



**VI-046 – IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE OS PARÂMETROS CLIMÁTICOS EM DUAS ÁREAS DE FORTALEZA, CEARÁ**

**Kety Vasconcelos Petalas<sup>(1)</sup>**

Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará.

**Professor Dr. João Welliandre Carneiro Alexandre**

Professor Adjunto do Departamento de Estatística da Universidade Federal do Ceará. Mestre em Estatística pela Universidade Estadual de Campinas. Doutor em Engenharia da Produção pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**Professor Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota**

Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica da Universidade Federal do Ceará. Doutor em Saúde Pública pela Faculdade de Saúde Pública de São Paulo.

**Professor Dr. Ricardo Figueiredo Bezerra**

Professor Titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Ceará. Doutor em Filosofia pela Universidade de Nottingham.



**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Robério Távora, nº 86 – Joaquim Távora - Fortaleza - CE - CEP: 60115-260 - Brasil - Tel: (85) 246-5298 - e-mail: [petalas@secrel.com.br](mailto:petalas@secrel.com.br)

**RESUMO**

A expansão urbana tem sido um dos principais responsáveis pelas alterações no meio ambiente. As modificações provocadas nas características do solo se manifestam na atmosfera, no ciclo hidrológico e na vida dos seres vivos, podendo limitar o desenvolvimento humano. Esse estudo busca verificar o efeito da urbanização nos parâmetros climáticos dentro da Camada de Cobertura Urbana em duas áreas da cidade de Fortaleza, estado do Ceará, Brasil. Para tanto, na metodologia, apresenta-se as hipóteses levantadas, com base no conhecimento teórico, para ambas as áreas das estações da FUNCEME e do INEMET-UFC. Tais hipóteses são testadas, utilizando-se o Teste do Sinal (Cox-Stuart, não paramétrico) e a técnica de observação visual da área em torno de cada estação. Antecedendo o teste das hipóteses, verifica-se a sazonalidade dos parâmetros climáticos e a correlação linear existente entre eles, para as duas áreas. Na análise dos resultados verifica-se que a FUNCEME (área mais urbanizada) apresenta um maior número de alterações que o INEMET-UFC (área menos urbanizada), confirmando as hipóteses levantadas. Todavia, não se pode afirmar que tais alterações estejam ocorrendo, *exclusivamente*, devido à urbanização.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impactos da Urbanização, Alterações Climáticas, Meio Ambiente, Fortaleza, Urbanismo.

**INTRODUÇÃO**

O crescimento acelerado das cidades vem chamando a atenção para os problemas gerados pelas atividades humanas, que, juntamente, com a falta de mecanismos eficientes de controle, provocam diversos impactos ambientais. Tal situação se reflete de maneira direta na qualidade de vida da população.

Muitos autores atribuem à urbanização e à arquitetura imprópria ao clima, a responsabilidade pelo aumento da poluição e da quantidade de calor emitido nos centros urbanos; originando diversas alterações ambientais, incluindo danos à saúde, ao conforto térmico e à economia da população. O objetivo principal desse estudo é verificar e analisar os impactos provocados pela urbanização sobre os parâmetros climáticos em duas áreas de Fortaleza.

As alterações ambientais ocorrem em uma dinâmica social e econômica quando, dentro do processo de urbanização, o homem, buscando satisfazer suas necessidades biológicas e culturais, nem sempre considera



os aspectos básicos da natureza local. Em geral, dentro deste processo, existe uma divergência de interesses e um desentendimento entre as linguagens ambientais, políticas e econômicas.

Somente um completo entendimento do clima e das características inerentes a cada cidade, poderá garantir a segurança das mesmas, favorecer a atividade econômica e assegurar um aumento no conforto do homem urbano. Caso contrário, as cidades podem se tornar um fator limitante ao próprio desenvolvimento.

De acordo com estudos realizados por diversos autores, as alterações climáticas observadas e produzidas pelas cidades consistem no (a):

- aumento da precipitação,
- redução da umidade relativa,
- decréscimo da velocidade do vento,
- aumento da nebulosidade local,
- redução da radiação,
- aumento da temperatura e
- aumento do albedo (poder refletor das superfícies).

No Brasil, o crescimento acelerado e desorganizado de algumas cidades tem provocado significativas alterações no clima. Estudos realizados em cidades de pequeno e grande porte mostram que as alterações climáticas estão mais relacionadas com o efeito da densidade das construções que, propriamente, com o tamanho da cidade. Além deste fator, os problemas ainda podem ser gerados pelo (a):

- crescimento da população urbana,
- falta de infra-estrutura adequada,
- distribuição dos diversos usos do solo,
- morfologia urbana,
- poluentes atmosféricos emitidos,
- tráfego de veículos,
- obras de construção civil,
- ocupação inadequada com as características naturais do local,
- desmatamento,
- verticalização e
- impermeabilização.

Exclui-se, dessa relação, as causas naturais, visto que são alheias à intervenção humana.

Sabe-se que o processo acelerado de desenvolvimento, muitas vezes, leva em consideração somente os interesses particulares e não permite que se considere a capacidade de recuperação do sistema. De acordo com os fatos históricos, a cidade de Fortaleza não é uma exceção a isso. Desde a década de 80, ela vem sofrendo um acelerado processo de verticalização, impulsionado pela especulação imobiliária, o que pode trazer graves conseqüências ao clima local.

O presente estudo está estruturado em três etapas: na primeira, são feitas algumas considerações sobre o clima de Fortaleza; em seguida, são levantados os dados climáticos e os aspectos urbanos em ambas as áreas e; por último, são feitas as análises e apresentados os resultados, nos quais verifica-se a presença de alterações climáticas nas duas estações, destacando-se a área referente à estação da FUNCEME, região que apresenta um maior grau de urbanização.

### **LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DE FORTALEZA**

Fortaleza encontra-se na zona litorânea do Estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil, a 3º46' de latitude sul e 38º33' de longitude oeste. Cobre uma área de, aproximadamente, 336 km<sup>2</sup>, com uma população estimada no ano 2.000, em 2.474.052 habitantes. É a quinta maior cidade do Brasil, exerce forte influência nos municípios adjacentes e, por suas condições favoráveis, vem destacando-se na atividade turística, favorecendo um acelerado processo de crescimento urbano.



As características físicas naturais da cidade não se constituem em um obstáculo ao clima, fazendo com que se acredite que as alterações climáticas, percebidas mediante a sensação térmica, sejam decorrentes do processo de urbanização. Pois, até algum tempo atrás, a cidade era conhecida pelo seu clima agradável e, atualmente, há muitas queixas por parte da população.

Outro fator que acentua a percepção dessas alterações climáticas diz respeito à sua própria localização. Por situar-se em uma Zona de Convergência Inter-tropical, a cidade apresenta elevados índices de insolação e radiação solar, influenciando a temperatura, a evaporação e a luminosidade (veja Tabelas 1 e 2). Há predominância dos ventos alísios de sudeste, entretanto, a maior influência é exercida pela direção leste e pelas brisas marítimas, responsáveis pelo alívio do calor nos períodos mais quentes.

**Tabela 1: Normais climatológicas (1966/1998).**

Parâmetros climáticos	Normal
Temperatura média (°C)	26,7
Temperatura máxima (°C)	30,2
Temperatura mínima (°C)	23,5
Umidade relativa (%)	79
Evaporação (mm)	2.527,6
Precipitação (mm)	1.642,4
Nebulosidade (0/ 10)	5,2
Insolação (hora/ mês)	2.776,4
Radiação solar (cal/ cm <sup>2</sup> / mês)	147.592
Velocidade do vento (m/s)	3,9

Fonte: Estação INEMET-UFC.

**Tabela 2: Iluminação solar em uma superfície perpendicular aos raios do sol (lux) para a latitude de 4°S.**

Hora do dia	Estações do ano								
	21 de Dez.			21 de Mar. e 21 de Set.			21 de Jun.		
	Altura Solar* (graus)	Massa de ar (m)	Iluminação (lux)	Altura Solar* (graus)	Massa de ar (m)	Iluminação (lux)	Altura Solar* (graus)	Massa de ar (m)	Iluminação (lux)
<b>8:00</b>	30	2,00	72.427	31	1,95	79.420	26	2,36	78.373
<b>10:00</b>	57	1,25	92.413	61	1,14	96.193	51	1,28	94.787
<b>12:00</b>	72	1,04	96.487	87	1,01	99.560	64	1,11	98.327
<b>14:00</b>	57	1,25	92.413	61	1,14	96.193	51	1,28	94.787
<b>16:00</b>	30	2,00	72.427	31	1,95	79.420	26	2,36	78.373

Fonte: Hopkinson, 1980 e Lippsmeier, Kluska e Edrich, 1969.

\* Corresponde ao valor aproximado da altura que o sol faz com a linha do horizonte, retirada da carta solar elaborada por Lippsmeier, Kluska e Edrich (1969) para a latitude de 4°S.

Em decorrência da sua proximidade com o Equador, Fortaleza também apresenta uma baixa amplitude térmica diária e anual, não possui as quatro estações do ano bem definidas, considerando-se, somente, uma estação chuvosa e outra não, denominadas, respectivamente, verão e inverno. A umidade relativa acompanha o regime pluvial, é elevada em decorrência da proximidade com o mar e da alta taxa de evaporação.

Com essas características climáticas, as condições de conforto térmico estão no seu limite e podem ser consideradas estressantes. Por isso, pequenas alterações já são significativas, no que se refere ao conforto



térmico. Normalmente, as épocas de maior reclamação por parte da população correspondem aos períodos antes e após a estação chuvosa, devido à elevada umidade do ar e à baixa velocidade do vento.

Durante o início do seu crescimento urbano, as decisões tomadas foram fundamentais para a organização física da cidade. Entretanto, a partir da década de 30, os interesses particulares começaram a se sobrepor aos coletivos, comprometendo, em alguns aspectos, o meio ambiente e a qualidade de vida dos seus habitantes. Somente na década de 70, retomou-se essa preocupação com o desenvolvimento urbano.

Atualmente, a cidade ainda apresenta vazios urbanos, seu território não está totalmente ocupado, apesar de apresentar-se, praticamente, todo loteado. Ao mesmo tempo, existe uma crescente dizimação da vegetação e descaracterização dos fatores físicos naturais, tais como: descaracterização das planícies dos rios, erosão do solo, diminuição da mancha de dunas, criação de vales artificiais, dentre outros. Tal fato pode ser visualizado na carência de áreas verdes e espaços livres, na crescente verticalização e impermeabilização do solo, com conseqüentes impactos no clima e na drenagem urbana.

Infelizmente, na sua grande maioria, o processo de ocupação do solo revela o desrespeito para com a natureza e a sociedade; onde o espaço privado se sobrepõe ao público, e os elementos artificiais aos naturais, trazendo contrastes entre o passado e o presente, e revelando impactos que podem ser visualizados no meio físico. Dentro desse contexto, Fortaleza não é uma exceção a essa regra.

### MATERIAIS E MÉTODOS

O clima de um determinado lugar é condicionado por fatores estáticos e dinâmicos. Dentre os estáticos, tem-se os globais, que determinam os climas zonais e regionais, e os locais, que caracterizam o clima local e o microclima. Essa diversidade permite a subdivisão do estudo do clima, em escalas espaciais de trabalho. Os fatores dinâmicos correspondem às próprias variáveis meteorológicas, podendo ser mostradas em variações sazonais, diárias, mensais e anuais.

O meio urbano, constituído pelo sistema natural, construído, econômico, social e administrativo, encontra-se dentro dos fatores locais que condicionam um determinado clima. Pode ser estudado dentro de uma escala Mesoclimática, Topoclimática ou Microclimática, variando de acordo com os aspectos que se deseja abordar.

Tendo-se como objetivo verificar a influência da urbanização sobre o clima, considera-se as modificações ocorridas na superfície do solo e adota-se, como escala climática, a Topoclimática, também denominada Camada de Cobertura Urbana. Dentro desta escala, a unidade de superfície horizontal varia de  $10^2$  a  $5 \times 10^4$  m e as estratégias de abordagem dependem da topografia, tipo de solo, cobertura vegetal, proximidade de corpos d'água e das características urbanas.

### LOCALIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Fortaleza possui quatro estações meteorológicas de superfície: a Estação Agroclimatológica da UFC (INEMET-UFC), a estação da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), a Estação do Aeroporto Internacional Pinto Martins e a Estação Rádio-Sonda, Castelão – Fortaleza. No entanto, devido a limitações na obtenção de dados, considerou-se, para análise, somente as:

- Estação Agroclimatológica da UFC (INEMET – UFC), localizada dentro do Campus do Pici, numa zona de uso predominantemente institucional, a  $3^{\circ} 44'$  de latitude sul e  $38^{\circ} 33'$  de longitude oeste.
- Estação da FUNCEME, localizada no Parque de Exposições da Secretaria de Agricultura, numa zona urbanizada, a  $3^{\circ} 46'$  de latitude sul e  $38^{\circ} 33'$  de longitude oeste.

De acordo com a escala adotada, em ambas as estações, delimita-se um raio de 1,5 km, determinando, para efeito de estudo e observações visuais, a área de influência da estação do INEMET-UFC, Área I, e da FUNCEME, Área II.



## COLETA DE DADOS

### 1. Dados urbanos:

O grau de urbanização pode ser medido através de índices capazes de caracterizar diferentes padrões de uso e ocupação do solo, como, por exemplo, o de vegetação. Esses parâmetros, normalmente, são levantados e estimados pelo poder público. No entanto, a falta de continuidade desses levantamentos, principalmente, de um cadastro de imóveis e áreas verdes, fez com que se tomasse, como base a (o):

- Lei nº 5.122 – A / 79 de uso e ocupação do solo;
- Densidade populacional dos censos de 1970, 1980, 1991 e 1996;
- Planta de vegetação do ano de 1995, elaborada pelo IPLAM;
- Fotografias aéreas do ano de 1995; e
- Fotografias e filmagens feitas em trabalho de campo.

### 2. Dados climáticos:

Os dados climáticos utilizados nesse estudo foram coletados na FUNCEME e no INEMET-UFC, através de uma pesquisa de campo, por documentação indireta, mediante ‘informação de arquivo’. As variáveis coletadas para cada estação, com suas respectivas unidades de medida, são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3: Dados climáticos coletados no INEMET – UFC e na FUNCEME.**

Estação	Médias mensais					Período de observação
	Temperatura do ar (°C)			Vento		
	Máxima	Mínima	Média	Velocidade (m/s)	Direção	
INEMET-UFC	X	X	X	X	X	1966 / 98
FUNCEME	X	X	X	X	X	1974 / 98

Estação	Médias mensais					Período de observação
	Umidade relativa (%)	Nebulosidade de (0/10)	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)	Insolação (horas)	
INEMET-UFC	X	X	X	X	X	1966 / 98
FUNCEME	X	X	X	X	X	1974 / 98

Dados utilizados e fornecidos pelas estações.

Os dados da velocidade e direção do vento para a estação da FUNCEME se restringem até o ano de 1996, visto que, a partir de então, estas medidas não estão sendo mais coletadas, impossibilitando também o cálculo das variáveis que dependem da velocidade do vento.

Os períodos de observação das estações possibilitam o levantamento de dados diários, mensais, anuais e no horário do padrão internacional estabelecido pela OMM (09:00, 15:00 e 21:00 horas). Entretanto, para os fins desse estudo, considerou-se as médias mensais para cada ano.

A partir da insolação, temperatura, umidade e velocidade do vento é possível calcular a radiação solar ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{mês}$ ) e a evapotranspiração (mm), seguindo os cálculos descritos por Tubelis (1980). Para tanto, utiliza-se as seguintes fórmulas:

Estimativa da Radiação Solar Global:



$$Q_g = Q_o \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad \text{equação (1)}$$

onde:

$Q_g$ , radiação solar global (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$Q_o$ , radiação solar em uma superfície horizontal no topo da atmosfera (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$n$ , insolação diária

$N$ , número diário possível de horas de brilho de sol

Para latitudes de 0° a 60°, as constantes são iguais:

$$a = 0,29 \cos \phi$$

$$b = 0,52$$

$\phi$ , latitude do local

Estimativa da Evapotranspiração Potencial:

$$EP = \frac{1}{59} \left[ \frac{\Delta Q + E_a}{\frac{\Delta}{g} + 1} \right] \quad \text{equação (2)}$$

$$Q = Q_{oc} + Q_{ol} \quad \text{equação (3)}$$

$$Q_{oc} = (1 - r) Q_g \quad \text{equação (4)}$$

$$Q_{ol} = 1440s T_a^4 (0,09 \sqrt{e} - 0,56) (0,1 + 0,9 \frac{n}{N}) \quad \text{equação (5)}$$

$$E_a = 20,65 \left( k + \frac{u_2}{160} \right) (e_s - e) \quad \text{equação (6)}$$

onde:

EP, evapotranspiração potencial (mm/dia)

$\Delta/\gamma$ , coeficiente dependente da temperatura média diária do ar (adimensional)

$Q$ , balanço diário da radiação, para albedo de 25% para a vegetação (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

1/59, transformação da energia na altura equivalente de água evaporada

$E_a$ , poder evaporante diário do ar (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$k$ , fator de rugosidade da superfície, considerado como 1,0 para a vegetação

$u_2$ , vento percorrido diário a 2m de altura (km/dia)

$e_s$ , tensão de saturação de vapor d'água na temperatura média do ar (mmHg)

$e$ , tensão média de vapor d'água do ar (mmHg)

$Q_{oc}$ , radiação solar absorvida (radiação de ondas curtas) (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$Q_{ol}$ , emissão efetiva terrestre (radiação de ondas longas) (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$R$ , albedo (poder refletor da superfície)

$Q_g$ , radiação solar global (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

$n$ , insolação diária

$N$ , número diário possível de horas de brilho de sol

$1440s T_a^4$ , emissão diária de radiação de um corpo negro em função da temperatura (cal/cm<sup>2</sup>/dia)

Com o objetivo de analisar possíveis alterações climáticas decorrentes do processo de urbanização e o relacionamento entre as variáveis climáticas, a seguir, apresenta-se as metodologias de pesquisa e de análise utilizadas.



## METODOLOGIA DE PESQUISA

Pesquisas desenvolvidas no meio físico urbano envolvem aspectos naturais e artificiais, possíveis de serem medidos quantitativamente. Cada aspecto físico é composto por uma série de elementos, chamados componentes urbanos. Esse estudo se delimita ao meio urbano físico, como um todo, e ao comportamento das variáveis climáticas dentro da Camada de Cobertura Urbana, como ressaltado anteriormente.

As limitações encontradas na coleta dos dados urbanos levaram ao uso de uma abordagem qualitativa ou interpretativa para classificar o grau de urbanização entre as duas áreas, considerando-a um dado nominal. Neste caso, cada área revela o que é importante e relevante para a urbanização. As alterações climáticas, por sua vez, podem ser quantificadas. São influenciadas por diversos fatores, dentre eles, causas naturais, regionais e locais. Nesse estudo, considera-se somente os fatores locais, associando-os à urbanização.

Baseado na literatura, identifica-se situações nas quais é possível a ocorrência de uma relação entre as próprias variáveis climáticas e, destas com os fatores locais que as influenciam. No entanto, para que se estabeleça uma relação de casualidade, é preciso isolar todas as outras causas que tenham aparentemente conexão entre a causa e o efeito. Nesse estudo, além de só ser considerado o meio urbano físico, este, ainda é caracterizado por observação visual, impossibilitando isolar as demais causas que possam estar interferindo nas alterações climáticas. Consequentemente, não se elimina os demais fatores envolvidos e também, não permite um relacionamento direto entre dados urbanos e climáticos.

A intenção desse estudo não é estabelecer uma relação de dependência e independência entre as variáveis, mas sim, verificar o relacionamento entre as variáveis climáticas e analisar as possíveis alterações de acordo com a intensidade de urbanização. Portanto, trata-se de uma pesquisa de campo de caráter quantitativo-descritivo, seguindo como método de pesquisa, o método hipotético-dedutivo segundo Popper.

Na pesquisa quantitativa, o ponto inicial é a Teoria, a qual fornece a estrutura de explanação sobre um fenômeno da realidade. Desta teoria, hipóteses são formuladas e testadas através da coleta de informações que, após as análises dos resultados, validarão, ou não, estas hipóteses. Com base no estudo dos impactos provocados pela urbanização nos parâmetros climáticos, elabora-se as seguintes hipóteses:

H.1: *A urbanização na FUNCEME é maior que no INEMET-UFC.*

H.2: *Existem alterações climáticas nas estações do INEMET-UFC e FUNCEME, ao longo dos anos.*

H.3: *A FUNCEME apresenta um maior número de alterações climáticas que o INEMET-UFC.*

A segunda hipótese pode ser desdobrada em onze hipóteses secundárias, onde verifica-se o sentido das alterações, se crescente ou decrescente:

H.2.1: *A nebulosidade cresce ao longo do tempo.*

H.2.2: *A radiação solar que chega à superfície terrestre decresce.*

H.2.3: *O número de horas de brilho solar, insolação, decresce.*

H.2.4: *A evaporação decresce ao longo dos anos.*

H.2.5: *A evapotranspiração decresce ao longo dos anos.*

H.2.6: *A umidade relativa decresce ao longo dos anos.*

H.2.7: *A precipitação aumenta ao longo dos anos.*

H.2.8: *A temperatura máxima cresce ao longo dos anos.*

H.2.9: *A temperatura mínima cresce ao longo dos anos.*

H.2.10: *A temperatura média cresce ao longo dos anos.*

H.2.11: *A velocidade do vento decresce ao longo dos anos.*

Dessa forma, na tentativa de validar as hipóteses formuladas, presume-se que:

1. Não se pode afirmar que as possíveis alterações climáticas sejam decorrentes, *exclusivamente*, da urbanização.



2. Mesmo que se isolasse os demais fatores que influenciam as alterações climáticas, deve-se observar que a intensidade das alterações está relacionada com o grau de urbanização e que este pode não se encontrar em um nível significativo para provocar tais alterações.

### METODOLOGIA DE ANÁLISE

#### 1. Dados urbanos:

Uma das maneiras de se classificar o grau de urbanização é através da observação direta intensiva ou observação visual, feita juntamente com informações arquivadas em material cartográfico, onde o pesquisador pode identificar e obter provas do objeto investigado. Nesse estudo, adota-se a observação assistemática, não-participante, individual e efetuada na vida real, onde não se detêm, de antemão, os aspectos relevantes a serem observados. O pesquisador presencia o fato, mas não participa dele e os dados são registrados, espontaneamente, no local.

Assim, cada área revela os elementos mais importantes capazes de estabelecer diferenças e os dados urbanos, devido à dificuldade na sua obtenção, passam a ser tratados como dados nominais envolvendo duas categorias, maior e menor, para efeito de comparação.

#### 2. Dados climáticos:

Os dados climáticos permitem uma análise quantitativa, onde utiliza-se a técnica de séries temporais. Entretanto, antecedendo a análise estatística propriamente dita, são elaborados gráficos das variáveis climáticas de cada estação, com o objetivo de se investigar o comportamento da série quanto à tendência e sazonalidade.

Para testar a existência de sazonalidade nas variáveis climáticas, aplica-se o Teste de Friedman – teste não paramétrico, ou seja, não se conhece, totalmente, a distribuição de probabilidade. As hipóteses do teste são:

$$\begin{cases} H_0: \text{não existe sazonalidade determinística} \\ H_1: \text{existe sazonalidade determinística} \end{cases}$$

A estatística do teste é dada por:

$$T_2 = \frac{12}{ps(s+1)} \sum_{j=1}^s (R_{.j}^*)^2 - 3p(s+1) \quad \text{equação (7)}$$

onde:  $p$  = número de anos

$s$  = período da sazonalidade (12 meses)

$R_{.j}^*$  = soma dos postos na  $j$ -ésima coluna ( $j$ -ésimo mês). Isto é:

$$R_{.j}^* = \sum_{i=1}^p R_{ij}^* \quad \text{equação (8)}$$

onde:  $R_{ij}^*$  é o ponto da  $Z_{ij}$  observação dentro do  $i$ -ésimo ano, com  $j = 1, \dots, s$ .

Rejeita-se  $H_0$  se  $T_2 \geq T_{2c}$  (estatística do teste  $\geq$  valor crítico), onde  $T_{2c}$  é tal que  $P_{H_0}(T_2 \geq T_{2c}) = \alpha$ , onde  $\alpha$  é o nível de significância.

Após identificada e removida a componente sazonal, para testar a tendência, utiliza-se o Teste do Sinal (Cox-Stuart – não paramétrico) para cada variável climática. As hipóteses estatísticas testadas são:

$$\begin{cases} H_0: \text{não existe tendência na série} \\ H_1: \text{existe tendência na série} \end{cases}$$



A estatística do teste é dada por:  $T_2$  = número de pares com sinal +. Para  $n \leq 20$ , a regra de decisão é baseada na distribuição binomial com parâmetros  $n$  e  $p = 1/2$ . Para um dado nível de significância  $\alpha$ , rejeita-se  $H_0$  se  $T_2 \leq b$  (estatística do teste  $\leq$  limite inferior do intervalo de aceitação de  $H_0$ ) ou  $T_2 \geq n-b$  (estatística do teste  $\geq$  limite superior do intervalo de aceitação de  $H_0$ ), onde  $b$  é o  $\alpha/2$  - quantil da binomial  $(n,p)$ . Como  $n > 20$ , aplica-se a distribuição normal, como aproximação:

$$T_2 \approx N(np; np(1-p)) \quad \text{equação (9)}$$

Aplica-se o Teste de Correlação Linear de Pearson para testar as hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \text{não existe correlação entre as variáveis} \\ H_1: \text{existe correlação entre as variáveis} \end{cases}$$

A estatística do teste, sob  $H_0$ , é dada por:

$$t = \frac{r}{\sqrt{(1-r^2)/(n-2)}} \quad \text{equação (10)}$$

onde:  $t$  segue uma distribuição  $t$ -student com  $(n-2)$  graus de liberdade e  $r$  é o coeficiente de correlação linear de Pearson, dado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n(\bar{x})^2 \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - n(\bar{y})^2 \right)}} \quad \text{equação (11)}$$

Rejeita-se  $H_0$  se  $|t| \geq |t_c|$ , ou seja,  $|\text{estatística do teste}| \geq |\text{ponto crítico}|$ , onde  $t_c$  = ponto crítico, tal que  $P(t > t_c) = P(t < -t_c) = \alpha/2$ .

Para os procedimentos estatísticos utiliza-se o SPSS, EXCEL e WORD for WINDOWS. A análise estatística foi realizada com o apoio do Laboratório de Estatística e Matemática Aplicada (LEMA) do Departamento de Estatística e Matemática Aplicada da Universidade Federal do Ceará (DEMA-UFC).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao iniciar a apresentação dos resultados é importante, primeiramente, estabelecer dois aspectos relevantes na análise dos dados:

1. Com um nível de significância  $\alpha$ , comete-se o Erro do Tipo I, rejeitando-se  $H_0$ , dado que ele é verdadeiro. Nas aplicações feitas considera-se  $\alpha = 5\%$ , isto significa dizer que se tem uma probabilidade de 5% de rejeitar  $H_0$ , ou seja, de dizer que não existe sazonalidade, não existe tendência e não existe correlação, quando, na verdade, existe.
2. Deve-se observar a localização da estatística do teste com relação ao intervalo de aceitação de  $H_0$ . Quando o valor localiza-se próximo à região de aceitação de  $H_0$ , o seu resultado não é tão significativo, podendo estar relacionado a problemas concernentes à consistência dos dados coletados.

Antecedendo o teste das hipóteses formuladas, apresenta-se a correlação existente entre os parâmetros climáticos e o teste para sazonalidade em cada uma das áreas.



### **RELACIONAMENTO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS**

Com um nível de significância de 5% e grau de liberdade superior a 120, tem-se que o valor bilateral de  $t$ , para todas as correlações, é 1,960. Portanto, sempre que  $r \neq 0$  e  $t > 1,960$  ou  $t < - 1,960$ , existe um relacionamento linear entre as variáveis, mesmo que os valores baixos dos coeficientes de correlação indiquem a não existência de uma correlação linear.

Quando a relação é positiva, diz-se que à medida que os valores de uma variável sobem, a outra acompanha a ascensão. Quando negativa, à medida que os valores de uma variável sobem, a outra decresce. No entanto, é necessário deixar claro que a correlação linear identifica o grau de relacionamento linear entre duas variáveis e não a relação de causalidade entre elas. A Tabela 4 mostra os coeficientes de correlação encontrados entre as variáveis climáticas e a estatística do teste para as Estações da FUNCEME e INEMET-UFC.



Tabela 4: Coeficientes de correlação entre as variáveis climáticas e estatística do teste para as Estações da FUNCEME e INEMET-UFC.

Estação da FUNCEME			
Variáveis Climáticas	Coefficiente de correlação	Tamanho da amostra	Estatística do teste
Velocidade do vento X Temperatura média	0,16	273	2,751 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Evaporação	0,88	273	29,946 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Evapotranspiração	0,80	273	21,854 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Umidade relativa	-0,29	273	-5,026 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Nebulosidade	-0,58	273	-11,758 <sup>(1)</sup>
Nebulosidade X Radiação solar	-0,65	296	-14,594 <sup>(1)</sup>
Nebulosidade X Insolação	-0,82	296	-24,859 <sup>(1)</sup>
Nebulosidade X Temperatura média	-0,07	296	-1,166
Radiação solar X Insolação	0,92	300	39,973 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Radiação solar	0,36	300	6,677 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Umidade relativa	-0,45	300	-8,770 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Evaporação	0,29	300	5,211 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Evapotranspiração	0,53	273	10,309 <sup>(1)</sup>
Umidade relativa X Nebulosidade	0,63	296	13,756 <sup>(1)</sup>
Umidade relativa X Evaporação	-0,52	300	-10,593 <sup>(1)</sup>
Umidade relativa X Evapotranspiração	-0,60	273	-12,464 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Nebulosidade	0,74	296	18,806 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Umidade relativa	0,66	300	15,328 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Temperatura média	-0,35	300	-6,555 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Evaporação	-0,79	300	-22,206 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Evapotranspiração	-0,80	273	-21,976 <sup>(1)</sup>
Estação do INEMET-UFC			
Variáveis Climáticas	Coefficiente de correlação	Tamanho da amostra	Estatística do teste
Velocidade do vento X Temperatura média	0,27	396	5,591 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Evaporação	0,67	276	14,904 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Evapotranspiração	0,76	396	22,998 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Umidade relativa	-0,60	396	-15,038 <sup>(1)</sup>
Velocidade do vento X Nebulosidade	-0,59	396	-14,54 <sup>(1)</sup>
Nebulosidade X Radiação solar	-0,64	396	-16,496 <sup>(1)</sup>
Nebulosidade X Insolação	-0,82	396	-28,371 <sup>(1)</sup>
Nebulosidade X Temperatura média	-0,14	396	-2,901 <sup>(1)</sup>
Radiação solar X Insolação	0,87	396	34,512 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Radiação solar	0,58	396	14,316 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Umidade relativa	-0,45	396	-9,925 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Evaporação	0,49	276	9,356 <sup>(1)</sup>
Temperatura média X Evapotranspiração	0,64	396	16,399 <sup>(1)</sup>
Umidade relativa X Nebulosidade	0,65	396	16,921 <sup>(1)</sup>
Umidade relativa X Evaporação	-0,60	276	-12,303 <sup>(1)</sup>
Umidade relativa X Evapotranspiração	-0,74	396	-22,093 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Nebulosidade	0,72	396	20,441 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Umidade relativa	0,72	396	20,353 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Temperatura média	-0,42	396	-9,115 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Evaporação	-0,81	276	-22,925 <sup>(1)</sup>
Precipitação X Evapotranspiração	-0,71	396	-19,904 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> significante a 5%.

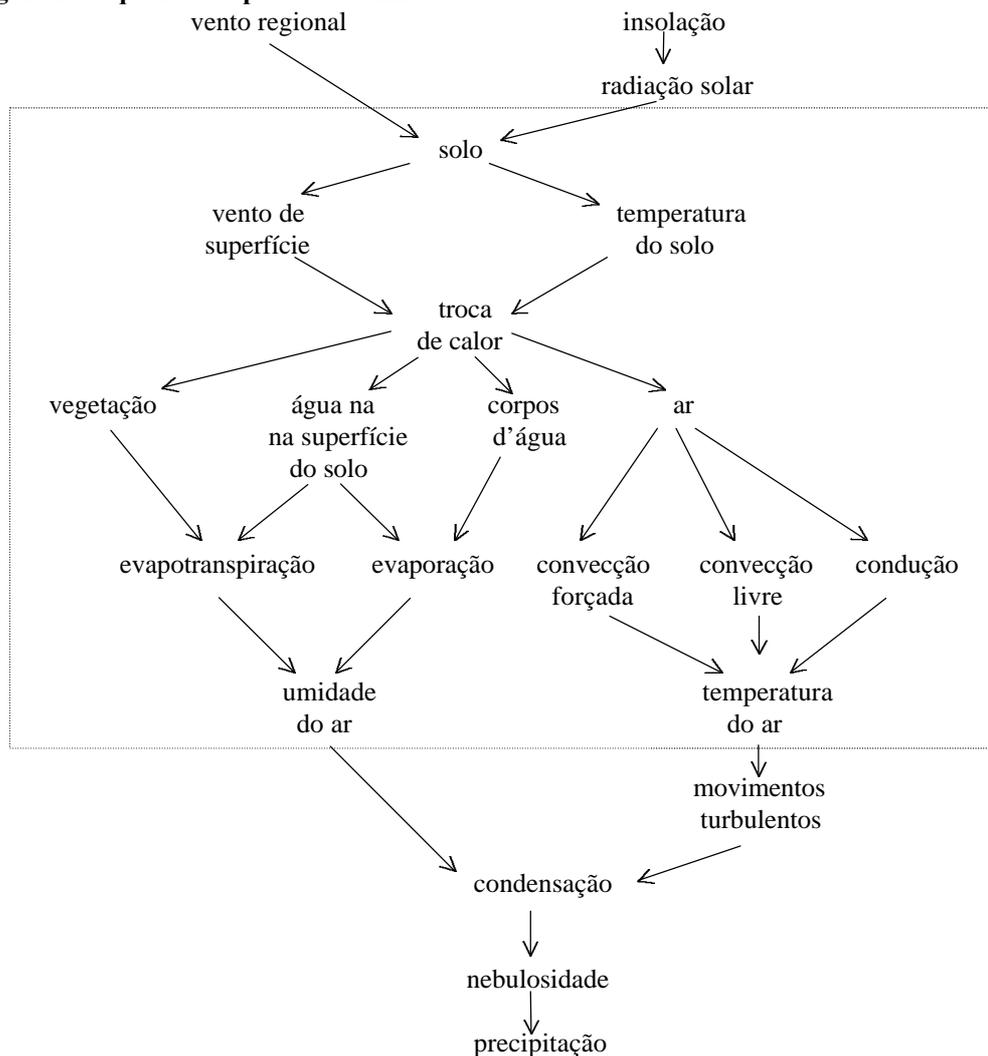


O relacionamento fraco ou ausente de algumas correlações é explicado pela (o):

- Possível presença de outros fatores não incluídos no estudo, não podendo serem explicados pela relação entre as duas variáveis.
- Fato que a correlação estabelecida foi a *linear* e o relacionamento entre as duas variáveis pode ser *não-linear*.

Buscando uma explicação sobre a origem do relacionamento entre as variáveis que foram correlacionadas, considerando-se somente aspectos referentes ao micro e topoclima, observa-se que os processos climáticos apresentam uma seqüência. O diagrama da Figura 1 mostra, de uma maneira simplificada, a seqüência desses processos durante o dia.

Figura 1: Seqüência de processos climáticos.



Região onde iniciam-se as alterações nos processos climáticos em decorrência das modificações nas características físicas do solo.

Na Figura 1, identifica-se dois elementos básicos: de um lado, o vento regional e do outro, a insolação e a radiação. Ao atingir a superfície do solo, parte da radiação é refletida e parte é absorvida, elevando a temperatura do mesmo. Por condução e convecção, há uma transferência de calor do solo para o ar, caracterizando o fluxo de calor sensível, que ao interagir com o ar, eleva a sua temperatura.



Portanto, a temperatura do ar, apesar de acompanhar o ciclo da radiação, não está precisamente relacionada com ele e sim, com a temperatura do solo. Além disso, sua elevação envolve fatores estáticos locais, como a cor e os tipos de materiais de construção, e o calor advindo das atividades antropogênicas.

Quando há superfícies evaporativas, como corpos d'água e áreas verdes, ou umidade na superfície, o calor sensível é usado como energia calorífica para mudar o estado da água, mediante os processos de evaporação e evapotranspiração, proporcionando um resfriamento da superfície e um aumento no conteúdo de vapor d'água do ar (umidade atmosférica). Esse aumento na umidade reduz a capacidade evaporativa do ar, dificultando os processos de evaporação e evapotranspiração. Caso não haja uma quantidade adequada de umidade na superfície, a elevação da temperatura do ar aumenta a capacidade do ar em reter vapor d'água, o que leva à redução da umidade relativa, pois ela representa o percentual de concentração do vapor d'água em relação à capacidade máxima do ar de retê-lo.

A elevação da temperatura do ar próximo à superfície do solo faz com que o ar quente se eleve e seja substituído pelo ar frio e denso da camada superior. Quanto maior for o gradiente de temperatura do ar, mais rápida é essa transferência, conseqüentemente, maior é a turbulência gerada. Também verifica-se este processo nos fluxos de ar criados pelas diferenças de temperatura entre a cidade (mais quente) e o campo (mais frio). Por outro lado, ao alcançar a superfície do solo, o vento regional é enfraquecido e a sua velocidade e direção dependerão da rugosidade da superfície. Ao atingir as superfícies evaporativas, ele favorece os processos de evapotranspiração e evaporação, pois reduz o conteúdo de umidade do ar e aumenta a sua capacidade evaporativa.

Nas plantas, o movimento do ar torna o processo de transpiração mais eficaz. No solo e corpos d'água, o fluxo turbulento do ar proporciona uma homogeneização da umidade e facilita uma mistura de massas de ar, carreando-as para uma nova localização. Assim, o ar úmido sobre a superfície é deslocado e substituído por ar fresco e seco, renovando a camada de ar em contato com o solo.

Dessa forma, os movimentos turbulentos carregam a umidade do ar. Quando o conteúdo de vapor d'água, ou mesmo antes, atinge o ponto de saturação e existem núcleos higroscópicos em suspensão na atmosfera, inicia-se a condensação do vapor d'água em torno desses núcleos, originando as nuvens. A precipitação ocorre quando há formação de nuvens com presença significativa de umidade e núcleos de condensação, e quando existe uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência do meio atmosférico. No percurso em direção à superfície terrestre, as gotículas d'água sofrem uma perda de massa por evaporação, proporcionando uma redução na temperatura do ar à medida que é necessário o consumo de 600 cal para evaporar 1 grama d'água.

Enquanto a precipitação é menor que a evaporação, a maioria da água é interceptada. Quando ela supera a evaporação, a umidade do ar alcança o seu ponto de saturação, aumentando a umidade relativa e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade evaporativa do ar, o que dificulta os processos de evaporação e evapotranspiração.

## **COMPORTAMENTO SAZONAL**

Os fenômenos que ocorrem com regularidade, de um ano para outro, são considerados sazonais. A sazonalidade das variáveis climáticas é explicada pelo Movimento de Translação da Terra em torno do Sol, que, juntamente, com a declinação da Terra com relação ao plano elíptico do Sol e a latitude, influencia a intensidade da radiação solar e, conseqüentemente, todos os parâmetros climáticos que dependem dela.

O presente estudo não tem como objetivo principal a descrição dos fatores globais, entretanto, quando há interesse em analisar certos fenômenos, como a tendência de uma série temporal, é necessário identificar e remover a componente sazonal, para que os outros fenômenos presentes sejam identificados e interpretados. Nos resultados encontrados (veja Tabela 5) todas as variáveis climáticas apresentam sazonalidade.



Tabela 5: Resultado do teste para sazonalidade.

Variáveis climáticas	Estatística do teste <sup>(1)</sup>	
	FUNCEME	INEMET-UFC
Nebulosidade	155,2	233,1
Insolação	205,4	267,3
Radiação solar	209,5	269,6
Evaporação	225,2	185,9
Evapotranspiração	22,7	287,4
Umidade relativa	188,4	239,7
Precipitação	214,2	267,6
Temperatura média	157,6	241,6
Temperatura máxima	86,9	187,9
Temperatura mínima	174,1	262,5
Velocidade do vento	165,1	256,3

<sup>(1)</sup> todos os resultados foram significantes a 5%.

valor crítico = 19,675, conseqüentemente,  $T_2 > T_{2c}$ .

### TESTE DA HIPÓTESE H.1

H.1: *A urbanização na FUNCEME é maior que no INEMET-UFC.*

#### *Caracterização da Área I, Estação do INEMET-UFC*

A estação INEMET-UFC localiza-se no bairro Pici, em uma zona especial de uso institucional. A área em torno dela é caracterizada por zonas residenciais de baixa densidade (70 hab/ha), com, no máximo, dois pavimentos, e por zonas residenciais de média densidade (150 hab/ha), com edifícios de até 12 pavimentos e altura máxima de 48m. Apesar de ser uma área de baixa e média densidade, com exceção do bairro do Pici, a maioria dos bairros presentes nesta área apresenta, desde 1980, uma densidade entre 100 e 170 hab/ha. No entanto, a maior parte da área é ocupada pelo Pici, o qual somente em 1991 apresenta um acréscimo, passando para a faixa correspondente de 50 a 100 hab/ha.

Pela sua evolução urbana, percebe-se que, até 1969, a ocupação nesta área era pequena, localizando-se principalmente, nas regiões norte e noroeste. A partir de 1985, observa-se um aumento, especialmente, entre a região oeste e sul. Atualmente, por localizar-se em uma área de uso institucional, o bairro do Pici não é muito ocupado, possui uma vegetação significativa e um índice de verticalização muito baixo. As construções mais densas localizam-se, principalmente, entre as direções noroeste e sudeste, não oferecendo grandes obstáculos à penetração do vento. Além disso, tratam-se de edificações pequenas de uso residencial, caracterizada por famílias de baixa renda.

#### *Caracterização da Área II, Estação da FUNCEME*

A estação da FUNCEME localiza-se no bairro São Gerardo, dentro de uma zona especial de proteção verde, paisagística e turística. O bairro São Gerardo situa-se em uma zona residencial de média densidade (150 hab/ha), com uma taxa de ocupação do terreno de 60%, para residências unifamiliares e, 50% para residências multifamiliares e uso misto. As edificações podem ter, no máximo, 12 pavimentos com altura de até 48m. Todavia, a avenida Bezerra de Menezes, de acordo com a Lei nº 5122 – A/79, é um corredor de adensamento, onde são permitidas edificações com 18 pavimentos, podendo atingir até 72m de altura.

Em 1970, a área em torno do bairro São Gerardo apresenta um adensamento populacional de 100 a 170 hab/ha, mantendo-se, praticamente, na mesma faixa, até 1996. O bairro São Gerardo sofre um acréscimo em 1980, mantendo-se estável a partir de então. A área não apresenta muita verticalização, entretanto, existem algumas edificações de porte que atraem novos investimentos. Possui uma arborização significativa, mas concentrada em determinados pontos, principalmente, no Parque de Exposições da Secretaria de Agricultura. Dentro dos lotes residenciais, a arborização é pequena.



Até 1969, praticamente, toda a área está ocupada. De 69 até 76, há uma pequena ocupação em torno da estação. No final dos anos 80, inicia-se um processo de verticalização residencial, proporcionando um incremento populacional, principalmente na zona destinada ao comércio. Atualmente, ainda encontram-se vazios urbanos, sendo que alguns deles são destinados a áreas de proteção.

Pelo material cartográfico e pela pesquisa de campo, percebe-se que, apesar da semelhança entre as áreas, é possível estabelecer uma certa comparação (veja Tabela 6). Em uma generalização, pode-se dizer que a área da FUNCEME apresenta uma maior urbanização que a do INEMET-UFC, mesmo que as diferenças sejam pequenas, confirmando a Hipótese H.1, onde se diz que a urbanização na FUNCEME é maior que no INEMET-UFC.

**Tabela 6: Comparação entre as áreas das estações INEMET-UFC e FUNCEME.**

Parâmetros urbanos	INEMET-UFC	FUNCEME
Verticalização	menor	maior
Área verde	maior	menor
Extensão de corpos d'água	maior	menor
Impermeabilização	menor	maior
Pavimentação asfáltica	menor	maior
Trânsito de veículos	menor	maior
Predominância do uso do solo	institucional	residencial de média densidade
Predominância da ocupação do solo	tipo horizontal	tipo horizontal
Densidade demográfica	menor	maior
Grau de urbanização	menor	maior

### TESTE DAS HIPÓTESES H.2 E H.3

H.2: *Existem alterações climáticas nas estações do INEMET-UFC e FUNCEME, ao longo dos anos.*

H.3: *A FUNCEME apresenta um maior número de alterações climáticas que o INEMET-UFC.*

Após a identificação e remoção da componente sazonal da série temporal, testa-se a tendência para cada variável através do Teste do Sinal (Cox – Stuart). A Tabela 7 apresenta o resultado do teste para tendência, o qual foi utilizado para testar as hipóteses formuladas H.2 e H.3.

**Tabela 7: Tendência das variáveis climáticas para as estações da FUNCEME e do INEMET-UFC.**

Variáveis climáticas	Estatística do teste para tendência					
	FUNCEME			INEMET-UFC		
	Intervalo de aceitação de $H_0$		Valor	Intervalo de aceitação de $H_0$		Valor
Nebulosidade	62,1	85,9	52 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	80 <sup>(1)</sup>
Insolação	63	87	63 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	101
Radiação solar	63	87	64	85,2	112,8	117 <sup>(1)</sup>
Evaporação	63	87	51 <sup>(1)</sup>	57	81	60
Evapotranspiração	57	80	52 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	103
Umidade relativa	63	87	27 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	64 <sup>(1)</sup>
Precipitação	63	87	75	85,2	112,8	95
Temperatura média	63	87	110 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	134 <sup>(1)</sup>
Temperatura máxima	63	87	120 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	130 <sup>(1)</sup>
Temperatura mínima	63	87	95 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	105
Velocidade do vento	57	80	10 <sup>(1)</sup>	85,2	112,8	84 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> significante a 5%.



Quando o valor da estatística do teste apresenta-se dentro do intervalo de aceitação (limite inferior  $\leq$  estatística do teste  $\leq$  limite superior), aceita-se a hipótese nula ( $H_0$ : não existe tendência). Quando o valor do teste é menor que o limite inferior, há uma tendência decrescente, e quando é maior que o limite superior, a variável apresenta uma tendência ascendente, aceitando-se a hipótese alternativa ( $H_1$ : existe tendência na série). As diferenças apresentadas nos limites dos intervalos das variáveis se devem aos diferentes tamanhos das amostras.

Os resultados encontrados confirmam as hipóteses principais H.2 e H.3. No entanto, com relação as hipóteses secundárias da hipótese H.2, nem todas superam os testes. Na estação da FUNCEME, são aceitas as hipóteses:

- H.2.4: *A evaporação decresce ao longo dos anos.*
- H.2.5: *A evapotranspiração decresce ao longo dos anos.*
- H.2.6: *A umidade relativa decresce ao longo dos anos.*
- H.2.8: *A temperatura máxima cresce ao longo dos anos.*
- H.2.9: *A temperatura mínima cresce ao longo dos anos.*
- H.2.10: *A temperatura média cresce ao longo dos anos.*
- H.2.11: *A velocidade do vento decresce ao longo dos anos.*

Foram rejeitadas as hipóteses:

- H.2.1: *A nebulosidade cresce ao longo do tempo.*
- H.2.2: *A radiação solar que chega à superfície terrestre decresce.*
- H.2.3: *O número de horas de brilho solar, insolação, decresce.*
- H.2.7: *A precipitação aumenta ao longo dos anos.*

No INEMET-UFC foram aceitas as hipóteses:

- H.2.6: *A umidade relativa decresce ao longo dos anos.*
- H.2.8: *A temperatura máxima cresce ao longo dos anos.*
- H.2.10: *A temperatura média cresce ao longo dos anos.*
- H.2.11: *A velocidade do vento decresce ao longo dos anos.*

Foram rejeitadas as hipóteses:

- H.2.1: *A nebulosidade cresce ao longo do tempo.*
- H.2.2: *A radiação solar que chega à superfície terrestre decresce.*
- H.2.3: *O número de horas de brilho solar, insolação, decresce.*
- H.2.4: *A evaporação decresce ao longo dos anos.*
- H.2.5: *A evapotranspiração decresce ao longo dos anos.*
- H.2.7: *A precipitação aumenta ao longo dos anos.*
- H.2.9: *A temperatura mínima cresce ao longo dos anos.*

Esse resultado faz pensar em duas novas proposições:

1. O grau de urbanização pode não ser tão intenso para provocar alterações em todos os parâmetros.
2. As variáveis envolvidas nas hipóteses rejeitadas podem estar sofrendo interferências de causas naturais, fatores globais, ou locais, não relacionados nesse estudo, ou mesmo sujeitas ao viés de origem instrumental.

No entanto, há uma comprovação da hipótese H.3, mostrando que a FUNCEME (área mais urbanizada) apresenta um maior número de alterações que o INEMET-UFC (área menos urbanizada). Este resultado confirma a teoria que diz: quanto maior a urbanização, maiores são as alterações climáticas. Portanto, provavelmente, essas alterações estão relacionadas com a urbanização, principalmente, devido à proximidade entre as duas áreas. Entretanto, nesse estudo, isso é algo que não pode ser afirmado com precisão.

### NATUREZA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS APRESENTADAS

#### *Velocidade do vento*

A rugosidade da superfície altera o fluxo padrão do vento regional. Os edifícios funcionam como barreira, reduzindo a velocidade do vento à medida que se aproxima do nível do solo e provocando um desvio da sua direção. Por conseguinte, tem-se diferentes pressões em torno dos obstáculos e a criação de sombras de vento



no lado oposto à incidência do fluxo. A intensidade da turbulência e o tamanho da sombra de vento dependem das formas, dimensões e disposições dos elementos urbanos.

### *Evaporação, evapotranspiração e umidade relativa*

A presença de água na superfície terrestre favorece a troca de calor por evaporação, proporcionando um resfriamento da superfície do solo. Segundo Ayoade (1991), o principal fator que determina a taxa de evaporação e evapotranspiração é a disponibilidade de umidade na superfície; o outro, é a capacidade evaporativa do ar, a qual está em função da radiação solar, da temperatura, da velocidade do vento e da umidade.

A evapotranspiração mede a perda de água das superfícies com vegetação. A transpiração vegetal é responsável pelo resfriamento das folhas e do ar em contato com elas. Além disso, a presença da vegetação retarda a evaporação da água do solo, fazendo com que, dentro de um agrupamento vegetal, a umidade seja constante e elevada durante todo o dia.

Tanto a evaporação quanto a evapotranspiração promovem um aumento na umidade atmosférica e uma redução da temperatura do ar, reduzindo também a capacidade do ar em reter vapor d'água. Entretanto, no meio urbano, o elevado índice de impermeabilização do solo, a deficiência de áreas verdes e a pequena disponibilidade de água na superfície reduzem a troca de calor por evaporação, fazendo com que os níveis de umidade relativa sejam reduzidos e a maior parte da energia radiante seja utilizada para aquecer o ar.

### *Temperatura máxima, mínima e média*

No meio urbano, a radiação de entrada que atinge as superfícies horizontais e verticais depende da altura e do afastamento entre os edifícios e, da largura e orientação das ruas. Primeiramente, a radiação solar atinge as superfícies superiores das edificações, onde a quantidade absorvida e refletida dependem do albedo dos telhados e da percentagem de área urbana coberta por edifícios. Posteriormente, as verticais, sendo que somente uma pequena parte é refletida para o céu, resultando numa diminuição do albedo e numa maior absorção. Por fim, uma pequena porção pode alcançar diretamente o solo, ou só o atingirá após sucessivas reflexões.

Parte da porção absorvida pelo solo e superfícies impermeabilizadas é armazenada e liberada somente à noite, com a mesma dificuldade com que a radiação solar entrou durante o dia. A outra parte é transferida para o ar, como calor sensível, por meio da condução e convecção, elevando a sua temperatura, ou, caso exista umidade na superfície, como calor latente, proporcionando um resfriamento da superfície e do ar.

Além da distribuição espacial dos fluxos de radiação, tem-se que a maior parte do solo de uma cidade é coberta por superfícies pavimentadas e edifícios constituídos de materiais artificiais com propriedades térmicas e cores diferentes. Normalmente, tais materiais favorecem uma maior absorção de calor durante o dia. Outro fator que também influencia na quantidade de calor absorvido por uma cidade é a morfologia urbana, devido à densidade das áreas construídas e à existência e disposição de corpos d'água, áreas verdes e espaços livres.

A temperatura máxima do ar em contato com o solo ocorre simultaneamente com a da superfície do solo. O ar aquecido, por condução, inicia o processo de convecção livre, fazendo com que sua temperatura seja lentamente aumentada. Isto provoca um atraso da temperatura máxima à medida que se afasta do solo. Em geral, a 2m de altura, ela ocorre duas horas depois do solo ter alcançado a sua temperatura máxima. A partir de então, inicia-se o processo de resfriamento da superfície terrestre.

Durante a noite, na ausência de radiação solar, quem prevalece é a radiação de saída. Os processos de transferência de calor continuam, sendo que o sentido do fluxo se inverte. No solo, o fluxo passa a ser ascendente, proporcionando um resfriamento mais rápido da sua superfície que das camadas mais profundas e, no ar, descendente. Este processo também proporciona um atraso das temperaturas mínimas à medida que se distancia do solo.



No entanto, a quantidade de alvenaria presente na cidade faz com que ela se resfrie mais lentamente, resultando numa retenção de calor à noite. Isto acontece porque a inércia térmica dos materiais dificulta a liberação do fluxo de calor sensível e porque a maior parte da abóbada celeste é bloqueada por outros edifícios, não permitindo uma perda significativa de calor, o qual acaba sendo reabsorvido pelas superfícies. Além disso, a convecção, que é a troca de calor mais significativa, é reduzida durante a noite devido à sua componente vertical que acompanha o balanço de radiação. Todos esses fatores contribuem para a redução do resfriamento da superfície do solo e a elevação das temperaturas mínimas.

Portanto, a redução da velocidade do vento e da umidade, reduzindo a troca de calor por convecção e evaporação, a deficiência de vegetação e superfícies aquáticas, a elevada capacidade térmica e condutibilidade dos materiais de construção e a resistência criada por eles na transferência de calor, juntamente com o calor adicional gerado pelas atividades antropogênicas, são fatores que estão relacionados com a elevação das temperaturas máxima, mínima e média.

### *Nebulosidade, insolação e radiação solar*

A quantidade de nuvens está associada à condensação do vapor d'água e este, geralmente, ocorre quando o ar se resfria além de seu ponto de orvalho, pois o decréscimo da temperatura reduz a capacidade do ar de reter a umidade em forma de vapor. O processo mais efetivo é o resfriamento por expansão adiabática, no qual uma massa de ar, mais quente que o ar circundante, se eleva e sofre uma queda de temperatura além do seu ponto de orvalho. Entretanto, só esse resfriamento não é suficiente para que haja a condensação, sendo necessário que existam núcleos de condensação, também conhecidos como higroscópicos, de origem natural ou artificial.

A presença desses núcleos faz com que a condensação ocorra mesmo antes do ar apresentar-se saturado. Segundo Ayoade (1991), existem experiências que têm mostrado que o ar puro resfriado além do seu ponto de orvalho torna-se somente supersaturado; a condensação pode não ocorrer mesmo que a umidade relativa seja maior que 100%.

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a intensidade da radiação solar é atenuada pela absorção, reflexão e dispersão. Por esse motivo, a quantidade de nuvens influencia no número de horas de brilho solar (insolação) e, conseqüentemente, na intensidade da radiação solar que atinge o solo. A redução na quantidade de nuvens aumenta a insolação e permite que uma maior porção da radiação solar atravesse a atmosfera sem qualquer interação com ela, aumentando, conseqüentemente, a porção que atinge diretamente a superfície do solo.

## CONCLUSÕES

No processo de expansão urbana, comumente, presenciam-se situações que promovem significativas alterações climáticas. A cidade de Fortaleza não foge à regra. Nela, também evidenciam-se alterações climáticas e tudo parece indicar que sejam provocadas pelo processo de urbanização, o qual possui uma estreita relação com as decisões do poder público.

Os elementos do meio físico urbano estão dentro da diversidade dos fatores locais que caracterizam um determinado clima. Mas, além destes, ainda existem os fatores globais e as causas naturais. As áreas em estudo possuem, praticamente, as mesmas coordenadas geográficas, a mesma altitude, não apresentam cadeias montanhosas e, provavelmente, estão sujeitas a mesma circulação atmosférica e aos mesmos fenômenos naturais que porventura possam se manifestar. Entretanto, apesar de apresentarem uma urbanização semelhante, é possível identificar algumas diferenças entre elas, destacando-se a densidade de construção, a impermeabilização do solo e a presença de áreas verdes e corpos d'água.

Mesmo com essa proximidade e semelhança entre as áreas, identifica-se a presença de um maior número de alterações climáticas na região da FUNCEME, a qual também apresenta um maior grau de urbanização. Isto leva a acreditar que as alterações encontradas sejam causadas pela urbanização, principalmente, quando se verifica, através da literatura, a possível origem de tais alterações, mas não se pode afirmar que sejam decorrentes, *exclusivamente*, da urbanização.



Os parâmetros climáticos que apresentam alterações mais significativas na Área II, estação da FUNCEME, são: a redução da nebulosidade, umidade relativa e velocidade do vento e o aumento das temperaturas mínima, máxima e média. Na área I, estação do INEMET-UFC, as alterações mais evidentes são: o acréscimo das temperaturas média e máxima e a redução da umidade relativa. Isto se deve, provavelmente, a maior proporção de superfícies evaporativas, menor pavimentação e edificações e a tipologia de ocupação, predominantemente horizontal da Área I. Todavia, é importante salientar que, em ambas estações, os dados coletados são secundários e podem estar sujeitos a erros de origem instrumental e/ou durante o manuseio desses dados.

No que se refere ao relacionamento linear entre as variáveis climáticas é possível identificar alguns dos processos climáticos, permitindo, pela interpretação da origem do relacionamento, observar uma seqüência de acontecimentos. A maioria dos coeficientes de correlação encontrados mostra um fraco relacionamento linear entre as variáveis climáticas, o que faz pensar na existência de outros fatores que podem estar interferindo no resultado. Este fato torna-se mais evidente quando observa-se que na estatística do teste, com um nível de significância de 5% e um grau de liberdade muito grande, a maioria das hipóteses nulas é rejeitada, mostrando que existe correlação entre as variáveis.

Todas as variáveis climáticas de ambas as estações apresentam um comportamento sazonal. Provavelmente, isso se deve ao Movimento de Translação da Terra em torno do Sol, juntamente com a sua declinação com relação ao plano elíptico do Sol e a latitude, influenciando a intensidade de iluminação e radiação solar recebida pela superfície terrestre, bem como os demais elementos que dependem da radiação.

Com base nos impactos provocados pela urbanização, o planejamento urbano torna-se muito dependente dos processos naturais presentes nos elementos da paisagem, dentre eles, do processo de formação do solo, da vida vegetal e animal, das características hidrológicas e dos processos climáticos. Isto resulta em imposições à ocupação do solo, atribuindo princípios fundamentais na sua organização. Para tanto, é necessário que o homem avalie o poder de conformação dos seus empreendimentos com os processos naturais, interferindo de maneira consciente no meio em que vive.

Em uma generalização, pode-se dizer que os problemas ambientais, presentes nas cidades, são, em parte, gerados pelo uso indiscriminado do solo e pela má localização e dimensionamento dos elementos urbanos, onde, durante o processo de desenvolvimento, normalmente, poucos ganham à custa de muitos que perdem, elevando os custos sociais a longo prazo. Considerar os processos naturais não significa se opor às mudanças ou ao desenvolvimento, mas direcioná-lo de forma que não seja destrutivo e que, mesmo sendo um ambiente artificial, seja possível criar um sistema equilibrado, sem a produção de uma grande quantidade de resíduos.

Somente reencontrando as leis que regem a natureza será possível reencontrar as leis que regem o próprio homem no seu meio e, assim, alterar ou reconstituir um ambiente, tornando os ecossistemas humanos auto-sustentáveis e reduzindo os impactos negativos provocados no meio ambiente. Dessa forma, os elementos acrescentados devem fazer parte da paisagem, compô-la e auxiliar no seu processo de recriação, e não, serem elementos estranhos a ela.

Nesse processo, muitas são as áreas de conhecimento envolvidas, entre elas, a arquitetura e o urbanismo. Estas, representam os meios pelos quais o homem exprime sua cultura, história, poder econômico e avanços tecnológicos, ou seja, os valores materiais e morais da sociedade, em direto relacionamento com o espaço físico. Portanto, é nelas que está uma das principais oportunidades e limitações nas relações com a natureza, mediante o uso de projetos, leis e planos.

Muitas foram as dificuldades encontradas na realização desse estudo, mas apesar disso, considera-se que ele é de grande valia pela metodologia empregada e pelos resultados apresentados, pois possibilitam: a identificação de alterações climáticas; a análise da influência da urbanização sem possuir, de antemão, dados urbanos; e a confirmação do comportamento sazonal dos parâmetros climáticos. Outrossim, tem-se, como aspecto relevante, a descrição dos impactos provocados pela urbanização sobre os parâmetros climáticos,



alcançando o objetivo pessoal de levar às outras pessoas o entendimento básico dos processos naturais e das conseqüências das ações do homem no meio urbano.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALCOFORADO, M. J. O clima da região de Lisboa: contrastes e ritmos térmicos. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, 1993.
2. ALEXANDRE, J. W. C. Uma investigação das práticas da gestão da qualidade total no setor manufatureiro do estado do Ceará. Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
3. ASSIS, E. S. Mecanismos de desenho urbano apropriados à atenuação da Ilha de Calor urbana: análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ. Rio de Janeiro, 1990.
4. AVISSAR, R. Potential effects of vegetation on the urban thermal environment, *Atmospheric Environment*, 30 (3), pp. 437 – 448, 1996.
5. AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. 3ª edição. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A., 1991.
6. BEZERRA, R. F. Residential displacement among low-income groups in Fortaleza, Brazil. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, 1999.
7. BITTENCOURT, L. S., CRUZ, J. M. e LÔBO, D. G. F. A influência da relação entre taxa de ocupação x número de pavimentos no potencial de ventilação natural dos ambientes internos e externos. ANAIS DO IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NA AMBIENTE CONSTRUÍDO. Salvador. pp. 102 – 106, 1997.
8. BRASIL, H. M. da S. Influência da arborização no conforto térmico em Belém - Pará. Monografia apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas da Universidade Federal do Pará e Museu Paraense Emílio Goeldi. Belém, 1996.
9. BUDYKO, M. I. Climate and life. Traduzido do original, em russo, por David H. Miller. New York: Academic Press, 1974.
10. CAMPBELL, S. Green cities, growing cities, just cities? Urban planning and the contradictions of sustainable development, *Journal of the American Planning Association*, 62 (3), pp. 296 – 312, 1996.
11. CASTRO, J. L. Cartografia urbana fortalezense na colônia e no império e outros comentários. In: Fortaleza (org) A administração Lúcio Alcântara Março 79 / Maio 82. Fortaleza: Gráfica Industrial S/A. pp. 23 – 81, 1982.
12. DREW, D. Processos interativos homem – meio ambiente. 2ª edição. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S.A., 1989.
13. FERRARI, C. Curso de planejamento municipal integrado: urbanismo. 7ª edição. São Paulo: Pioneira, 1991.
14. FORTALEZA A administração Lúcio Alcântara Março 79 / Maio 82. Fortaleza: Gráfica Industrial S/A – GRAFISA, 1982.
15. FREIRE, G. R. de P. Fortaleza: evolução urbana (1603 / 1979). Fortaleza: Imprensa Oficial do Ceará – IOCE, sem data.
16. GALINDO, I. Evaluation of the impact of some atmospheric elements on health. In: World Climate Program Applications (WCAP – No. 1) (org) Climate and human health. Proceedings of the Symposium in Leningrad – Volume I. Geneve: World Meteorological Organization, 1986.
17. GEIGER, R. The climate near the ground. Tradução do original, em alemão, por Milroy N. Stewart e outros. 2ª edição. Massachusetts: Harvard University Press, 1950.
18. GIVONI, B. Urban design in different climates. World Climate Program Applications (WCAP – No. 10) – WMO/TD – No. 346. Geneve: World Meteorological Organization, 1989.
19. GIVONI, B. Climate considerations in building and urban design. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997.
20. GOLANY, G. S. Urban design morphology and thermal performance, *Atmospheric Environment*, 30 (3), pp. 455 – 465, 1996.
21. GOMEZ, A. L., GOMEZ, J. L., GARCIA, F. F. e JIMENEZ, A. M. *El clima urbano: teledetección de lá isla de calor en Madrid*. Madrid: MOPT, 1993.
22. HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. Iluminação natural. 2ª edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.



23. ICHINOSE, T., SHIMODOZONO, K., UNO, I., HANAKI, K., KIYOTA, O. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Japan. Book of abstracts, International Conference on Urban Climatology. Essen, Germany. pp. 216 – 218, 1996.
24. JEAN, L. I., GUYOT, A. Arquitetura bioclimática. México: Ediciones G. Gili S. A., 1983.
25. LAKATO, E. M., MARCONI, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 3ª edição. São Paulo: Atlas, 1991.
26. LAKATO, E. M., MARCONI, M. de A. Metodologia do trabalho científico. 4ª edição. São Paulo: Atlas, 1992.
27. LAURIE, I. C. Urban commons, In: LAURIE, Ian C. (org), Nature in cities: the natural environment in the design and development of urban green space. New York: John Wiley & Sons. pp. 231 – 266, 1979.
28. LIPPSMEIER, G., KLUSKA, M. W., EDRICH, C. G. Tropenbau, building in the tropics. Germany: Callwey Verlag München, 1969.
29. LOMBARDO, M. A., ZAMPARONI, C. A. G. P. Heat island in a small tropical city. Book of abstracts, International Conference on Urban Climatology. Essen, Germany. pp. 20, 1996.
30. LOMBARDO, M. A. Ilha de Calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985.
31. MASCARO, L. Ambiência urbana. Porto Alegre: Sagra – D. C. Luzzatto, 1996.
32. MASCARO, L. R. Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo. 2ª edição. São Paulo: Projeto, 1991.
33. MCHARG, I. L. Design with nature. New York: American Museum of Natural History, 1969.
34. MIESS, M. The climate of cities, In: Laurie, Ian C. (org), Nature in cities: the natural environment in the design and development of urban green space. New York: John Wiley & Sons. pp. 91 – 114, 1979.
35. MONTENEGRO JÚNIOR, A. I. A atuação mais recente da Prefeitura Municipal de Fortaleza na implementação de áreas livre de domínio público. Anais do fórum de debates Adolfo Herbster. Fortaleza. pp. 61 – 96, 1981.
36. MORETTIN, P. A., TOLOI, C. M. Séries Temporais. São Paulo: Atual, 1986.
37. MOTA, S. Planejamento urbano e preservação ambiental. Fortaleza: Edições UFC, 1981.
38. MOTA, S. Introdução à engenharia ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 1997.
39. MOTA, S. Urbanização e meio ambiente. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
40. OBASI, G. O. P. Weather and water in cities. World Meteorological Day, 1997.
41. OLGYAY, V. Design with climate. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
42. OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1981.
43. OMM Les villes accentuent l'évolution du climat (L'Organisation météorologique mondiale démontre qu'il est possible de concilier urbanisme et protection du climat). Genève – Suisse, 1997.
44. PETALAS, K. V. Impactos da urbanização sobre os parâmetros climáticos, em duas áreas de Fortaleza, Ceará. Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Fortaleza, 2000.
45. PITT, D. Trees in the city, In: Laurie, Ian C. (org), Nature in cities: the natural environment in the design and development of urban green space. New York: John Wiley & Sons. pp. 205 – 230, 1979.
46. Prefeitura Municipal de Fortaleza - IPLAM Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano – PDDU/FOR – Síntese Diagnóstica. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza – Instituto de Planejamento do Município, 1991.
47. Prefeitura Municipal de Fortaleza - IPLAM Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano – PDDU/FOR – Lei nº 7.061/92. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza – Instituto de Planejamento do Município, 1991.
48. Prefeitura Municipal de Fortaleza – IPLAM Lei nº 7.987, de 23 de dezembro de 1996. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza – Instituto de Planejamento do Município, 1996.
49. Prefeitura Municipal de Fortaleza Plano Diretor da cidade de Fortaleza Lei nº 2.128, de 20/03/63. Fortaleza, 1969.
50. REPELLI, C. A., ALVES, R., SOUZA, E. B. de, UBARANA, V. N., ALVES, J. M. B. Sensação térmica para Fortaleza-CE, Monitor Climático, 11 (121), pp. 8 – 16, 1997.
51. RIBEIRO, J. O. de S. Documentário do memorial justificativo do Plano Diretor para a cidade de Fortaleza. Apresentado à Prefeitura Municipal de Fortaleza em 1947. In: Revista do Instituto do Ceará, Tomo LXIX, Ano LXIX, 1955.
52. ROMERO, M. A. B. Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. São Paulo: Projeto, 1988.



53. SANTANA, A. M. S. O desenho urbano e a climatologia em Fortaleza. Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Geografia da USP. São Paulo, 1997.
54. SMITH, K. Principles of applied climatology. New York: John Wiley & Sons, 1975.
55. SPIRN, A. W. O jardim de granito: a natureza no desenho da cidade. Tradução do original, em inglês, por Paulo R. M. Pellegrino. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1995.
56. STEVENSON, W. J. Estatística aplicada à administração. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1981.
57. TERJUNG, W. H., O'ROURKE, P. A. Relative influence of vegetation on urban energy budgets and surface temperatures. *Boundary - Layer Meteorology*, 21, pp. 255 – 263, 1981.
58. TUBELIS, A., NASCIMENTO, F. J. L. Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Nobel S.A., 1980.
59. XAVIER, T. de M. B. S. Modificação do tempo e mudança climática: estado atual e perspectivas para a região nordeste. ANAIS IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, Fortaleza. pp. 365 – 384, 1981.
60. XAVIER, T. de M. B. S. Análise de mudanças climáticas urbanas na Região Metropolitana de Fortaleza – RMF: evolução da 'Ilha de Calor' e seus impactos ambientais na bacia hidrográfica metropolitana. Projeto de pesquisa. Fortaleza, 1996.
61. XAVIER, T. de M. B. S., XAVIER, A. F. S. Alterações climáticas urbanas em Fortaleza – Ceará (1974 – 95' In: Os benefícios das modernas técnicas de previsão de tempo e clima para as atividades sócio-econômicas. ANAIS DO IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos do Jordão. pp. 1172 – 1176, 1996.
62. XAVIER, T. de M. B. S., XAVIER, A. F. S., DIAS, M. A. F. da S. Evolução da precipitação diária num ambiente urbano: o caso da cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 9 (1), pp. 44 – 53, 1994.
63. XAVIER, T. de M. B. S., XAVIER, A. F. S., DIAS, P. L. da S. Mudanças da temperatura do ar na cidade de São Paulo – Brasil (1933 – 1992) In: Os benefícios das modernas técnicas de previsão de tempo e clima para as atividades sócio-econômicas. ANAIS DO IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos do Jordão. pp. 1060 – 1064, 1996.