível (θ)	73,300	graus
	30,000	graus
FLD Médio		
Para θ = 73° e janela de 1/4	6,000	%
Para θ = 73° e janela de 1/6	4,050	%
Para θ = 73° e janela de 1/8	3,000	%
Para θ = 73° e janela de 1/10	2,400	%
Para θ = 30° e janela de 1/4	2,450	%
Para θ = 30° e janela de 1/6	1,660	%
Para θ = 30° e janela de 1/8	1,230	%
Para θ = 30° e janela de 1/10	0,980	%

Fonte: A autora (2024).

APÊNDICE B – BASE DE DADOS DOS GRÁFICOS DE DISPERSÃO

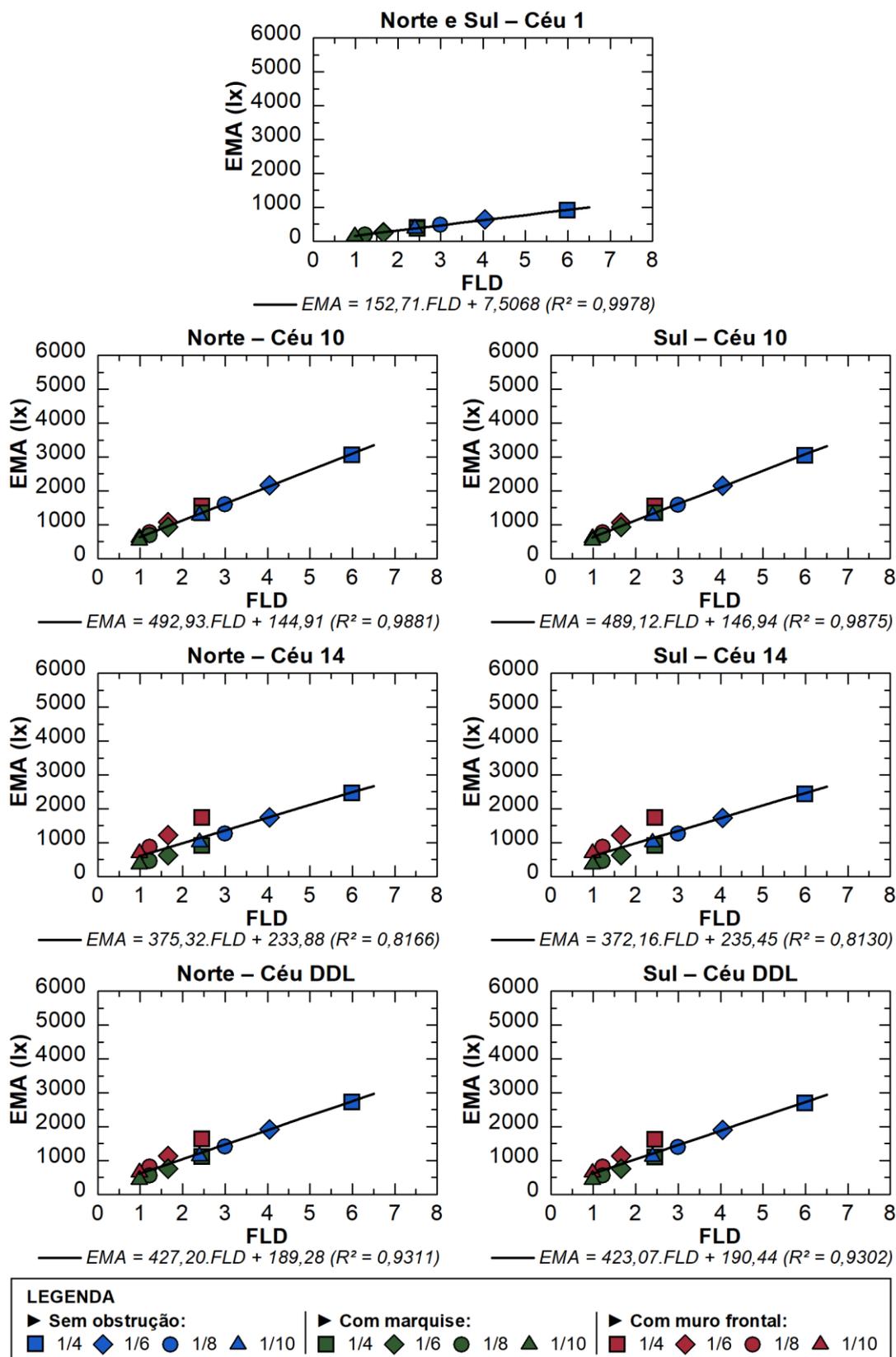
Figura 29 – Dados utilizados para gerar os gráficos comparativos do FLD Médio e as métricas dinâmicas

Base para gráficos de dispersão										
Nº	Obstrução	Janela	Latitude	Tipo de céu	Código para localização	FLD	EMA			
							Sul	Oeste	Norte	Leste
1	Sem obstrução	1/4	0°	1	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C1	6,00	908,4	908,4	908,4	908,4
2	Sem obstrução	1/4	0°	10	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C10	6,00	3031,5	4076,0	3051,9	4123,4
3	Sem obstrução	1/4	0°	14	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C14	6,00	2433,8	4588,6	2450,8	4684,0
4	Sem obstrução	1/4	0°	DDL	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_DDL	6,00	2687,3	4295,4	2710,3	4406,9
5	Sem obstrução	1/4	10°	1	LP4x4LAT10SEM_OBSJ4_C1	6,00	892,6	892,6	892,6	892,6
...
144	Marquise	1/10	20°	DDL	LP4x4LAT20_MARQJ10_DDL	0,98	308,2	500,5	411,0	513,0
Nº	Obstrução	Janela	Latitude	Tipo de céu	Código para localização	FLD	ALN			
							Sul	Oeste	Norte	Leste
1	Sem obstrução	1/4	0°	1	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C1	6,00	85,0	85,0	85,0	85,0
2	Sem obstrução	1/4	0°	10	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C10	6,00	98,8	98,8	98,8	100,0
3	Sem obstrução	1/4	0°	14	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C14	6,00	100,0	100,0	99,9	100,0
4	Sem obstrução	1/4	0°	DDL	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_DDL	6,00	99,3	99,3	99,3	99,9
5	Sem obstrução	1/4	10°	1	LP4x4LAT10SEM_OBSJ4_C1	6,00	83,4	83,4	83,4	83,4
...
144	Marquise	1/10	20°	DDL	LP4x4LAT20_MARQJ10_DDL	0,98	42,9	61,2	56,1	63,9
Nº	Obstrução	Janela	Latitude	Tipo de céu	Código para localização	FLD	ALNe			
							Sul	Oeste	Norte	Leste
1	Sem obstrução	1/4	0°	1	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C1	6,00	100,0	100,0	100,0	100,0
2	Sem obstrução	1/4	0°	10	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C10	6,00	100,0	100,0	100,0	100,0
3	Sem obstrução	1/4	0°	14	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C14	6,00	100,0	100,0	100,0	100,0
4	Sem obstrução	1/4	0°	DDL	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_DDL	6,00	100,0	100,0	100,0	100,0
5	Sem obstrução	1/4	10°	1	LP4x4LAT10SEM_OBSJ4_C1	6,00	100,0	100,0	100,0	100,0
...
144	Marquise	1/10	20°	DDL	LP4x4LAT20_MARQJ10_DDL	0,98	26,5	89,8	69,4	91,8
Nº	Obstrução	Janela	Latitude	Tipo de céu	Código para localização	FLD	UMA			
							Sul	Oeste	Norte	Leste
1	Sem obstrução	1/4	0°	1	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C1	6,00	35,6	35,6	35,6	35,6
2	Sem obstrução	1/4	0°	10	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C10	6,00	47,5	41,6	47,1	41,5
3	Sem obstrução	1/4	0°	14	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_C14	6,00	51,8	41,1	51,0	40,4
4	Sem obstrução	1/4	0°	DDL	LP4x4LAT0SEM_OBSJ4_DDL	6,00	49,6	41,3	48,9	40,7
5	Sem obstrução	1/4	10°	1	LP4x4LAT10SEM_OBSJ4_C1	6,00	36,5	36,5	36,5	36,5
...
144	Marquise	1/10	20°	DDL	LP4x4LAT20_MARQJ10_DDL	0,98	43,6	38,0	42,8	38,3

Fonte: A autora (2024).

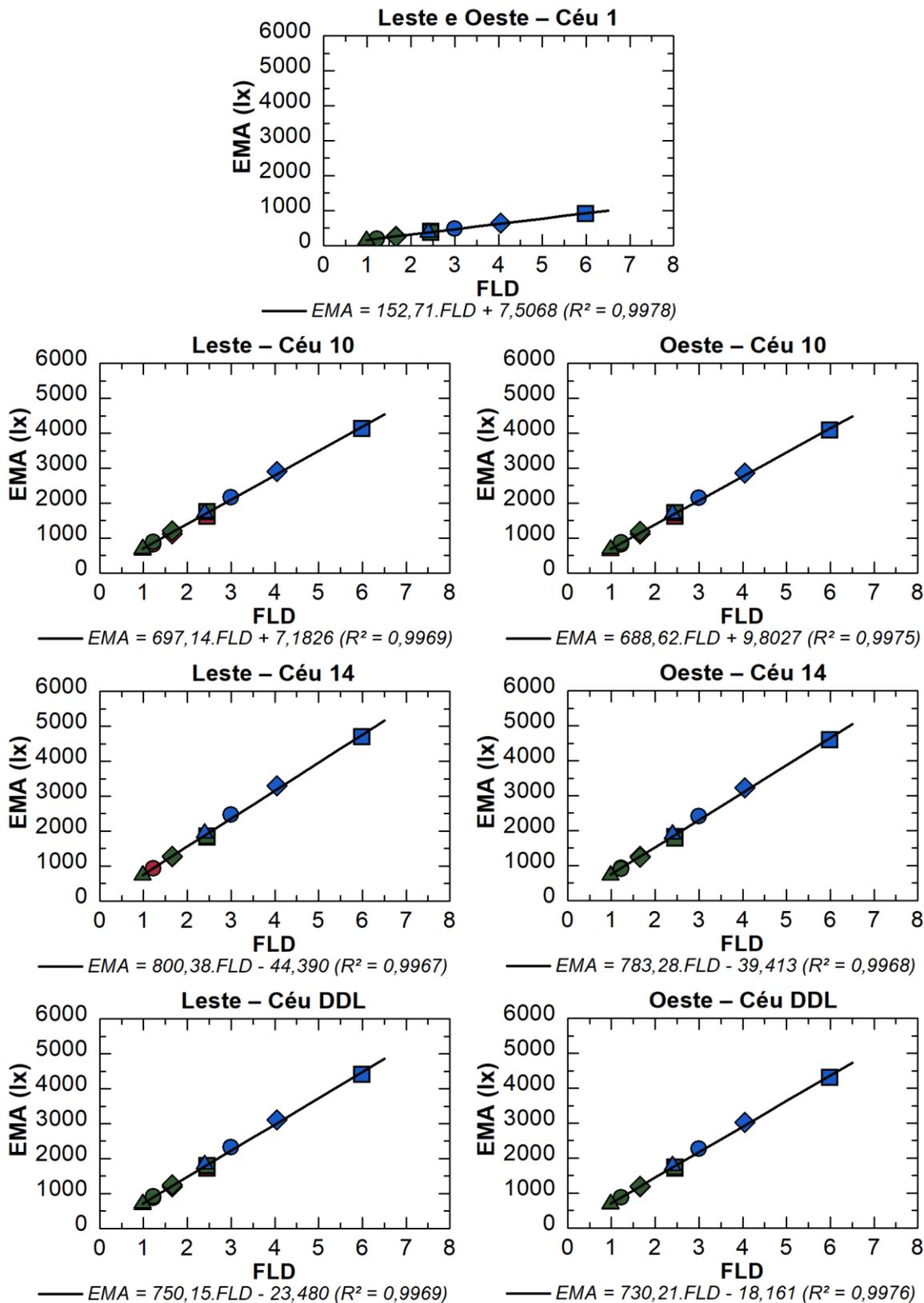
APÊNDICE C – GRÁFICOS REFERENTES À CIDADE DE MACAPÁ-AP

Figura 30 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)



Fonte: A autora (2024).

Figura 31 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)



LEGENDA

▶ Sem obstrução:

■ 1/4 ◆ 1/6 ● 1/8 ▲ 1/10

▶ Com marquise:

■ 1/4 ◆ 1/6 ● 1/8 ▲ 1/10

▶ Com muro frontal:

■ 1/4 ◆ 1/6 ● 1/8 ▲ 1/10

Fonte: A autora (2024).

Figura 32 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)

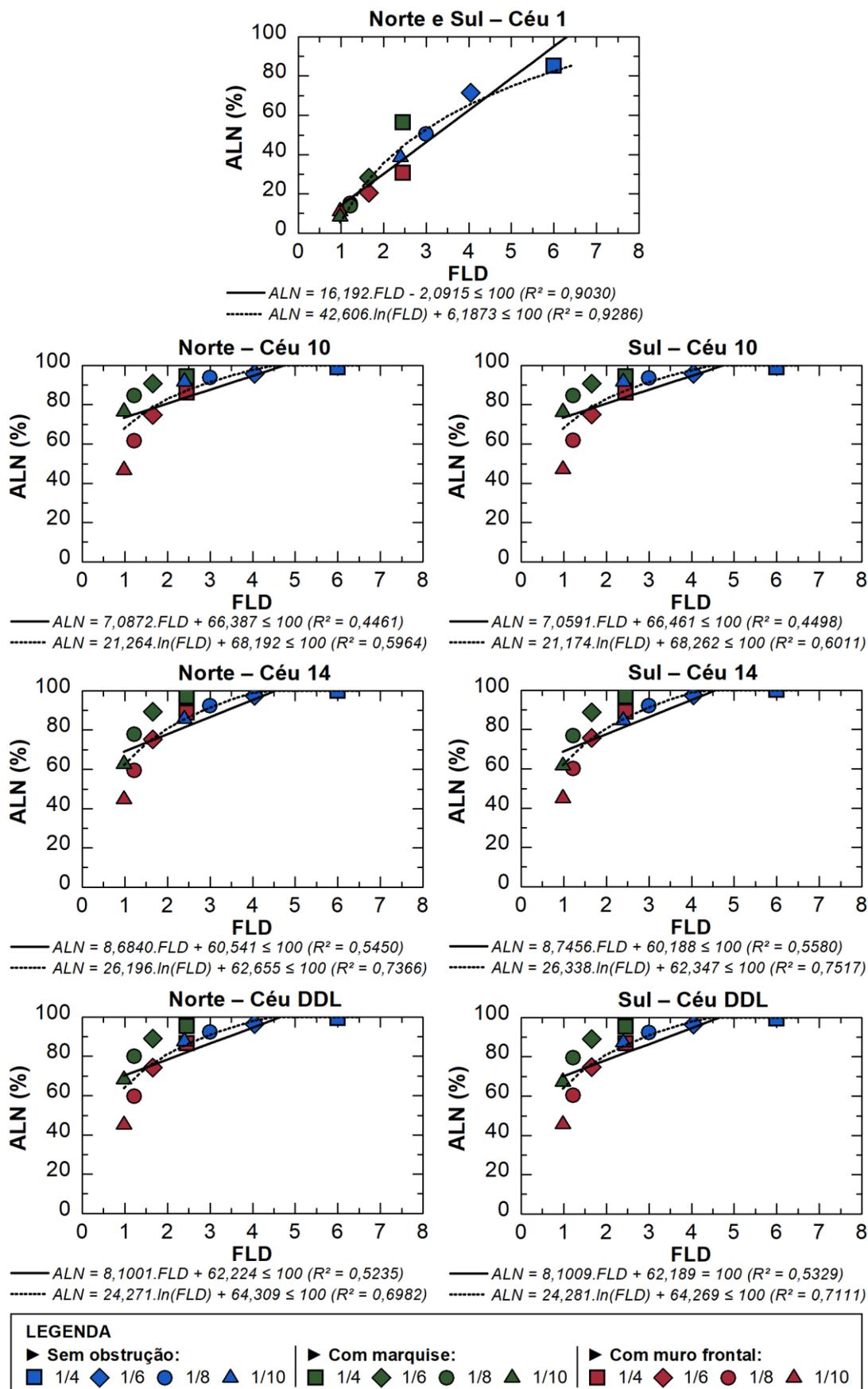


Figura 33 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)

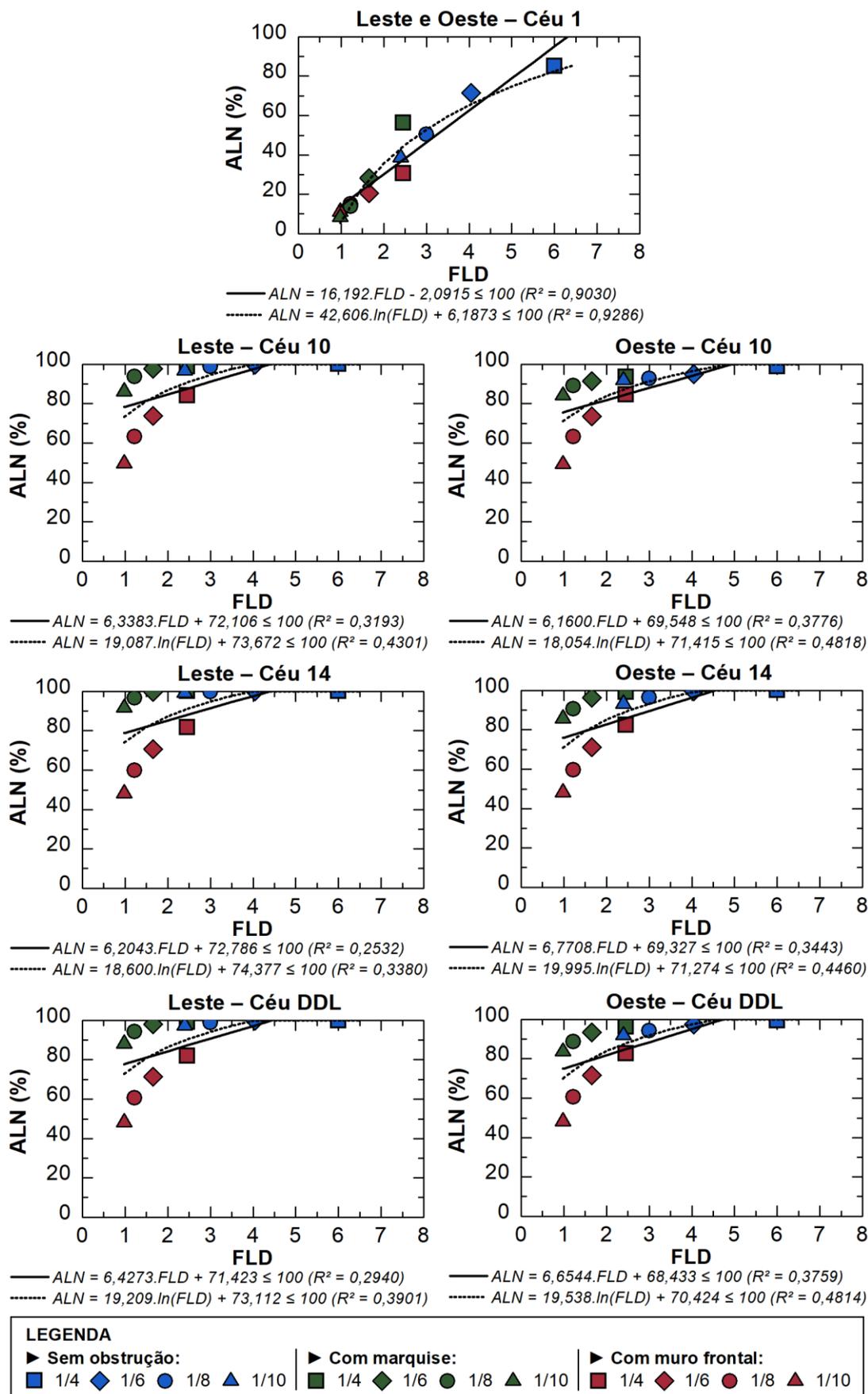
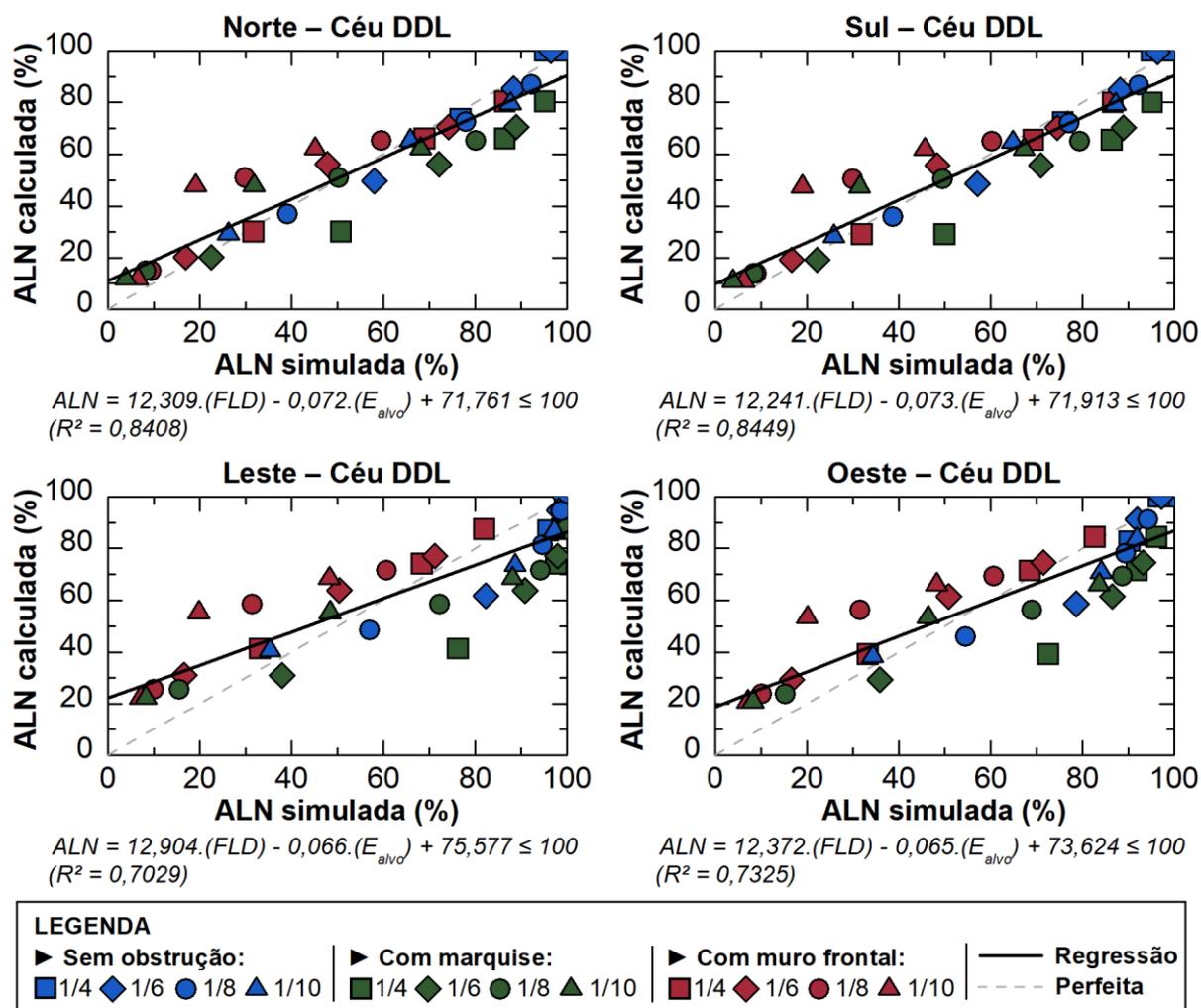
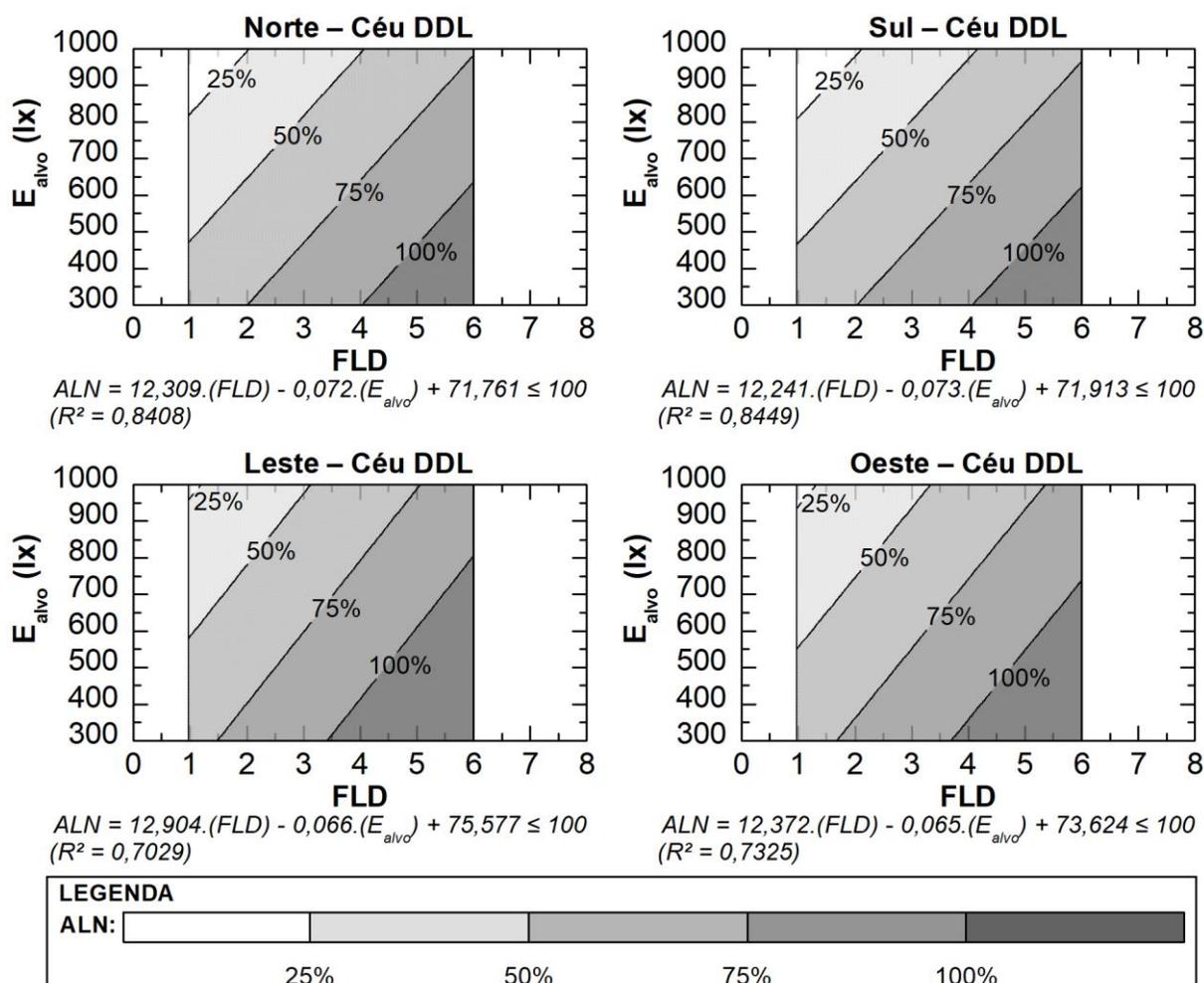


Figura 34 – ALN simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)



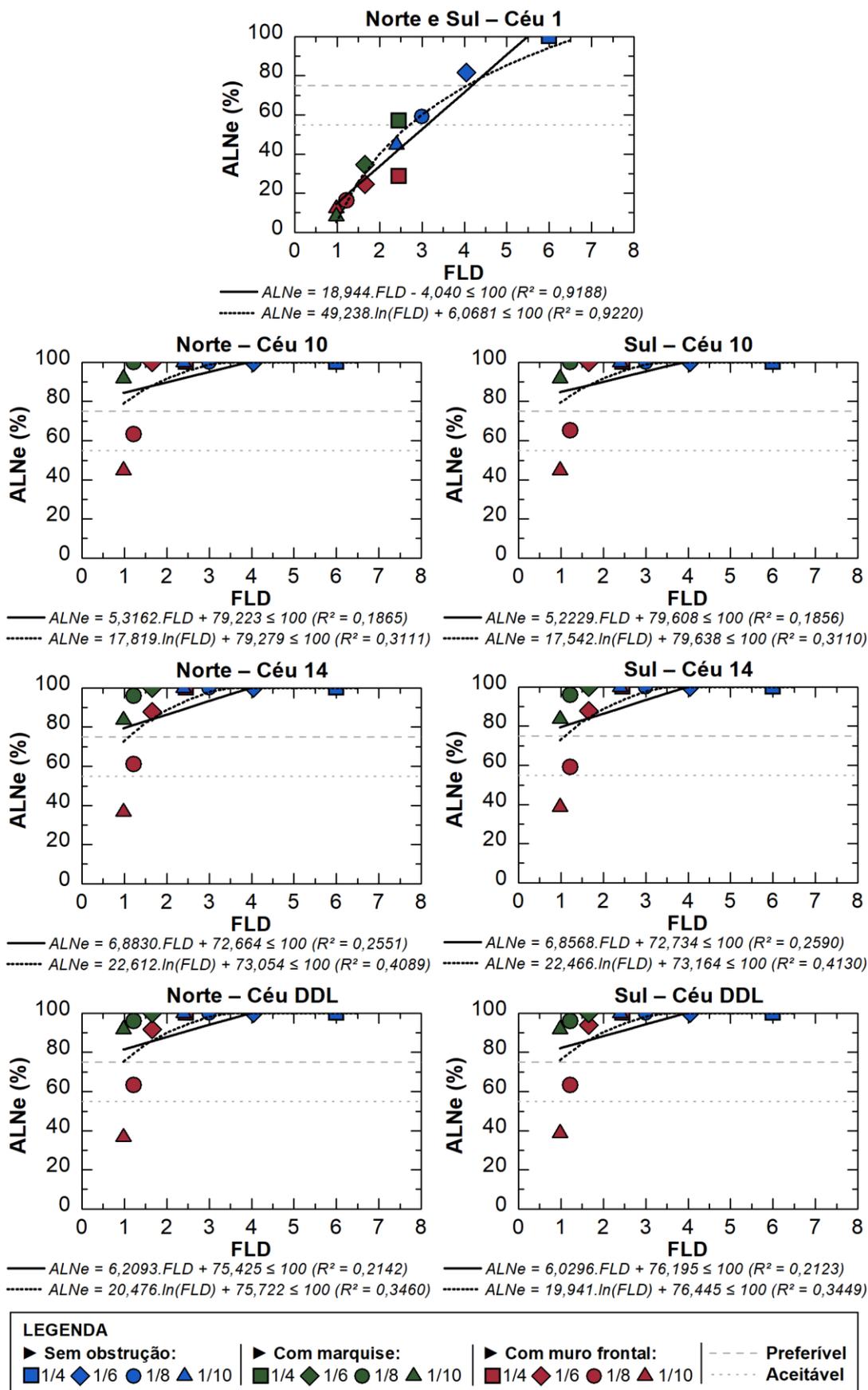
Fonte: A autora (2024).

Figura 35 – FLD Médio X ALN X E_{alvo}: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)



Fonte: A autora (2024).

Figura 36 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)



Fonte: A autora (2024).

Figura 37 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)

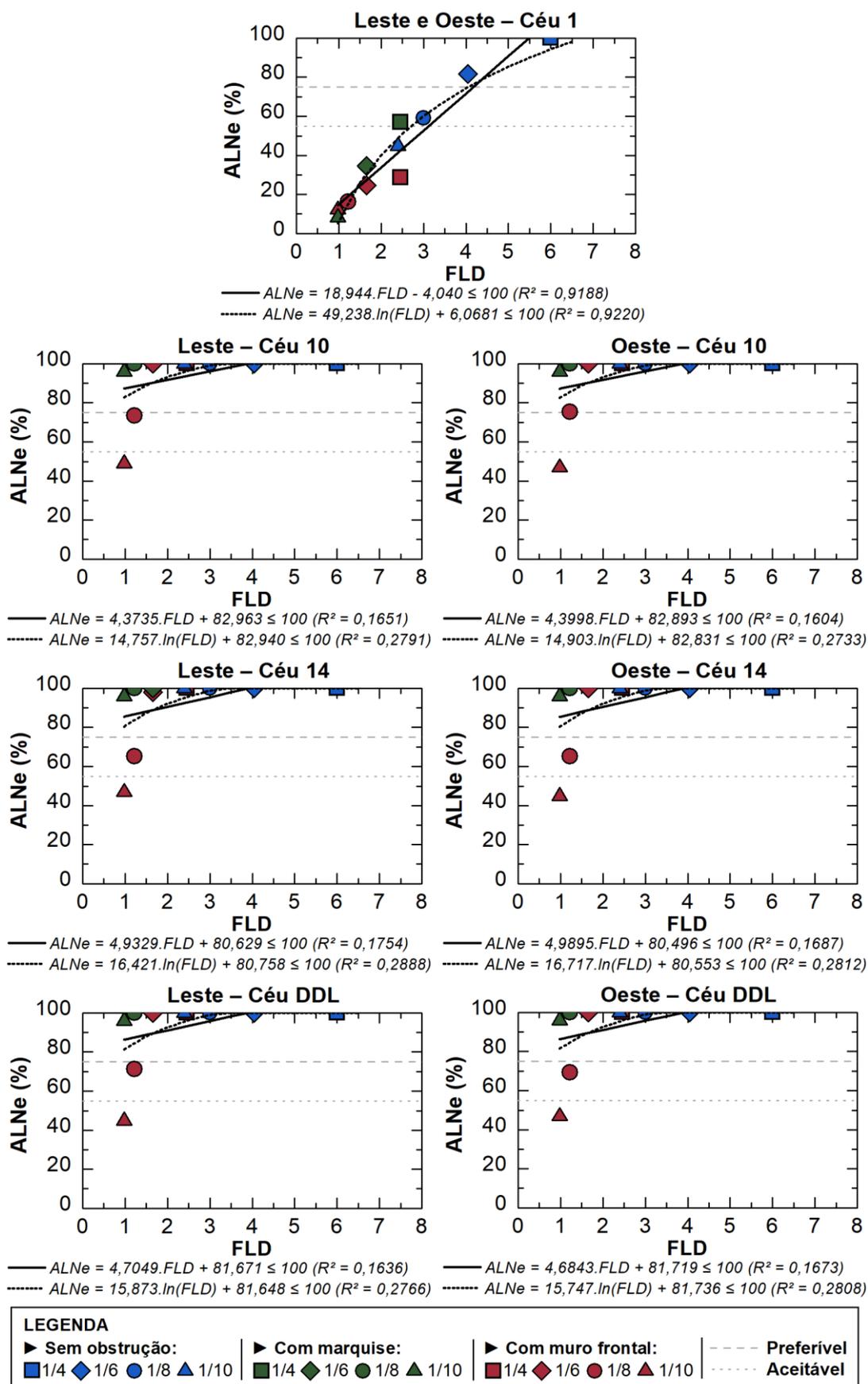
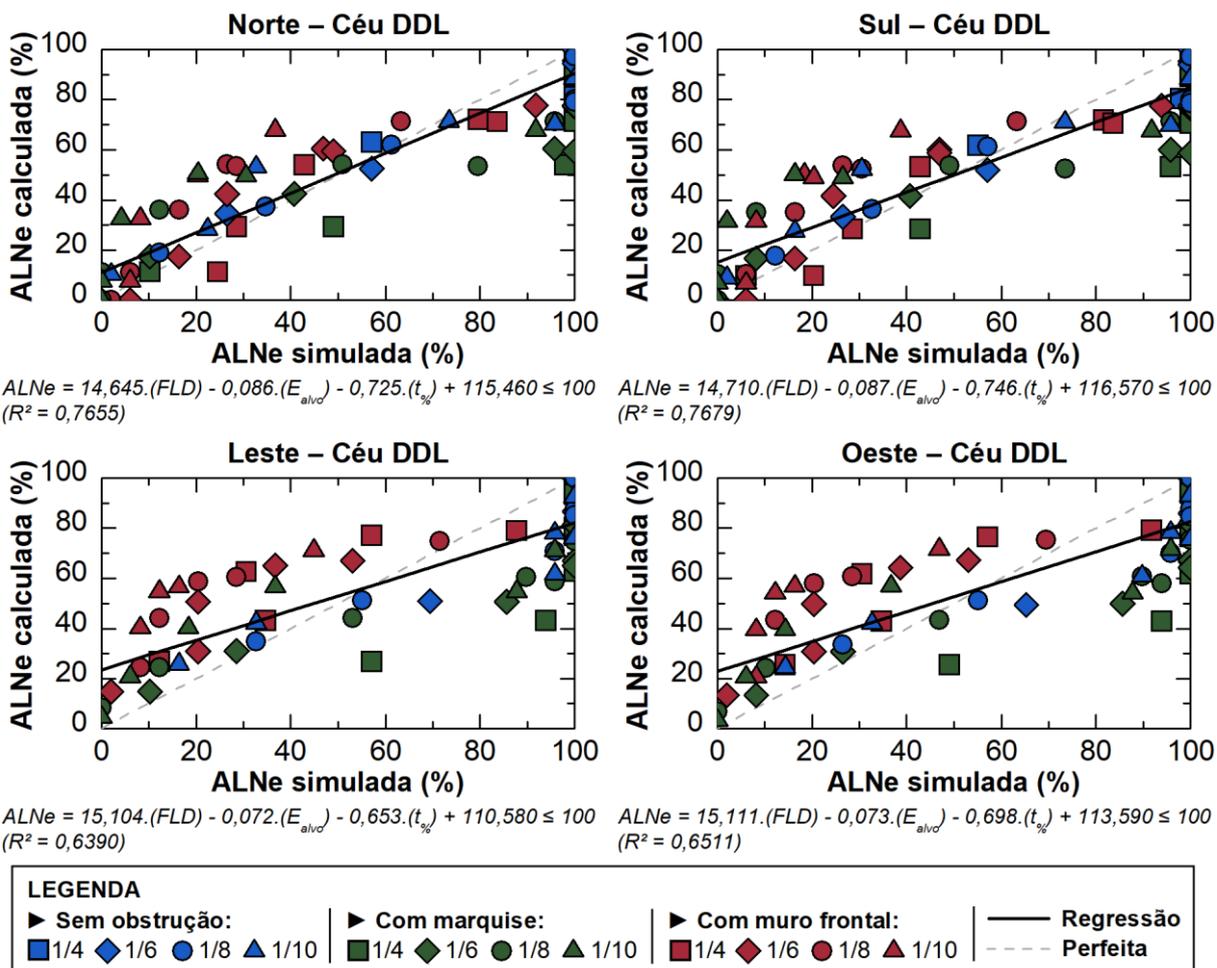
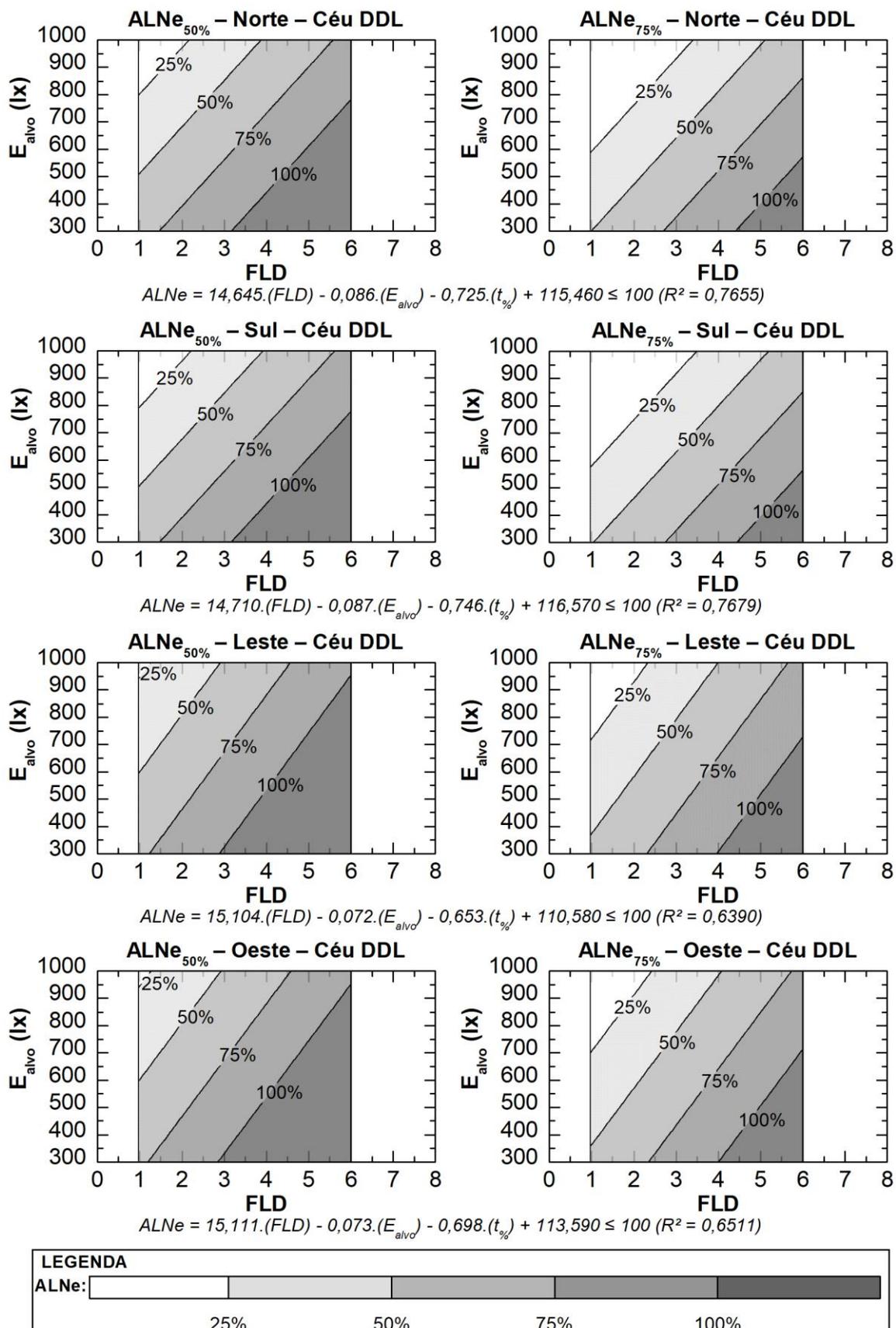


Figura 38 – ALNe simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)



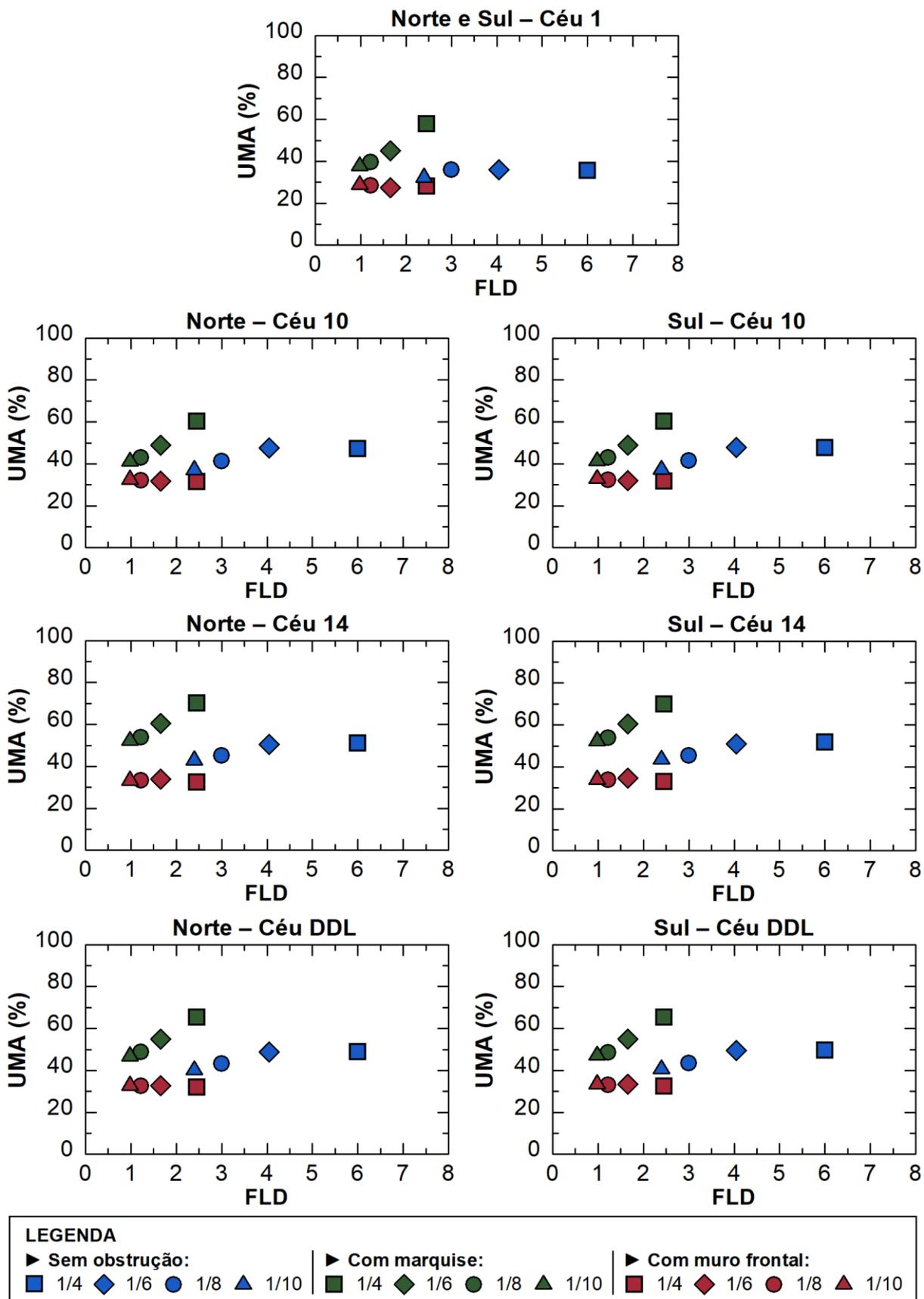
Fonte: A autora (2024).

Figura 39 – ALNe X FLD Médio X E_{alvo} X t%: Norte, Sul, Leste e Oeste (Macapá-AP)



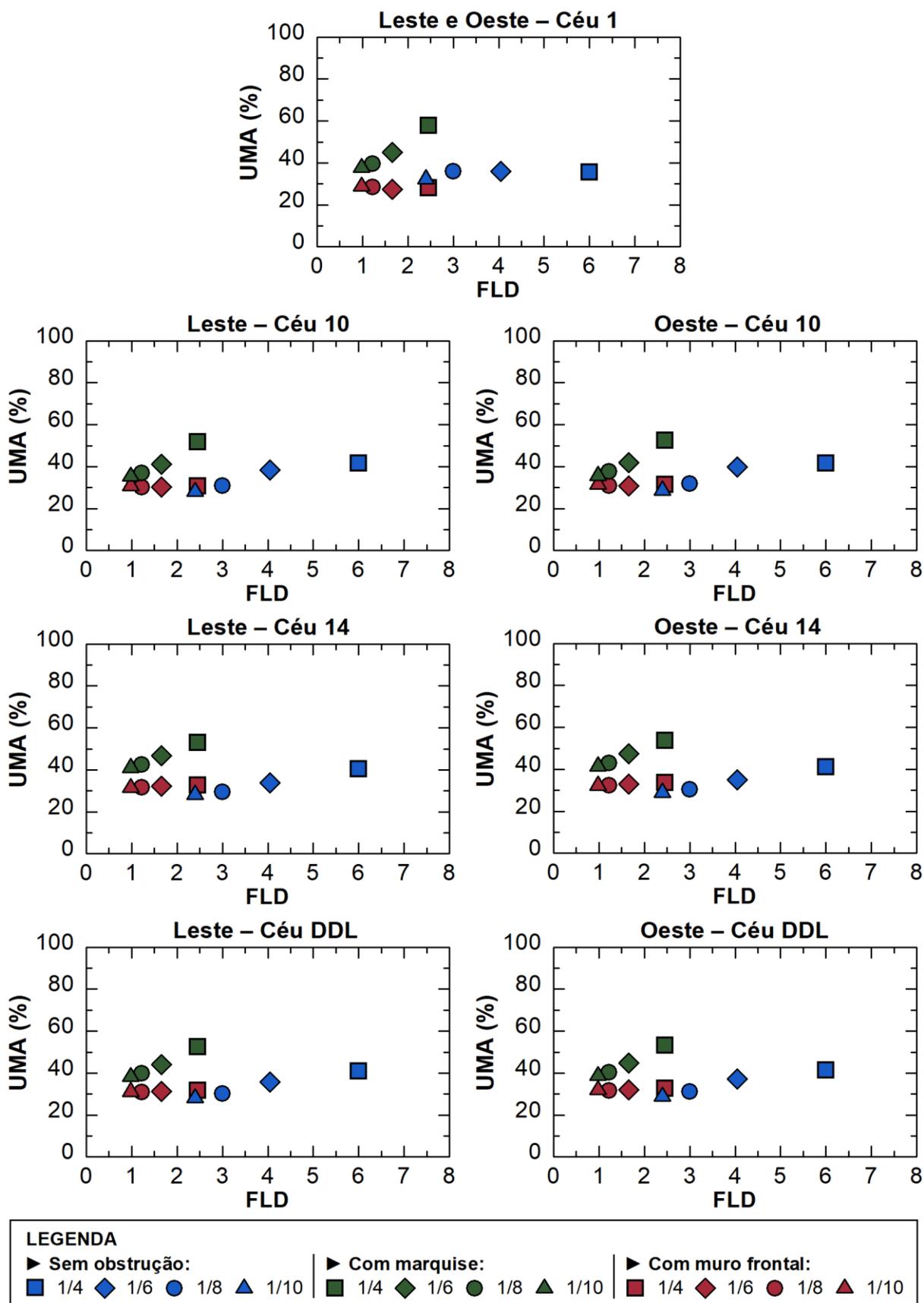
Fonte: A autora (2024).

Figura 40 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Macapá-AP)



Fonte: A autora (2024).

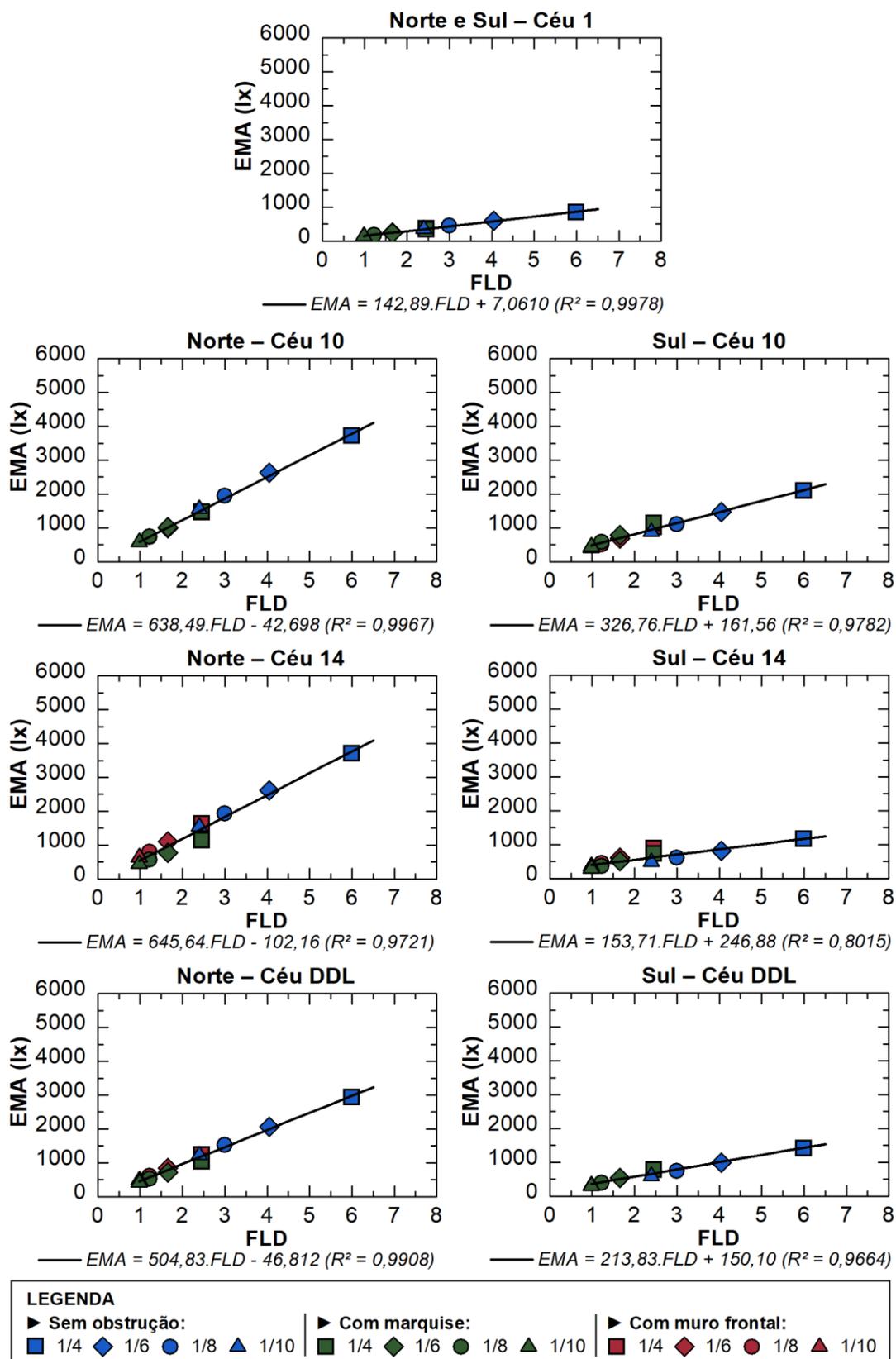
Figura 41 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Macapá-AP)



Fonte: A autora (2024).

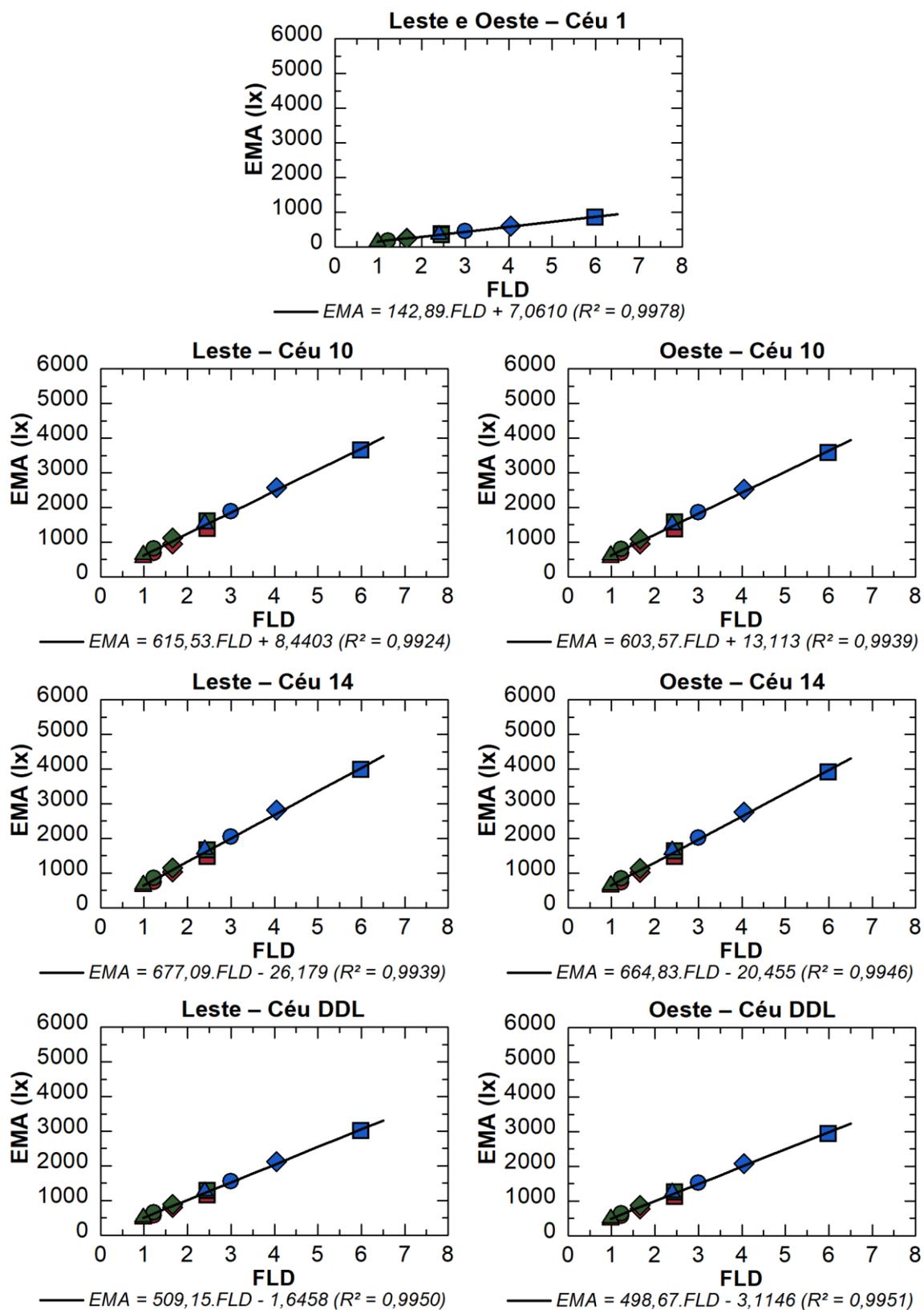
APÊNDICE D – GRÁFICOS REFERENTES À CIDADE DE VITÓRIA-ES

Figura 42 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES)



Fonte: A autora (2024).

Figura 43 – EMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES)



LEGENDA

▶ **Sem obstrução:**

■ 1/4 ◆ 1/6 ● 1/8 ▲ 1/10

▶ **Com marquise:**

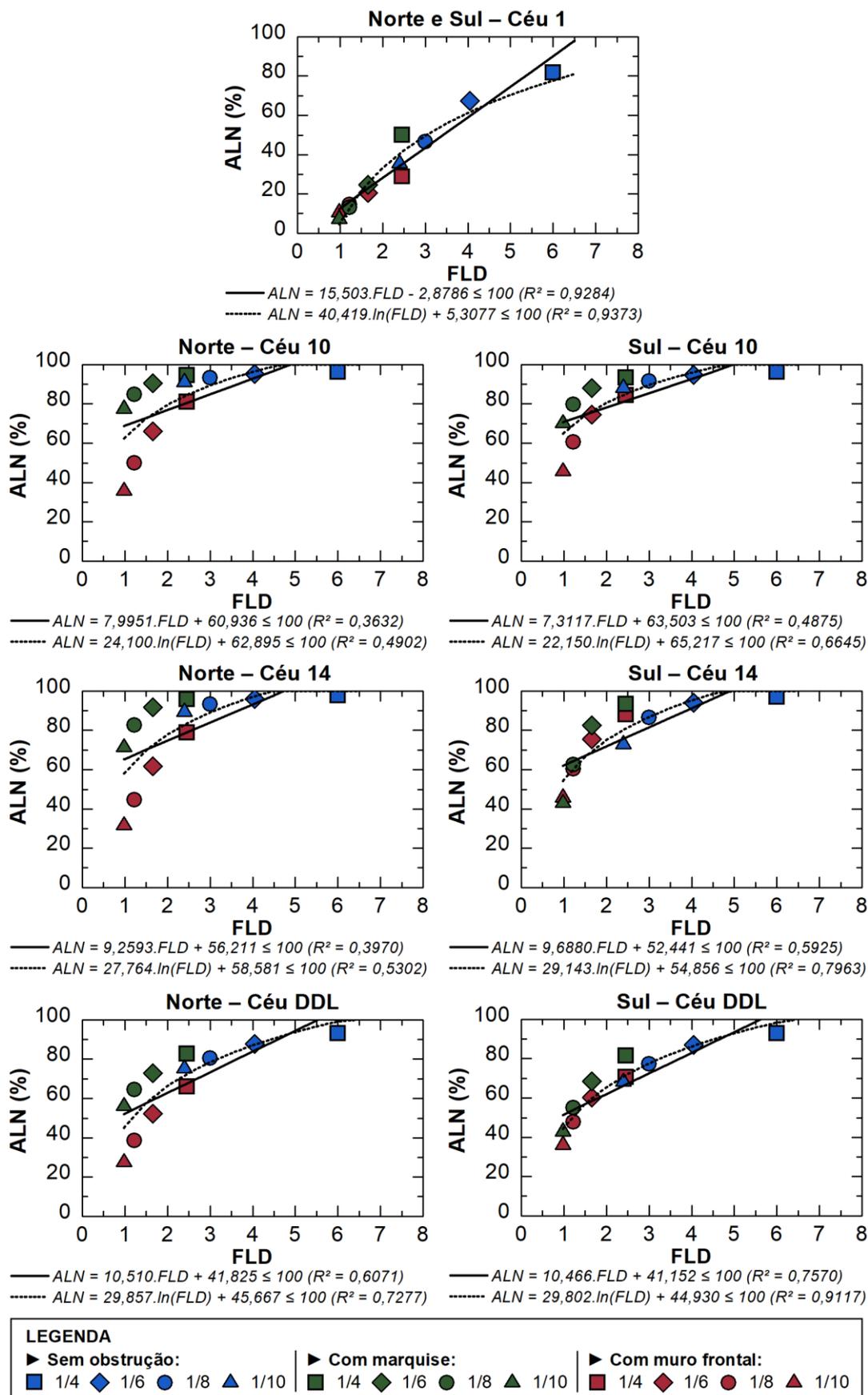
■ 1/4 ◆ 1/6 ● 1/8 ▲ 1/10

▶ **Com muro frontal:**

■ 1/4 ◆ 1/6 ● 1/8 ▲ 1/10

Fonte: A autora (2024).

Figura 44 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES)



Fonte: A autora (2024).

Figura 45 – ALN (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES)

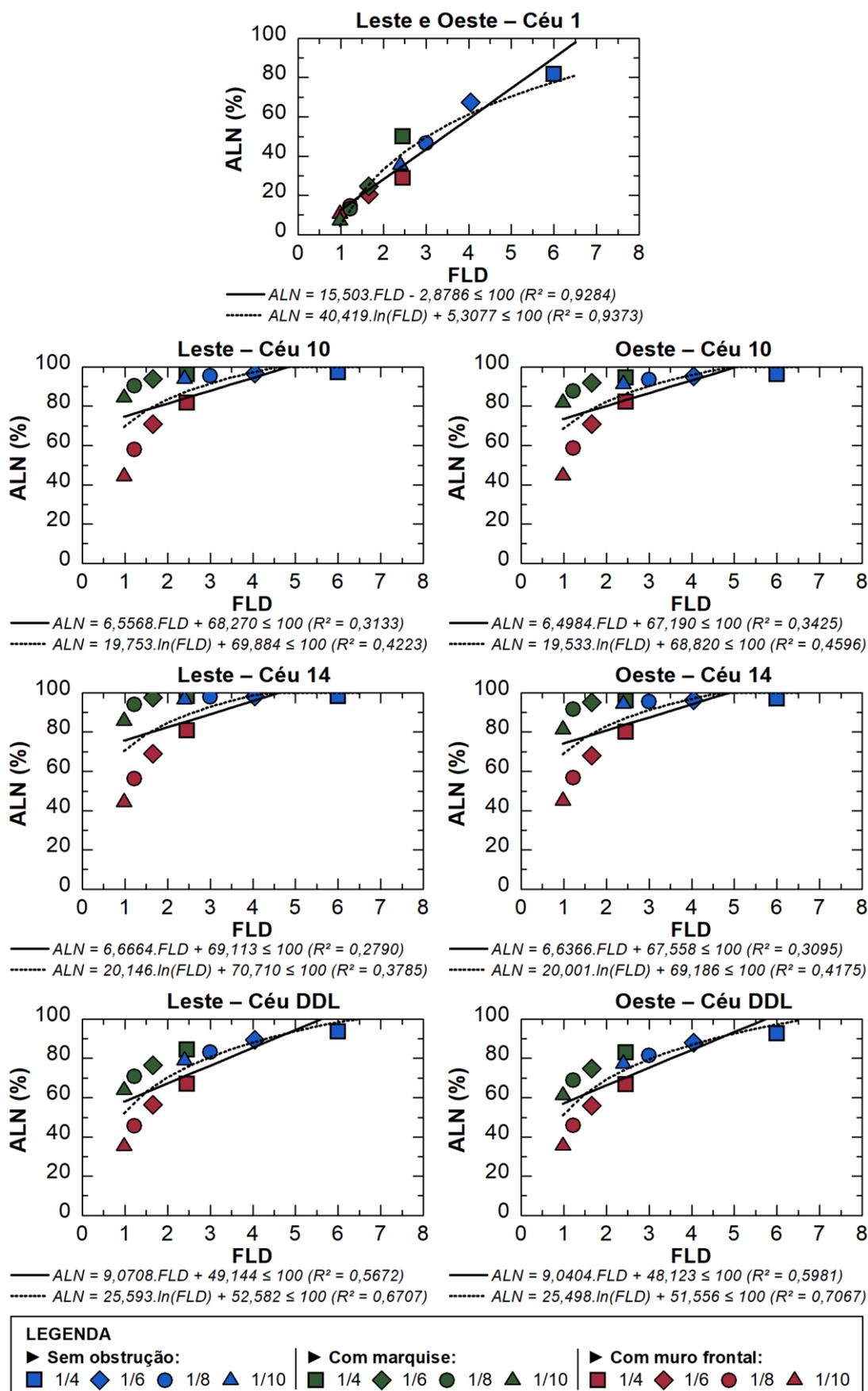
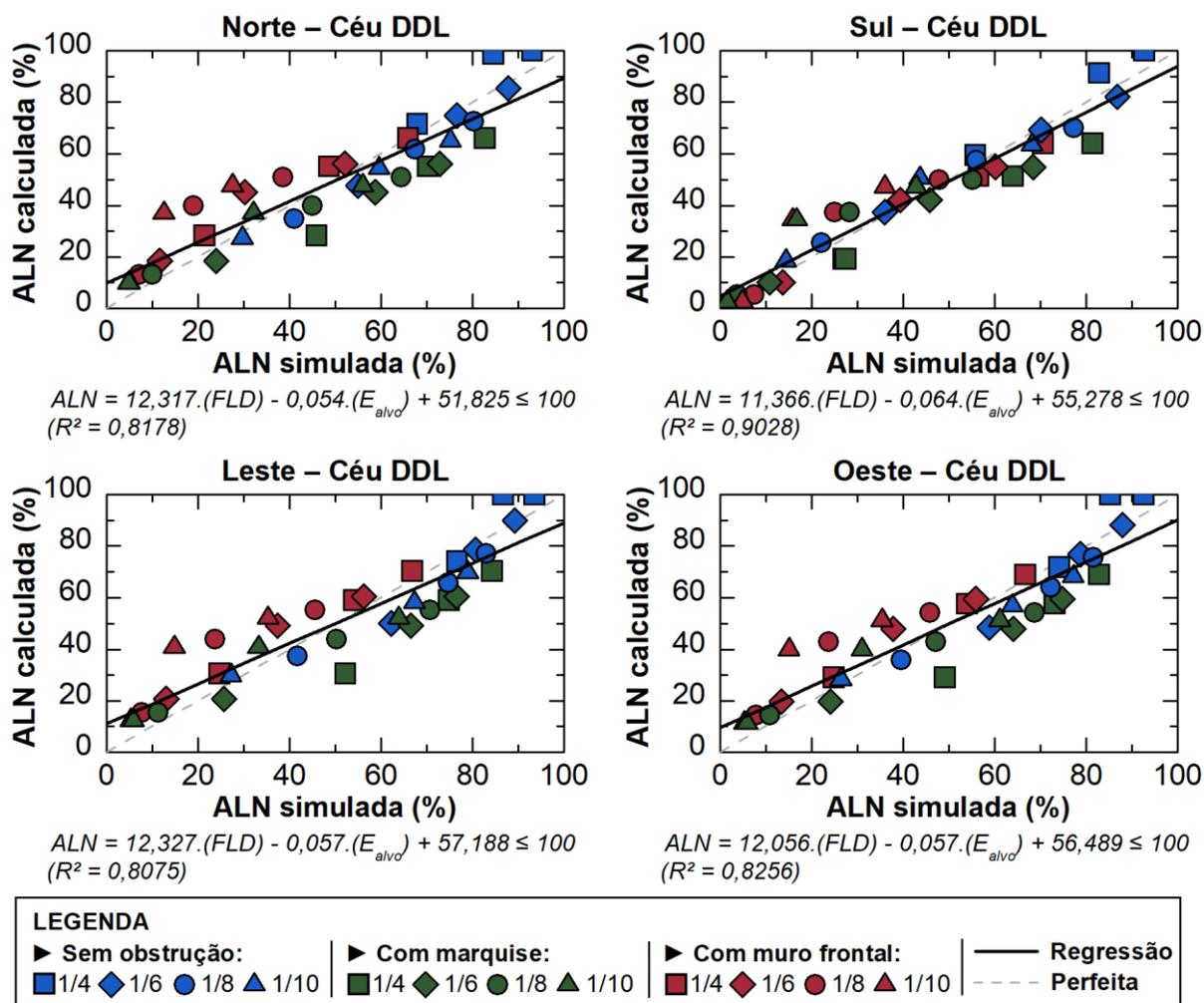
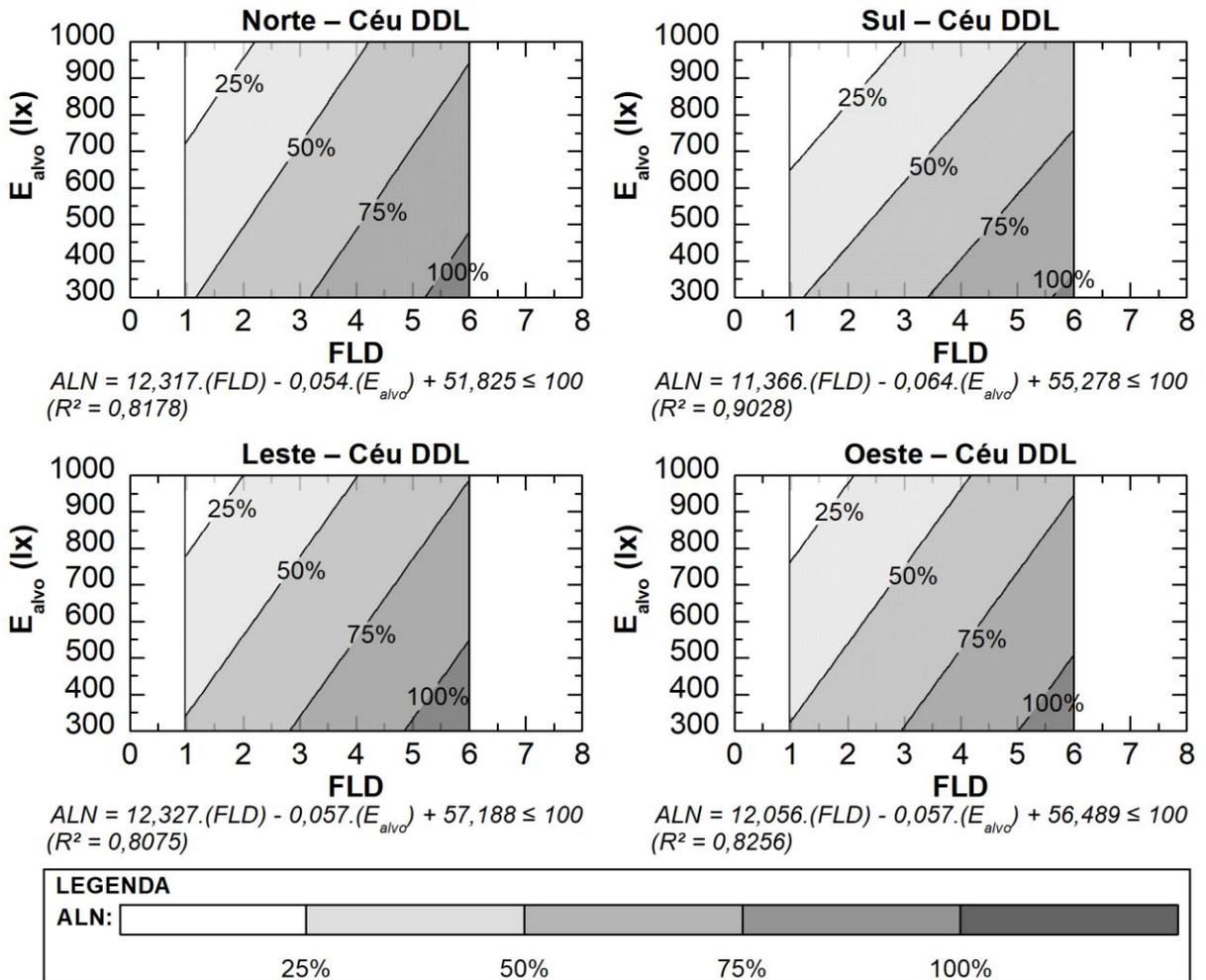


Figura 46 – ALN simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES)



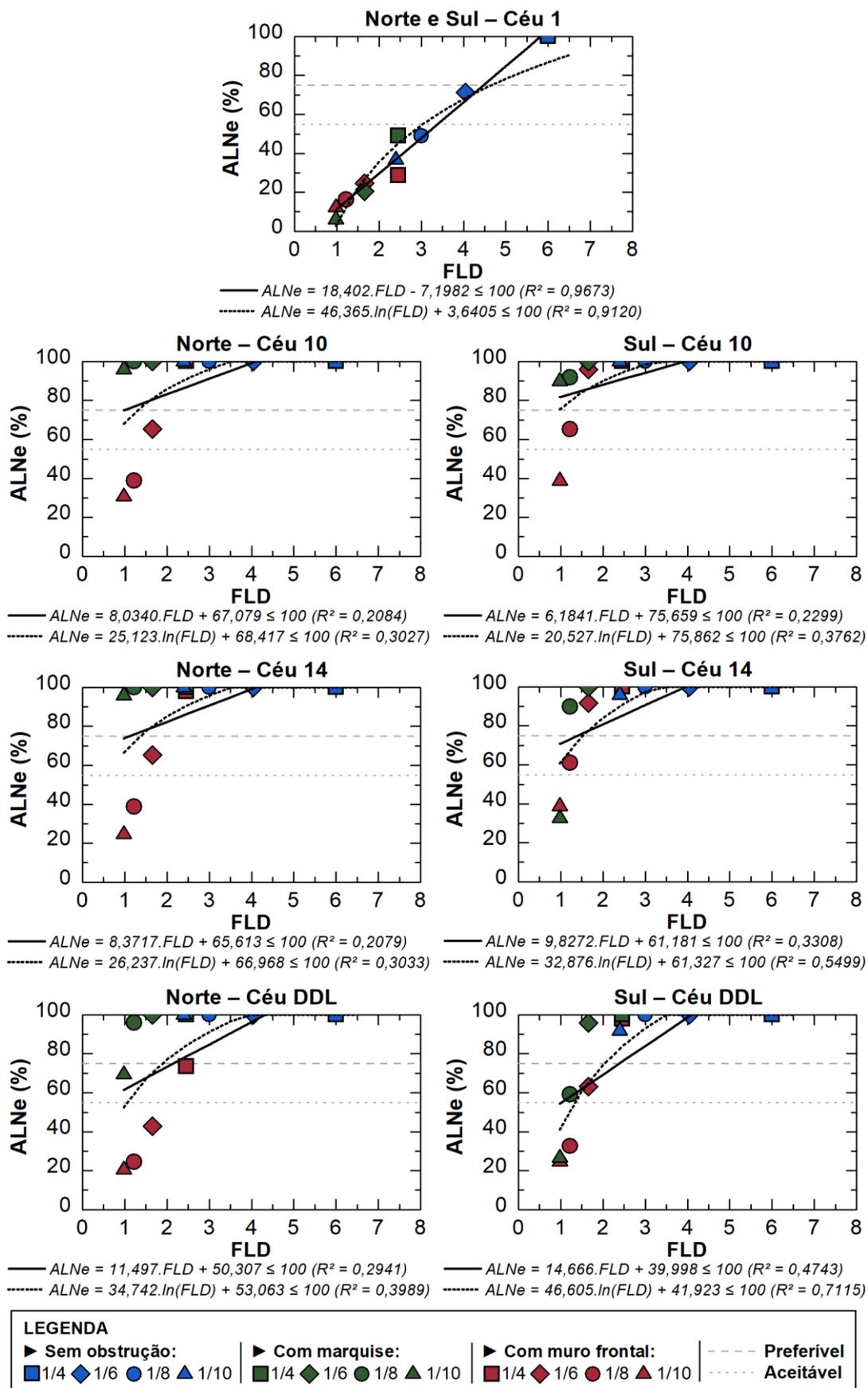
Fonte: A autora (2024).

Figura 47 – FLD Médio X ALN X E_{alvo}: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES)



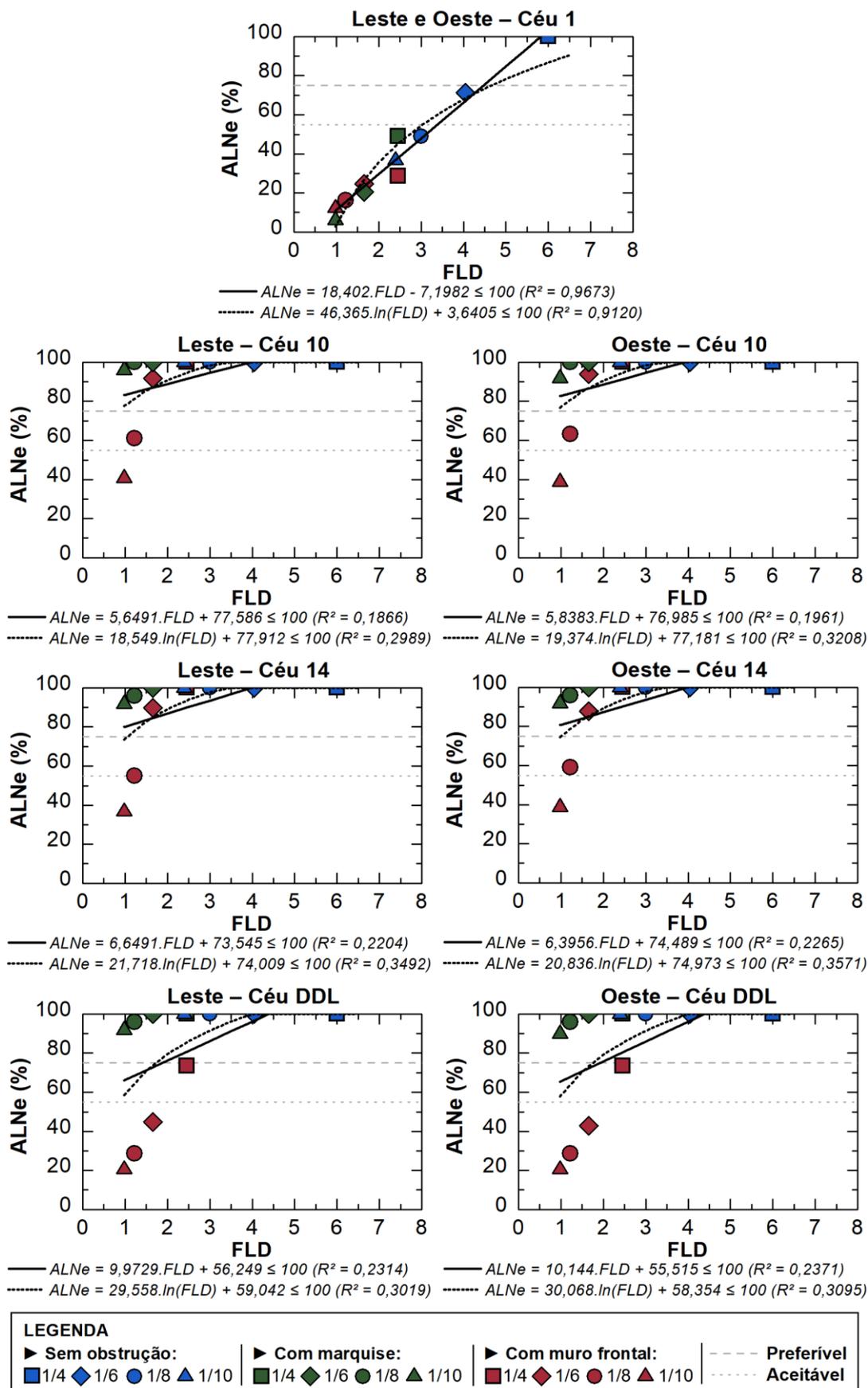
Fonte: A autora (2024).

Figura 48 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES)



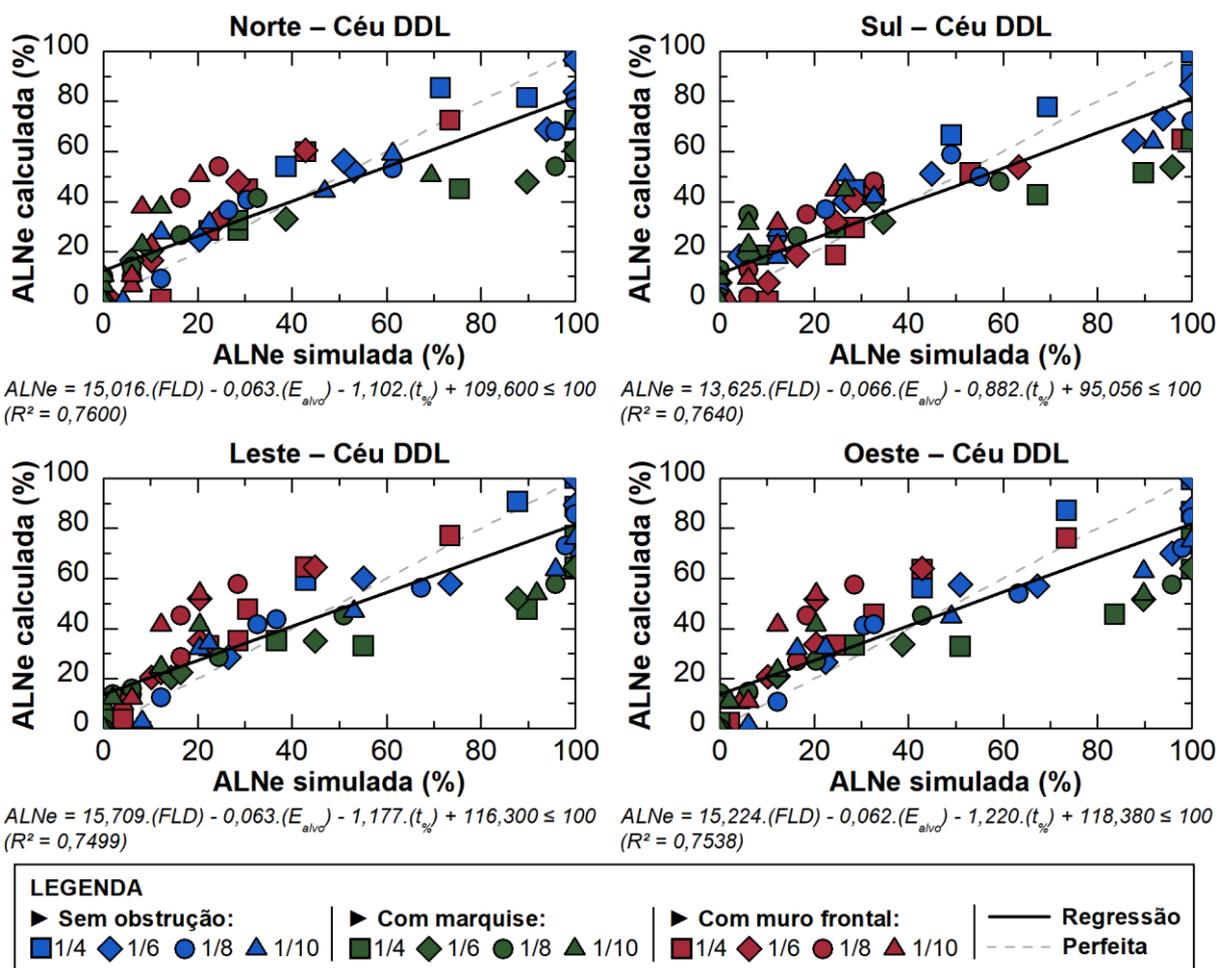
Fonte: A autora (2024).

Figura 49 – ALNe (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES)



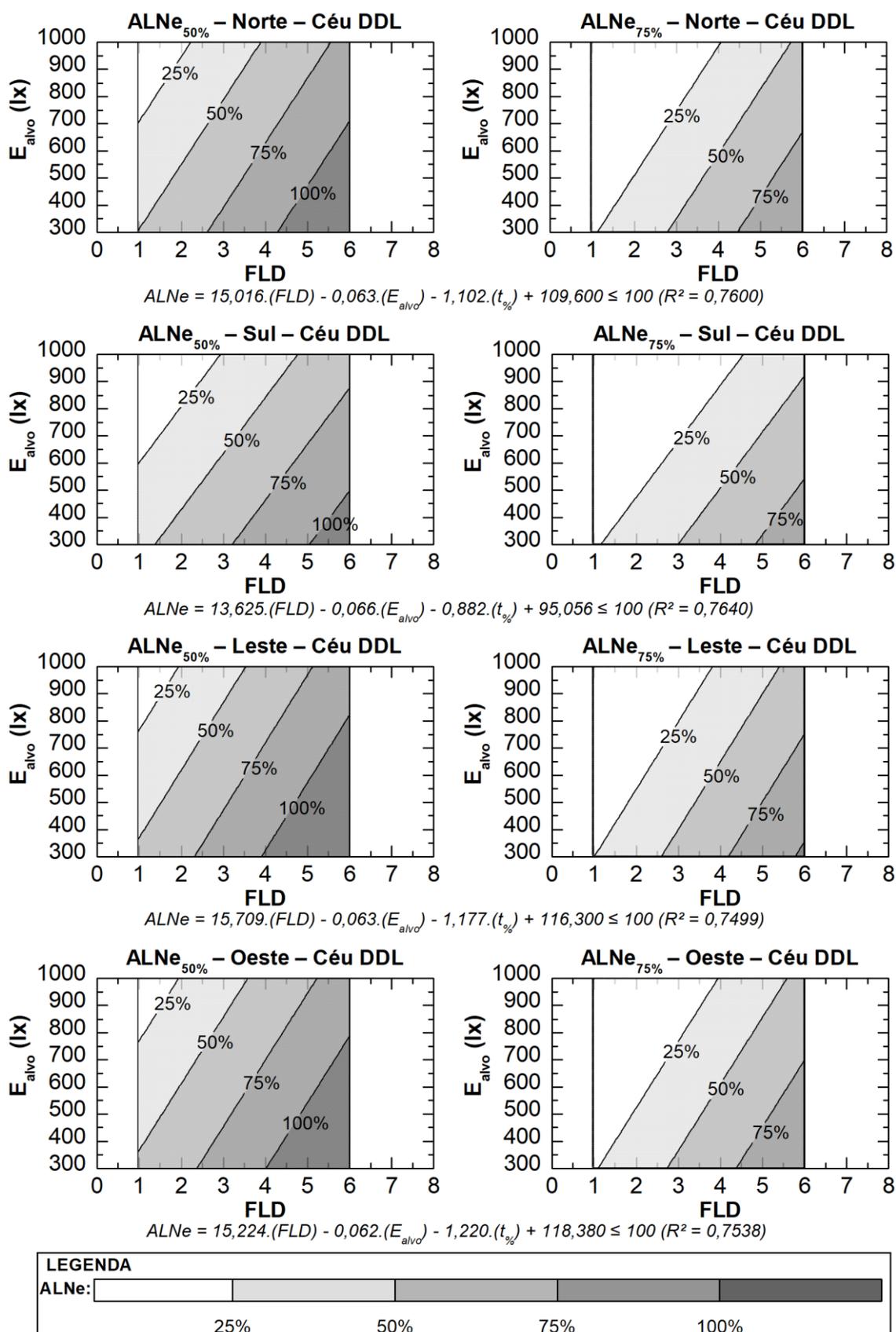
Fonte: A autora (2024).

Figura 50 – ALNe simulada X calculada: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES)



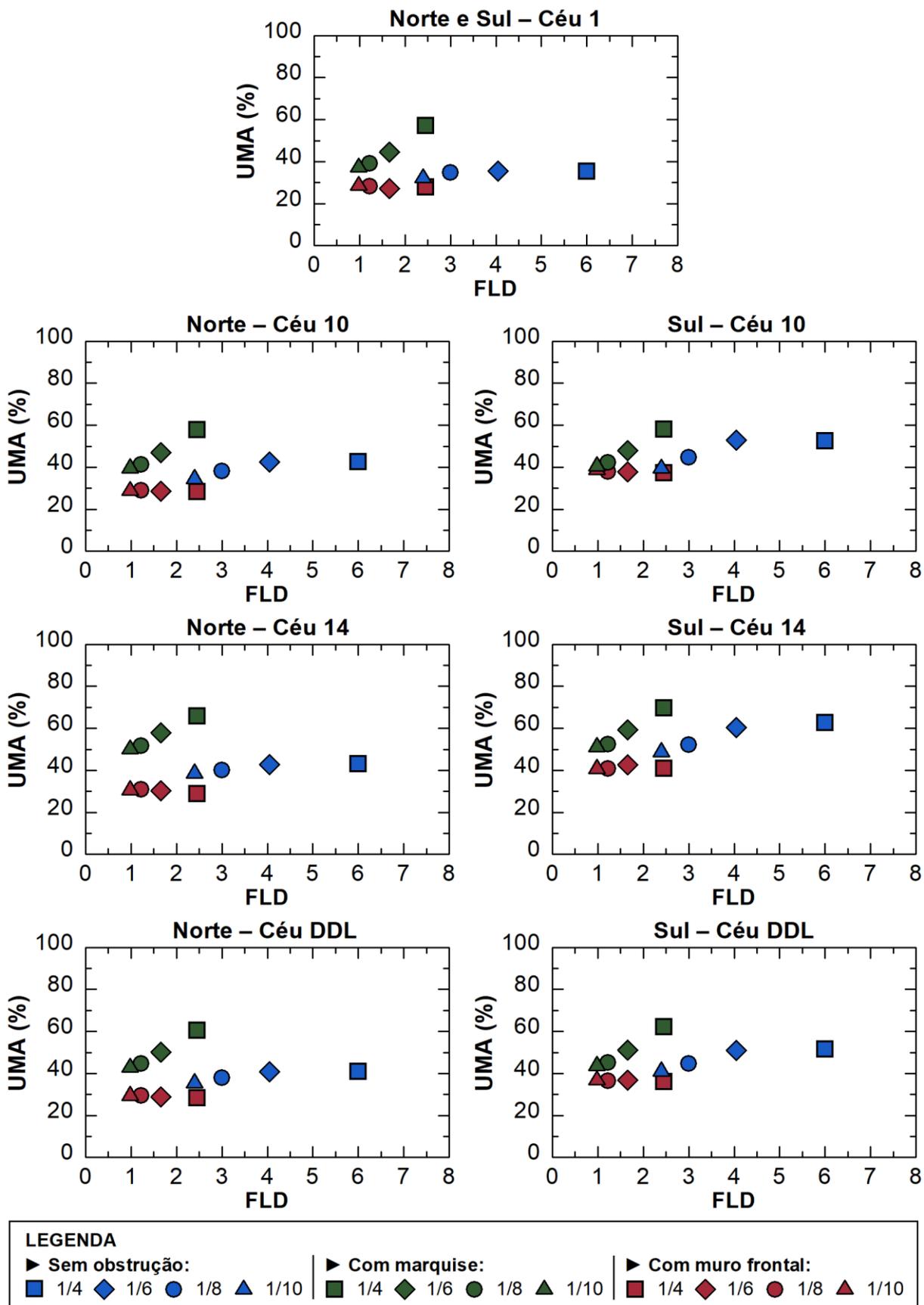
Fonte: A autora (2024).

Figura 51 – ALNe X FLD Médio X E_{alvo} X $t_{\%}$: Norte, Sul, Leste e Oeste (Vitória-ES)



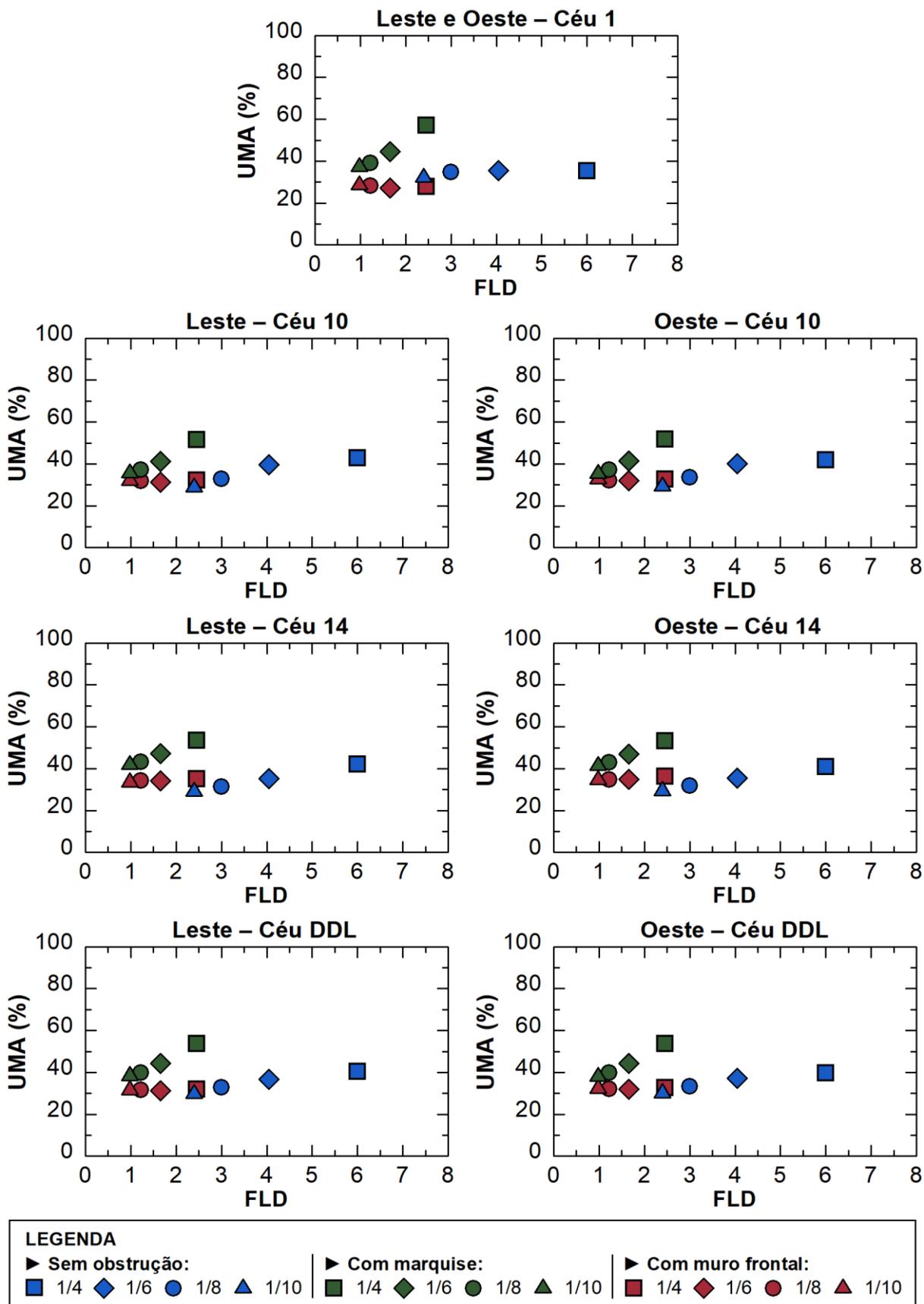
Fonte: A autora (2024).

Figura 52 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Norte e Sul (Vitória-ES)



Fonte: A autora (2024).

Figura 53 – UMA (Céus 1, 10, 14 e DDL) Leste e Oeste (Vitória-ES)



Fonte: A autora (2024).