

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTUDO DO ACOPLAMENTO ESTRUTURAL DE
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS PELO
MÉTODO DA ROTAÇÃO DO ESPAÇO DE TEMPOS
DEFASADOS A PARTIR DE SÉRIES DE
TEMPERATURA DO AR NA RESERVA
BIOLÓGICA DE JARU**

MATHEUS BRUNO RODRIGUES CERINO

Prof. Dr. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO
Orientador

**Cuiabá - MT
Maio/2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTUDO DO ACOPLAMENTO ESTRUTURAL DE
VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS PELO
MÉTODO DA ROTAÇÃO DO ESPAÇO DE TEMPOS
DEFASADOS A PARTIR DE SÉRIES DE
TEMPERATURA DO AR NA RESERVA
BIOLÓGICA DE JARU**

MATHEUS BRUNO RODRIGUES CERINO

*Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Física Ambiental
da Universidade Federal de Mato
Grosso, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Física
Ambiental.*

PROF. DR. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO
Orientador

**Cuiabá - MT
Maio/2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

R696e Rodrigues Cerino, Matheus Bruno.
ESTUDO DO ACOPLAMENTO ESTRUTURAL DE VARIÁVEIS
MICROMETEOROLÓGICAS PELO MÉTODO DA ROTAÇÃO DO ESPAÇO DE
TEMPOS DEFASADOS A PARTIR DE SÉRIES DE TEMPERATURA DO AR NA
RESERVA BIOLÓGICA DE JARU-RO / Matheus Bruno Rodrigues Cerino. -- 2021
99 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Sérgio Roberto de Paulo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2021.
Inclui bibliografia.

1. Teorema de Takens. 2. Rotação. 3. Acoplamento Estrutural. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTUDO DO ACOPLAMENTO ESTRUTURAL DE VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS PELO MÉTODO DA ROTAÇÃO DO ESPAÇO DE TEMPOS DEFASADOS A PARTIR DE SÉRIES DE TEMPERATURA DO AR NA RESERVA BIOLÓGICA DE JARU-RO

AUTOR: MESTRANDO MATHEUS BRUNO RODRIGUES CERINO

Dissertação defendida e aprovada em **27 de maio de 2021**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo – Orientador - Instituto de Física – UFMT

Profa. Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo – Examinadora Interna - Instituto de Física – UFMT

Prof. Dr. Vinícius Buscioli Capistrano- Examinador Externo - Instituto de Física (INFI) – UFMS

Cuiabá-MT, 27/05/2021.



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO ROBERTO DE PAULO, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 28/05/2021, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Buscioli Capistrano, Usuário Externo**, em 28/05/2021, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 28/05/2021, às 21:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3548505** e o código CRC **197B9682**.

DEDICATÓRIA

Aos meus ancestrais, desde indígenas - povos originários - e africanos - nascidos em diáspora - até meus bisavós. Às três mulheres de minha vida: minha avó, minha mãe e minha irmã; respectivamente Idalice (Daia), Idamirce (Preta) e Idamara (Dada). Aos meus sobrinhos: Pablo, João, Guilherme, Rian - meu afilhado -, Fábio, Gabriela, Anna e Alice.

A minha família, Rodrigues da Silva/Casa de São Jorge Guerreiro.

Dedico especialmente a escola pública.

AGRADECIMENTOS.

- ❖ A Deus, a meu São Benedito e Nossa Senhora do Rosário, a Iemanjá mãe das cabeças, a Ogum dono de minha casa, ao Orixá regente da minha cabeça e todos os Guias de Luz, em especial a Pai Chico Preto.
- ❖ A minha mãe e avó, as maiores responsáveis por quem sou.
- ❖ Pedro Pereira de Souza por ser uma espécie de padrinho acadêmico, desde meus primeiros anos do jardim de infância.
- ❖ A meus orientadores Paulo Sérgio e minha orientadora de coração Iramaia.
- ❖ O meu primeiro orientador Miguel
- ❖ Aos meus professores.
- ❖ A meu padrinho, meu padrasto e meu tio; Jair, Valentim e Estevam.
- ❖ As minhas tias Ilda, Tânia e Idaiuce.
- ❖ Aos meus irmãos mais velhos Paulo (primo) e Regis (enteado de minha mãe) e ao caçula Jair (primo).
- ❖ Os maiores amigos que eu poderia ter: Alysson, Barbara, Diego, Gabriel, Halliere, Ranniere, Raul e Sumai.
- ❖ Aos meus amigos de jornada acadêmica: Admilson, Cleiton, Halline, Jonh, Leilane e Lucas e Luis.
- ❖ Ao meu amigo virtual Thiago Lima e Douglas Marcacine.
- ❖ E ao melhor parceiro para ouvir boa música e tomar bons vinhos Willian Campos.

❖ In Memoria de:

Tio João Pedro e de Tia Vilminha

EPÍGRAFE

*“Mãe Preta chorou,
Chorou na fonte das cachoeiras.
Mãe Preta chorou,
quando o Clarim anunciou.
Mãe Preta chorou de emoção,
quando a libertação chegou.
Mãe Preta louvou Ogum,
pela glória desse dia.
Mãe Preta louvou as Almas,
no rosário de Maria.”*

(Autor desconhecido - Cantiga de Terreiro)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	7
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. PROBLEMÁTICA	14
1.2. JUSTIFICATIVA	15
1.3. OBJETIVO	16
1.3.1. Objetivo Geral	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. TEORIA DA COMPLEXIDADE	18
2.2. SISTEMAS DINÂMICOS	20
2.2.1. Linearidade	22
2.2.2. Não Linearidade	30
2.2.3. Sistemas Naturais / Dinâmica Micrometeorológica	38
2.3. SÉRIES TEMPORAIS	40
2.4. O RACIONALISMOS E A COMPLEXIDADE	41
2.4.1. Leis de Radiação	42
2.4.2. Saldo de Radiação	45
2.4.3. Balanço de Energia	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1. ÁREA DE ESTUDO	50
3.2. METODOLOGIA E COLETA DE DADOS	51
3.3. TEOREMA DE TAKENS	51
3.3.1. Atratores de Temperatura do ar	53
3.4. ROTAÇÃO DO ESPAÇO DE FASE	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1. CARACTERIZAÇÃO COMPORTAMENTAL DAS VARIÁVEIS	59
4.2. RECONSTRUÇÃO DE ATRATORES DE TEMPERATURA DO AR	72
4.3. MATRIZ DE TEMPERATURA DO AR ROTACIONADA	77
4.4. ANÁLISE DA INFORMAÇÃO MÚTUA	81
5. CONCLUSÃO	91
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Esfera acoplada a mola e força resultante vs deslocamento vertical.	233
Figura 2: evolução temporal das funções do “y”, “x”.....	24
Figura 3: evolução do oscilador harmônico simples descrito independente do tempo.	25
Figura 4: retrato de fase de um oscilador harmônicos amortecido.	27
Figura 5: descrição da trajetória do pêndulo no espaço de fase.	27
Figura 6: retrato de fase de um pêndulo com diferentes energias aplicadas inicialmente.	28
Figura 7: representação cilíndrica do espaço de fase, de um pêndulo ideal.	29
Figura 8: espaço de fase cilíndrico, curvo em “U”, descrevendo diferentes níveis de energia para o movimento pêndulo simples.....	29
Figura 9: retrato de fase do sistema exemplificado na equação 2.14.....	32
Figura 10: espaço de fase de um pêndulo amortecido, enrolado de forma cilíndrica e dobrado em “U”.	33
Figura 11: tipos básicos de atratores.	34
Figura 12: o atrator de Lorenz de 1963.....	35
Figura 13: objetos fractais; (a) triângulo de Sierpinski, (b) Esponja de Menger e (c) curva de Koch.	36
Figura 14: gráfico da dimensão de correlação pelo método de (GRASSBERGER e PROCACCIA, 1983).	38
Figura 15: propagação do campo elétrico (E), magnético (B) e orientação do campo eletromagnético gerado (V).	54
Figura 16: espectro eletromagnético.	42
Figura 17: distribuição da radiação de corpos negros para diferentes temperaturas..	43
Figura 18: absorção dos principais componentes atmosféricos.	45
Figura 19: localização geográficas da Reserva Biológica de Jarú.	46
Figura 20: climatologia da precipitação pluvial no estado de Rondonia, período de estudo de 1981 a 2011.....	50
Figura 21: atratores reconstruídos segundo o teorema de Takens, com dados de temperatura do ar, (a) período seco e (b) período chuvoso.....	51

Figura 22: matriz de tempos defasados em τ e 2τ , e matriz de rotação para α igual a 250° , construída de acordo com a equação 3.1.	57
Figura 23: médias mensais de temperatura do ar dos anos 2008, 2009 e 2010. ... Erro!	
Indicador não definido.	
Figura 24: médias mensais de umidade relativa do ar dos anos de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	60
Figura 25: médias mensais de radiação líquida dos anos de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.....	61
Figura 26: séries de temperatura o ar, ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.....	63
Figura 27: série de temperatura do ar, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	65
Figura 28: série de umidade relativa do ar, ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	66
Figura 29: série de umidade relativa do ar, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.....	68
Figura 30: série de radiação líquida , ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.....	69
Figura 31: série de radiação líquida disponível, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.....	70
Figura 32: atratores reconstruídos de temperatura do ar para o mês de agosto de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010, posicionados em 30° de no plano cartesiano.....	72
Figura 33: atratores reconstruídos de temperatura do ar para o mês de fevereiro de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010, posicionados em 30° de o no plano cartesiano.....	74
Figura 34: séries de radiação líquida e séries obtidas pela rotação da matriz de temperatura do ar de agosto, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	76
Figura 35: séries de radiação líquida e séries obtidas pela rotação da matriz de temperatura do ar de fevereiro, dos anos de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010. Erro!	
Indicador não definido.	
Figura 36: evolução dinâmica da radiação líquida do período seco e da série obtida pela rotação da matriz de temperatura do ar ao longo do primeiro dia de agosto, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	770

Figura 37: evolução dinâmica da radiação líquida do período chuvoso e da série obtida pela rotação da matriz de temperatura do ar ao longo do primeiro dia de fevereiro, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	79
Figura 38: análise da informação mútua vs tempo defasado entre a radiação líquida e temperatura do ar para agosto de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	80
Figura 39: análise da informação mútua vs tempo defasado entre a radiação líquida e temperatura do ar para fevereiro de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	81
Figura 40: análise da informação mútua vs tempo defasado entre as séries obtidas pela rotação das matrizes de temperatura do ar com as séries da radiação líquida de agosto dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 41: análise da informação mútua vs tempo defasado entre as séries obtidas pela rotação das matrizes de temperatura do ar com as séries da radiação líquida de fevereiro dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.	Erro! Indicador não definido.
Figura 42: médias mensais de umidade relativa do ar e informação mútua de cada mês. Dados em porcentagem.	88
Figura 43: regressão linear de informação mútua com os dados de umidade relativa do ar.....	89

RESUMO

CERINO, R. B. M., A. **Estudo do acoplamento estrutural de variáveis micrometeorológicas pelo método da rotação do espaço de tempos defasados a partir de séries de temperatura do ar na Reserva Biológica de Jarú-RO.** 99 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2021.

Reconhecida a importância do estudo da dinâmica de ecossistemas, destacam-se estudos voltados à caracterização da dinâmica da Floresta Amazônica. Nesse aspecto, são estudadas metodologias eficazes na obtenção de resultados que caracterizam essa dinâmica. Uma técnica que se destaca nesse processo é a descrita pelo teorema de Takens (1981), que é eficiente em caracterizar dinâmica de sistemas complexos, utilizando apenas uma série de dados com correlação suficientemente forte com o sistema. Embasado em estudos anteriores desenvolvidos pelo Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental e utilizando séries de dados de temperatura do ar, neste estudo foi caracterizada a dinâmica micrometeorológica da Reserva Biológica de Jarú. Posterior a caracterização, foi utilizada a técnica de rotação do espaço de tempos defasados para investigar a possibilidade de acoplamento. Os resultados apontaram para a possibilidade não apenas de reconstruir a dinâmica do ecossistema apenas com dados de temperatura do ar, mas também de inferir dados de outras variáveis, como o perfil da radiação líquida. Outros resultados, referem-se à relação estabelecida entre a umidade relativa, radiação líquida e temperatura do ar.

Palavras-chave: Teorema de Takens, Rotação, Acoplamento Estrutural

ABSTRACT

CERINO, R. B. M. A. **Study of the structural coupling of micrometeorological variables by the method of rotation of the space of late times from air temperature series in the Jaru-RO Biological Reserve.** 99 p. Dissertation (Master's Degree in Environmental Physics) – Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2021.

Recognized the importance of studying the dynamics of ecosystems, studies focusing on the characterization of the dynamics of the Amazon forest stand out. In this regard, effective methodologies in obtaining results that characterize this dynamic are studied. A technique that stands out in this process is that described by Takens' theorem (1981), which is efficient in characterizing the dynamics of complex systems, using only a series of data with a sufficiently strong correlation with the system. Based on previous studies developed by the Graduate Program in Environmental Physics and using air temperature data series, this study characterized the micrometeorological dynamics of the Jaru Biological Reserve. After characterization, the matrix rotation technique was used to investigate the possibility of coupling. The results pointed to the possibility, not only of reconstructing the dynamics of the ecosystem using only air temperature data, but also of inferring data from other variables, such as the liquid radiation profile. Other results refer to the relationship established between relative humidity, liquid radiation and air temperature.

Keywords: Takens' Theorem, Rotation, Structural Coupling

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

A extensão territorial do Brasil fez com que ele seja descrito como um país continental. De maneira prática, tal como em um continente, o país é composto por uma diversidade territorial e cultural. Essa diversidade é observada seja nas características regionais de uma comunidade, cidade, estado e/ou região. Entretanto, essa diversidade não é restrita apenas a questões socioculturais, resultado do intercâmbio cultural - por contas da cultura indígena somada à cultura africana, além da cultura europeia e asiática -, e resultado da desigualdade social brasileira. A diversidade estende-se ao campo dos estudos ambientais, isso pois o Brasil é composto por cinco ecossistemas, esses compostos por uma vastidão biológica.

Um desses ecossistemas é composto pelo bioma Floresta Amazônia. A Floresta Amazônica se destaca como objeto de estudos ambientais e sociais. A floresta corresponde ao maior bioma no território brasileiro estendendo-se para além do território nacional. No campo dos estudos ambientais, a floresta Amazônica tem importância devido à grande biodiversidade, além de investigações voltadas para a possibilidade da contribuição de sua dinâmica na regulação do clima global. No âmbito local, a dinâmica da floresta desempenha papel fundamental no regime de chuvas das regiões do centro-sul do território brasileiro.

Por conta de sua importância, diversos estudos dedicam-se a compreender o bioma Amazônico. Isso pois a comunidade científica no momento não se preocupa em compreender apenas a sua dinâmica, mas também a implicância de ações antropogênicas que vem deteriorando a floresta. Seja por conta do desmatamento e queima, provocado principalmente por ações de garimpo ilegal, tráfico de madeira e ações agropecuárias, além do desmonte crescente em órgãos responsáveis pela fiscalização ambiental.

As investigações referentes a Floresta Amazônica, tal como a própria floresta, assumiram papel de destaque, exemplo disso é a investigação de Andrade et al. (2009) que estudou a partição da radiação líquida em áreas da Floresta Amazônica e Floresta de transição Amazônia-Cerrado. Estudo como os de Biudes et. al. (2015), investigou padrão de fluxo de energia dos ecossistemas tropicais, dentre os ecossistemas

estudados estava a Floresta Amazônica. Por sua vez, Pavão et. al. (2018) dedicou-se a compreender a radiação solar de uma região de floresta de transição da Amazônia, através da comparação de estimativas de diferentes modelos.

A compreensão da dinâmica da Floresta Amazônica é um objeto de estudo que apresenta dificuldade, seja pelas últimas interações que ocorrem com as variáveis que a compõem, seja pela sua dimensão. É propício que a abordagem desses estudos considere a interdisciplinaridade e a compreensão de sistemas complexos, tal como um sistema real e longe do equilíbrio - como uma floresta -, se apresenta.

Capistrano (2007), apresenta técnica de Teoria da Complexidade juntamente com análise de séries temporais de variáveis micrometeorológicas para investigar a dinâmica da Floresta de Transição Amazônia-Cerrado. Utilizando dados de séries de temperatura do ar De Paulo (2015), reconstrói a dinâmica utilizando estudos de atratores, também baseada em Teoria da Complexidade. Por sua vez, Prado (2017) avança nas discussões, propondo em seu estudo uma metodologia que utiliza dos conhecimentos anteriores - Capistrano (2007) e De Paulo (2015) - para obter perfil de radiação líquida a partir de séries de temperatura do ar com séries de dados de Floresta de Transição Amazônia-Cerrado.

No presente estudo, a metodologia proposta por Prado (2017), foi reproduzida na Reserva Biológica de Jaru no estado de Rondônia. Além de obter resultados esperados conforme descritos pelo estudo de Prado (2017), o que atestaria a possibilidade de reprodução da metodologia, neste estudo dedicou-se em compreender a interação da variável temperatura do ar, radiação líquida e umidade relativa do ar, ou seja, compreender o acoplamento estrutural entre essas variáveis.

1.2. JUSTIFICATIVA

Para Descartes a Ciência deve a compartimentalização que foi base para a especialização dos saberes. Entretanto, considerar as relações - ambientais, sociais, médicas - compartimentalizadas não revelam as relações como de fato são, revelam idealizações de problemas. Quanto mais próximos da realidade menos ideais e compartimentalizados as ciências tornam-se. Esses são argumentos que reforçam a necessidade de estudos que consideram abordagens interdisciplinares para a descrição de problemas científicos.

Dadas essas considerações, o conhecimento ecossistemas não se consolida a partir de uma especialidade. Nessa perspectiva, estudos fundamentados na Teoria da Complexidade, oferecem maiores perspectivas de interpretações de problemas, com boa aproximação de sistemas reais isso porque ela observa os problemas com completude, dadas as circunstâncias.

Considerando os fundamentos da Teoria da Complexidade, um dos tratamentos para investigação da dinâmica é descrito pelos estudos de Takens (1981) que considera que, um sistema dinâmico, fora do equilíbrio e não linear - tal como ecossistemas - podem ser descritos com a utilização de uma única variável. Os trabalhos de Capistrano (2007) e De Paulo (2015) verificaram a possibilidade do uso da temperatura do ar para descrição de dinâmica de ecossistemas, baseados no teorema de Takens (1981). O estudo de Prado (2017) apontou para a aquisição de dados de radiação líquida aplicando técnica de rotação de matrizes ao teorema de Takens. Esses são indícios de acoplamento estrutural entre as variáveis micrometeorológicas.

A realização de investigação do acoplamento estrutural entre as variáveis é estudo importante, pois além de caracterizar um sistema utilizando apenas uma variável é possível obter informações de outras variáveis. Além de que conhecendo-as será possível compreender a existência ou não de mudanças em seu padrão provocadas por ações antropogênicas.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo desse estudo é dar continuidade aos estudos anteriores desenvolvidos pelo grupo de pesquisa de Análise e Modelagem de Processos Ambientais Complexos, na busca por investigar o acoplamento estrutural de variáveis micrometeorológicas. Isso, aplicando a metodologia teorizada por Prado (2017) na Reserva Biológica de Jarú, que possibilite obter perfil de Radiação Líquida (R_{liq}) através do método de rotação de matrizes de tempos defasados de Temperatura do Ar. Posterior a isso investigar a relação da obtenção de dados com a Umidade Relativa do Ar (UR)

1.3.2. Objetivos Específicos

- Reconstruir atratores de temperatura do ar e interpretar a dinâmica apresentada;

- Aplicar a técnica de rotação de matrizes para a matriz de dados defasados, construídos segundo o teorema de Takens;
- Investigar se as séries obtidas pela defasagem e rotação descrevem perfis semelhantes ao perfil da radiação líquida coletadas na torre micrometeorológica.
- Obter a informação mútua entre os dados obtidos e as séries originais.
- Verificar a influência da umidade na obtenção do perfil de radiação líquida segundo a metodologia e verificar a possibilidade de inferir dados de umidade relativa do ar, confirmando assim o acoplamento na interação das variáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. TEORIA DA COMPLEXIDADE

A história da humanidade é marcada por várias eras que descrevem momentos importantes e emblemáticos. O estudo e conhecimento desses momentos, revelam a importância do estudo acerca das ciências ambientais, para assim basear-se em fatos e nortear as tomadas de decisões sócio-políticas das lideranças governamentais.

A partir do século XVIII, as sociedades europeias começam a experimentar a Revolução Industrial. O processo foi caracterizado pelo desenvolvimento industrial inglês, na busca por substituir o modo de produção e a maximizar o lucro. Processo esse ainda marcado pela presença da forte filosofia Baconiana, ainda que de forma inconsciente, permeada pelo conhecimento de que a natureza deve ser compreendida como serva das necessidades humanas. Bacon, é reconhecido como importante pensador na caracterização dos fundamentos que deu origem ao que é chamado de Ciência Moderna.

O desenvolvimento do campo científico que abrange a termodinâmica é um dos grandes marcos da primeira revolução industrial, com ele o desenvolvimento de máquinas térmicas. No século XIX, há o segundo processo de revolução industrial, este estendendo-se até o fim da Segunda Guerra Mundial. Esse novo período foi marcado principalmente pelo desenvolvimento da indústria química, elétrica, petrolífera e siderurgia. No Brasil esse período é marcado por estímulos governamentais, que buscaram abranger a indústria como um campo de atuação econômico, antes concentrado apenas na agricultura.

O processo de industrialização marcou principalmente por exploração de recursos naturais e liberação de carbono, com isso investigações científicas buscaram identificar a possibilidade de problemas futuros. As críticas a esse modelo social não foram marcadas apenas nos campos das ciências naturais, mas também nas artes. Em Tempos Modernos, por exemplo, Chaplin tece críticas ao sistema econômico, sem deixar de evidenciar o processo industrial. Ou ainda, Carlos Drummond de Andrade em seu poema Elegia 1938, ao citar a ilha de Manhattan, referindo-se ao modelo econômico e a consequente degradação ambiental, principalmente do ar Nova Iorque.

do período em questão, além da ineficiência individual de mudança de paradigmas socioambientais.

Há incerteza acerca dos impactos ambientais causados por ações antropogênicas, opondo-se a isso há crescentes métodos de estudo científicos que buscam saná-las. Estudos interdisciplinares vêm ganhando destaque, para possíveis respostas e apontamentos científicos à cerva de estudos ambientais. A Teoria da Complexidade é uma vertente da ciência contemporânea que aborda questões de forma interdisciplinar, se comprometendo a estudar o comportamento complexo de sistemas.

Mendes (1998) define o que são sistemas simples ou sistemas complexos - dinâmicos. O primeiro apresenta poucas variáveis - independentes e dependentes -, interagindo, configurando, portanto, poucos graus de liberdade; nesse caso o estudo está associado à dificuldade em prever o comportamento do sistema. No caso de sistemas complexos há mais variáveis interagindo, o que descreve maior grau de liberdade, o estudo está relacionado à criação de estruturas.

Nicolis e Prigogine (1998) conceituam a ideia de que as experiências cotidianas são as bases iniciais da estruturação da Teoria da Complexidade. Portanto essa pode ser encontrada comumente em diversos contextos cotidianos, exemplo disso são sistemas reais como a economia ou a linguagem que apresenta consideráveis números de interações entre as variáveis e os fatores envolvidos.

[...] temos a sensação de que a complexidade é de alguma forma relacionada com as diversas manifestações da vida (NICOLIS; PRIGOGINE, 1998, p. 6). Essa afirmação é interpretada segundo ótica das diversas interações que sistemas vivos realizam e além de que esses configuram sistemas reais.

Nesse sentido, a Teoria da Complexidade estuda sistemas principalmente a instabilidade e a previsibilidade limitada de sistemas reais; limitações essas estabelecidas pelas interações dos sistemas. Woodside (2018) sugere que, enquanto a lógica dominante atual nas pesquisas científicas ainda tenta identificar a contribuição única e a importância das variáveis independentes em influenciar as variáveis dependentes usando testes simétricos, os modelos baseados em análises de sistemas complexos apresentam maior precisão em determinados casos.

Isso ocorre, pois, a ciência clássica se estrutura no estudo de sistemas com ordem e estabilidade bem definidos. Portanto, essa estuda sistemas ideais, fechados e

em equilíbrio; já a Teoria da Complexidade estuda a dinâmica de sistemas abertos e distantes de equilíbrio, tais como sistemas reais - não ideais.

Christofolletti (1999) descreve que, na natureza, os processos que a estruturam se organizam em sistemas buscando constantemente a estabilidade através de sua dinâmica, isso é possível devido às trocas constantes de matéria e energia entre os ambientes externos e internos. Sistemas que permitem esse fluxo são denominados de sistemas abertos, ou sistemas complexos.

2.2. SISTEMAS DINÂMICOS

A descrição fenomenológica da natureza sempre foi o maior objetivo das ciências naturais. Nesse contexto, faz-se observações da aparente aleatoriedade e a partir disso são traçadas teorias. Os estudos então indicam ordem determinada por leis bem definidas que confirmam ou não as hipóteses teóricas idealizadas através da observação primária.

Na busca por descrever a dinâmica dos fenômenos observados, são estudadas as relações entre os objetos que interagem no fenômeno, dessa forma é estruturado o estudo de sistemas. Monteiro (2011) descreve que um grupo de objetos agrupados interagindo ou com interdependência, isto é, havendo relações de causa e efeito nos fenômenos que ocorrem com os elementos desse conjunto descreve-se como sistema. Se algum desses elementos (grandezas físicas) que caracterizam o sistema variam no tempo, esses são entendidos como sistemas dinâmicos.

As grandezas físicas que compõem um sistema são classificadas como variáveis dependentes e independentes. Monteiro (2011) ainda aponta que as variáveis dependentes variam de acordo com função estabelecida pela variação de outra; enquanto as variáveis independentes variam livremente.

Villate (2011) descreve sistemas dinâmicos como discretos e contínuos. Sistemas dinâmicos discretos segundo Villate (2011) corresponde a sistemas em que os estados assumidos por ele só mudam durante os instantes $\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_n\}$, ou seja, a variável temporal assume apenas valores discretizados. Para esses: $t \in T = N^*$. Em um sistema dinâmico contínuo a variável temporal assume valores contínuos, de modo que: $t \in T = R$.

Há diversos métodos para tratamento da dinâmica e estados que os sistemas assumem. Isto, graças a técnicas matemáticas que permitiram aos pesquisadores, nas últimas décadas, descobrir padrões ordenados em sistemas, conforme Capra (1997) descreve. Capra (1997) ainda aponta que essas técnicas que podem descrever padrões ordenados em sistemas caóticos são baseadas na abordagem topológica de Poincaré.

Uma abordagem possível do estudo de sistemas dinâmicos discretizados, é através da representação de função iterativa.

$$x_{t+1} = f(x_t) ; t \in N^* \quad 2.1$$

Para o caso de sistemas dinâmicos contínuos, a abordagem é seguindo descrição de técnicas de resolução de equações diferenciais, conforme a seguir.

$$dx/dt = \dot{x} = f(x, t) \quad 2.2$$

A equação 2.2 descreve uma Equação Diferencial Ordinária de primeira ordem. Villate (2019) descreve que uma EDO são equações cinemáticas; por sua vez uma EDO é uma expressão que relaciona uma função e suas derivadas. No caso da expressão 2.2: $x(t)$ e $\dot{x}$. Por fim, a EDO é dita de primeira ordem, se a única derivada que aparece na equação é de primeira ordem. De forma geral, se a variável independente é o tempo “ t ” e a dependente é qualquer “ x ”, a equação diferencial pode ser escrita conforme a representação da equação 2.2.

Há casos onde a variável temporal, embora presente, é implícita na evolução da dinâmica do sistema. Oliveira (2006) nomeia esses casos de equações autônomas; por sua vez, casos onde a variável temporal é explícita são chamados de equações não autônomas.

Uma EDO admite uma variedade de soluções possíveis, corretas para cada situação, dadas as condições iniciais de (t_0, x_0) , isto para casos onde há dependência temporal explícita. Em casos onde é implícita a variável t , ainda que x seja uma função de dependência temporal, as soluções são independentes do parâmetro temporal inicial, ou seja, (t_0, x_0) , (t_1, x_0) , ..., (t_n, x_0) admitem a mesma função, porém essa é deslocada no eixo temporal. Villate (2019) destaca que esses sistemas evoluem a partir de x_0 independente do tempo em que o sistema começa a evoluir.

Villate (2019) descreve que no estudo de sistemas dinâmicos um objeto importante é a determinação da existência de posições de equilíbrio. O equilíbrio de um sistema pode ser estável, se ao afastar o sistema do seu equilíbrio, as forças atuantes sobre esse agirem de forma a restaurar o equilíbrio. Os sistemas também podem apresentar equilíbrio instável, situação onde qualquer variação possível no sistema, as forças contribuem para afastar ainda mais o sistema do equilíbrio.

2.2.1. Linearidade

Um sistema é dito linear se a dinâmica desse puder ser escrita como uma equação diferencial linear, ou seja, combinação de termos lineares. A esses sistemas é possível aplicar os princípios da aditividade e proporcionalidade entre excitação no sistema e resposta que esse apresenta. Nicolis e Prigogine (1998) pontuam que, em um sistema linear, o efeito final da ação combinada de duas causas diferentes é a superposição dos efeitos de cada causa, individualmente consideradas.

De maneira geral, Villate (2019) aponta que se um sistema dinâmico com duas variáveis de estados é definido por duas equações diferenciais - conforme a equação 2.2 - este é linear se as duas funções são combinações lineares das variáveis de estado

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) \quad 2.3$$

$$f_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 \quad f_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 \quad 2.4$$

onde A_{11} , A_{12} , A_{22} e A_{21} são parâmetros constantes característicos do próprio sistema estudado. É notável que nas equações 2.3 e 2.4 não há dependência explícita da variável temporal. Outra maneira de escrever a dinâmica do sistema é na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad 2.5$$

Dessa maneira, determinar a estabilidade do sistema consiste em substituir o lado esquerdo da equação 2.4 por uma matriz nula, resultando em um sistema de equações lineares homogêneas. Em um sistema linear homogêneo há sempre uma solução onde todas as variáveis são nulas, há casos onde quando o determinante da

matriz do sistema é nulo existe mais de uma solução. Se o determinante da matriz é diferente de zero o sistema dinâmico admite um único ponto de equilíbrio.

Villate (2019) ainda descreve que, quando as equações de evolução do sistema, além de serem combinações lineares, apresentam um termo aditivo constante, o equilíbrio do sistema está deslocado. No entanto, ainda assim é possível obter um sistema linear que descreve a dinâmica.

Observando o sistema massa-mola sem forças dissipativas, descrevendo um movimento vertical de oscilação, é possível observar o movimento harmônico simples - MHS. Esse sistema descreve bem um caso onde o equilíbrio é deslocado, conforme a figura 1.

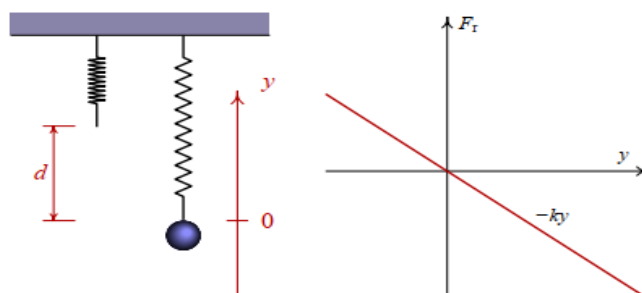


Figura 1: Esfera acoplada a mola e força resultante vs deslocamento vertical.

Fonte: Villate, 2019.

Note que ao acoplar uma esfera a mola o equilíbrio estático será descrito por:

$$m\vec{g} = k\vec{d} \quad 2.6$$

onde, m a massa, $\vec{g}$ a aceleração gravitacional, k constante elástica e $\vec{d}$ a deformação da mola resultado de seu deslocamento.

Dessa maneira a deslocamento da mola “ $\vec{d}$ ” no equilíbrio é $\vec{d} = m\vec{g}/k$. Arranjando a origem do sistema em “ y ” esse descrevendo a posição livre da mola, a deformação da mola é $(d - y)$, é possível escrever a força resultante:

$$\vec{F_r} = k(\vec{d} - \vec{y}) - m\vec{g} = -k\vec{y} \quad 2.7$$

utilizando a segunda lei de Newton, descrevemos a aceleração

$$d^2\vec{y}/dt^2 = -k\vec{y}/m \quad 2.8$$

de forma que as constantes “ k ” e “ m ” sejam positivas, escrevemos $\omega = \sqrt{(k/m)}$.

Substituindo em 2.8

$$d^2\vec{y}/dt^2 = -\omega^2\vec{y} \quad 2.9$$

A evolução dinâmica deste sistema pode ser descrita por duas equações diferenciais lineares, a sua posição “ $\vec{y}$ ” e sua velocidade “ $d\vec{y}/dt$ ”, porém para utilizar as mesmas unidades, definiremos “ $\vec{x} = \vec{v}/\omega$ ”, uma variável com unidade de distância, porém proporcional a velocidade. Em função das variáveis de estados “ x ” e “ y ” observamos em 2.10 um sistema autônomo de primeira ordem que é equivalente a 2.9.

$$\begin{aligned} d\vec{x}/dt &= -\omega\vec{x} \\ d\vec{y}/dt &= \omega\vec{y} \end{aligned} \quad 2.10$$

A solução dessas equações diferenciais, descreve uma função que derivada uma primeira vez retorna na função, multiplicada por uma constante e se derivada novamente o mesmo acontece. Uma solução que caracteriza isso é uma função senoide ou cossenoide.

$$\begin{aligned} \vec{x}(t) &= A\cos(\omega t + \varphi) \\ \vec{y}(t) &= A\sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad 2.11$$

onde “ A ” é a amplitude do MHS, “ ω ” é a frequência angular e “ φ ” a constante de fase. Note que a velocidade “ $d\vec{y}/dt$ ” está de acordo com o que definimos, logo, $\vec{v} = \vec{x}\omega$.

Com a solução 2.11 temos duas funções não-autônomas que nos proporcionam estudar as posições de equilíbrio e a estabilidade do sistema para cada componente “ y ”, “ x ” - “ v ”. Conforme a figura 2 ilustra.

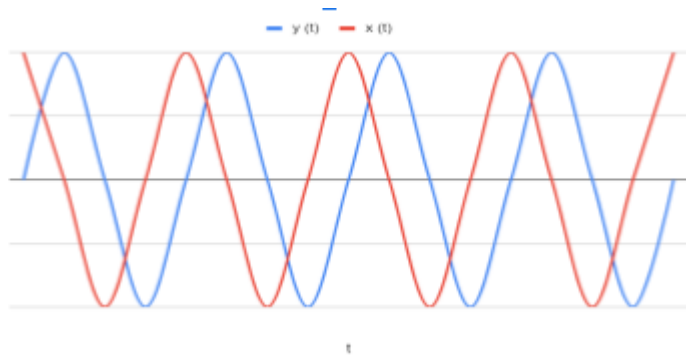


Figura 2: evolução temporal das funções do “ y ”, “ x ”.

Também é possível observar a evolução dinâmica desse sistema de modo a não depender da variável temporal embora ela esteja presente, ou seja, de forma autônoma onde o tempo é observado implicitamente. Nesse caso, a evolução do sistema é

observada em um gráfico onde as funções de estado são plotadas uma versus a outra conforme a figura 3.

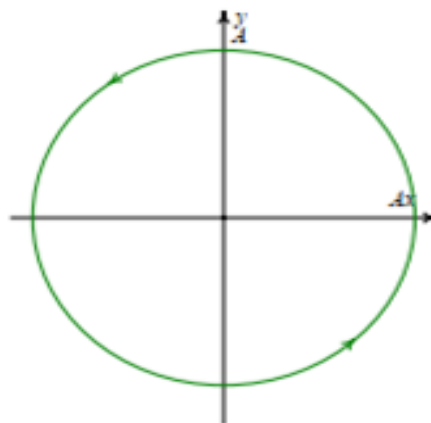


Figura 3: evolução do oscilador harmônico simples descrito independente do tempo.

Fonte: Villate, 2019.

2.2.1.1. Espaço de Fase

Monteiro (2011) observa que uma das técnicas utilizadas para investigar como um sistema dinâmico evolui é a reconstrução de um espaço de fase. Nessa perspectiva, conforme aponta Oliveira (2006), realizando com cálculos analíticos relativamente simples, ao invés de procurar fórmulas, a abordagem investigada preocupa-se em descrever as características da topologia do espaço assumidos pelas funções das variáveis que compõem o sistema.

Na figura 3, podemos notar que a dinâmica é obtida unicamente pelos estados que o sistema assume, assim portanto conseguimos reconstruir um espaço de estados. Segundo Capra (1997), Poincaré notou que as propriedades qualitativas das soluções das funções que compõem um sistema, podiam ser estudadas sem que suas soluções fossem determinadas explicitamente.

A esse espaço de estados foi atribuído espaço de fase. Dessa forma, segundo De Paulo (2015), a reconstrução da dinâmica do sistema é baseada no espaço abrangido por suas variáveis constitutivas e os estados que essas assumem. O espaço de fase para Savi (2002) é um espaço abstrato em que nele são dispostos vetores de estado, representado por $\{q_1(x_1, x_2, \dots, x_k), q_2(x_1, x_2, \dots, x_k), \dots, q_n(x_1, x_2, \dots, x_k)\}$. Os

vetores são n-dimensionais, seus eixos cartesianos são descritos pelas coordenadas generalizadas: $x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)$.

Nessa perspectiva, portanto, a evolução temporal de uma variável qualquer não é explícita, embora ela seja determinada por equações diferenciais de primeira ordem.

$$dx_1/dt = f_1(x_1, x_2, \dots, x_k, t)$$

$$dx_2/dt = f_2(x_1, x_2, \dots, x_k, t)$$

2.12

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$dx_k/dt = f_n(x_1, x_2, \dots, x_k, t)$$

Monteiro (2011) descreve que a dimensão do espaço de fase é equivalente ao número de equações de primeira ordem necessárias para descrever a evolução dinâmica do sistema. Observe que conforme as equações 2.3 e 2.12, “ x_k ” são as variáveis de estado, enquanto “ f_n ” é entendida como campo de velocidade do sistema ou campo vetorial, conforme aponta Villate (2019).

Em um instante “ t ” as variáveis assumem um dado estado. Esse, no espaço de fase, define um estado potencial do sistema nesse instante. Um conjunto de estados assumidos pelas variáveis a partir das condições iniciais descreve as curvas que caracterizam a evolução do sistema, a esse conjunto de curvas é dado o nome de retrato de fase. A figura 3 descreve o retrato de fase do Oscilador Harmônico Simples sem forças dissipativas, obtido segundo o conjunto de estados assumidos pelas suas respectivas variáveis de estado.

Se considerarmos para o exemplo um Oscilador Harmônico Amortecido, o retrato de fase será conforme a figura 4.

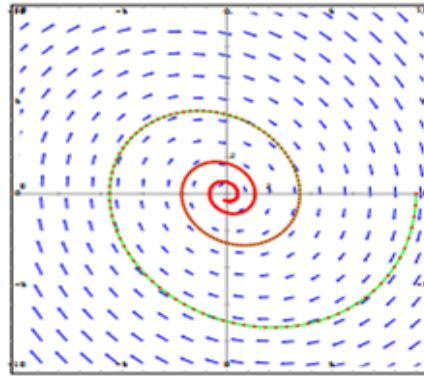


Figura 4: retrato de fase de um oscilador harmônicos amortecido.

Fonte: Villate, 2019.

Outro exemplo da descrição da evolução de um sistema em um espaço de fase é o pêndulo simples, conservativo. A energia total desse é descrita pela hamiltoniana:

$$H = ml[1/2l(d\theta/dt)^2 + g(1 - \cos\theta)] \quad 2.13$$

nesse caso “ m ” é a massa do objeto, “ l ” é comprimento da haste do pêndulo e “ θ ” o ângulo formado entre a normal no ponto de equilíbrio do pêndulo e a abertura do mesmo, derivada “ $d\theta/dt$ ” é a velocidade angular (ω) do sistema. Conforme a figura 5, as variáveis de estado são a velocidade angular e o ângulo.

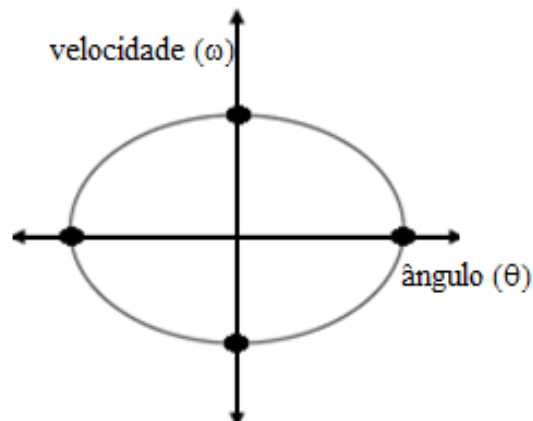


Figura 5: descrição da trajetória do pêndulo no espaço de fase.

Fonte: Stewart, 1991.

Observe que num sistema descrito segundo o espaço de fase é notável os vínculos estabelecidos por esses. Para o sistema da figura 5, o espaço de fase é construído de acordo com a hamiltoniana que descreve a energia total do sistema, ou

seja, os valores de módulos máximos assumidos pela variação angular e a variação da velocidade angular são vinculados a energia total desse sistema. Isto ocorre pois consideramos esse sistema conservador, de forma que não haja ganho ou perda energia total, embora as energias relacionadas às variáveis envolvidas se alterem. Dessa maneira para diferentes energias total aplicada inicialmente ao sistema, haverá outra no escalas de um retrato de fase conforme apresenta a figura 6.

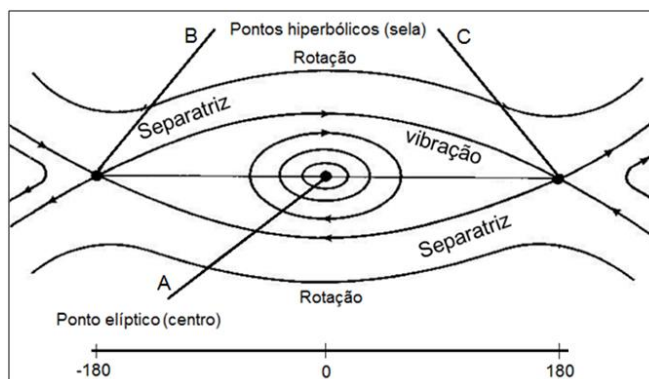


Figura 6: retrato de fase de um pêndulo com diferentes energias aplicadas inicialmente.

Fonte: Stewart, 1991.

Observe que os sistemas parte do ponto **A**, o ponto de menor energia assumido pelo sistema, nesse “ θ ” e “ ω ” assumem valores constantes e iguais a zero. Conforme a energia atribuída ao sistema aumenta, o retrato de fase assume formato elíptico fechado, que descreve movimento de vibração, isso é, ainda é presente em um regime oscilatório. Na situação onde a energia inicial associada ao sistema é suficientemente grande, este extrapola a energia máxima para o pêndulo oscilar, o mesmo passa a comportar-se como uma hélice descrevendo o movimento de revolução.

Na figura 6, vemos que os pontos **B** e **C** são os limites da elipse. Nesses pontos, a velocidade angular é zero e a amplitude assume os valores máximos de -180° e $+180^\circ$, respectivamente. Por representar o limite entre o movimento oscilatório e o movimento de rotação, **B** e **C**, descrevem estados de equilíbrio instável. Por sua vez, a região de **A** até os pontos limites antes **B** e **C** descrevem equilíbrio estável. Dessa forma é possível compreender que qualquer alteração que ocorra na região de equilíbrio instável o sistema assumirá nova configuração de equilíbrio.

Stewart (1991) demonstra através de artifícios matemáticos de topologia que os pontos **B** e **C** correspondem a um auto-estado, ou seja, é possível em um sistema de coordenadas apropriado demonstrar que há igualdade entre eles. A demonstração espacial disso é dada pela dobradura do espaço de fase em formato cilíndrico (figura 7), de modo que os pontos **B** e **C** coincidam.

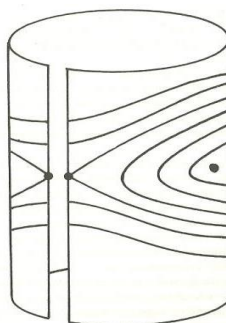


Figura 7: representação cilíndrica do espaço de fase, de um pêndulo ideal.

Fonte: Stewart, 1991.

A igualdade entre os pontos **B** e **C** é dada completando uma volta completa no eixo angular “ θ ”, ou seja, 360° dessa maneira o sistema está de volta a sua origem. Somando, portanto, o ângulo descrito em “ θ ” com 360° - ou qualquer múltiplo seu - numericamente será obtido o mesmo ângulo. $-180^\circ + 360^\circ = +180^\circ$.

Em conformidade com o apontamento de Stewart (1991), nessa representação não é possível identificar que o ponto **A** descreve o estado de menor energia, e nem que os pontos **B** e **C** - que são o mesmo ponto - descreve a maior energia do sistema possível para movimento periódico. A solução para esse problema é curvar o cilindro no formato de “U”, de acordo com a figura 8.

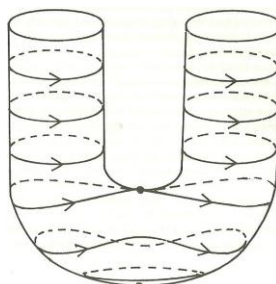


Figura 8: espaço de fase cilíndrico, curvo em “U”, descendo diferentes níveis de energia para o movimento pêndulo simples.

Fonte: Stewart, 2019.

Nessa representação é notável o estado de menor energia e o estado de energia limite do movimento oscilatório e rotacional. Agora é possível observar que a energia aplicada no limite do movimento oscilatório é maior. Para valores de energia superiores à energia empregada no ponto de instabilidade, há duas possibilidades distintas de trajetórias para o movimento rotacional. O pêndulo será configurado para girar para o sentido horário ou anti-horário, seguindo o caminho descrito pela haste da esquerda para a direita.

2.2.2. Não Linearidade

Na figura 4, observamos um oscilador harmônico amortecido, ou seja, um sistema com mais variáveis independentes. Entretanto o tratamento para a descrição no espaço de fase é o mesmo, cada ponto corresponde a um vetor de estado - estados assumidos pelas variáveis que compõem o sistema -, as variáveis que compõem o vetor são representadas por cada uma das coordenadas em uma das dimensões do espaço de fase. Nessa abordagem, se um sistema tem n variáveis, um ponto no espaço carrega informações das n variáveis que o compõem.

Tais como sistemas lineares, em sistemas não lineares a variação temporal pode ser implícita ou explícita, como descreve Oliveira (2006). Portanto, esses sistemas podem ser definidos como autônomos ou não-autônomos também.

Villate (2011) aponta que um sistema autônomo é definido como não linear, se esse é descrito por duas equações diferenciais, onde as funções não são simplesmente a combinação linear entre as variáveis “ x ” e “ y ”, tais como os exemplos abaixo.

$$dx/dt = f(x, y)$$

$$dy/dt = g(x, y)$$

Exemplo:

$$dx/dt = 4 - x^2 - 4y^2$$

$$dy/dt = y^2 - x^2 + 1$$

2.14

Uma consequência prática da ausência de combinação linear entre as variáveis é interpretada por Nicolis & Prigogine (1998); segundo eles para definir se uma função se comporta de forma linear ou não linear basta saber se há a aplicabilidade da

propriedade da superposição. Conforme discutido na sessão, Linearidade: em um sistema linear a ação combinada de duas causas diferentes resulta na superposição dos efeitos de cada causa, considerados individualmente.

Savi (2002) ainda aponta que uma característica básica de um sistema dinâmico descrito por funções não lineares é que eles são sensíveis às condições iniciais e as variações de seus parâmetros. Essa variação pode ocasionar uma mudança inesperada no comportamento qualitativo do sistema, de forma que esse pode ocasionar um comportamento caótico. Exemplo de mudança na configuração do comportamento da dinâmica devido alteração nas condições iniciais e/ou paramétrica é observada na figura 6.

Com a ajuda dos computadores atuais de alta velocidade, os cientistas podem resolver equações não lineares por meio de técnicas que antes não estavam disponíveis. Esses poderosos computadores podem facilmente traçar as trajetórias complexas que Poincaré nem mesmo tentou desenhar.”
(CAPRA, 1997, p. 100).

Não há técnicas analíticas gerais para solucionar essas equações, nesses casos os métodos numéricos, por exemplo, apresentam mais problemas. Porém o estudo gráfico da evolução da dinâmica do sistema no espaço de fase é satisfatório para analisar o comportamento deste (VILLATE, 2011). Os estados que cada variável assume, cujo seu conjunto descreve a evolução dinâmica é o objeto de análise nessa perspectiva.

Na figura 4, por exemplo, é possível notar um padrão de amortecimento na evolução do oscilador harmônico e a busca por identificar o padrão é o objeto estudado para identificar a dinâmica, a partir dele busca-se interpretar a dinâmica. O exemplo empregado na expressão 2.14, descreve o retrato de fase ilustrado na figura 9.

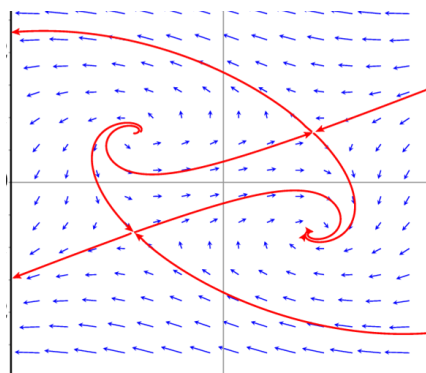


Figura 9: retrato de fase do sistema exemplificado na equação 2.14.

Fonte: Villate 2011.

Observe que aparentemente na figura 9 o campo de direções - em azul -, não apresenta ordem - diferente da figura 4 -, isso pois não é possível identificar alguma forma geométrica. No entanto, ainda sim é possível identificar um “caminho” ordenado, ainda que estranho, para o qual o campo de direção aponta, de modo que a dinâmica do sistema tenha essas características.

2.2.2.1. *Atratores*

Nussenzveig (2003) descreve que o atrator de um sistema dinâmico é uma situação para a qual, ainda que empregando muitos possíveis e diferentes estados iniciais, o sistema tende a assumir, isto após um tempo suficientemente longo. Na figura 4 por exemplo, que estuda um oscilador harmônico amortecido - pode representar também um pêndulo amortecido -, vemos que o sistema tende ao repouso, independente das condições iniciais empregadas a ele.

Stewart (1991) demonstra que utilizando o recurso de topologia conforme a figura 8, para descrever a dinâmica de um pêndulo amortecido, será possível observar sua dinâmica conforme a figura 10.

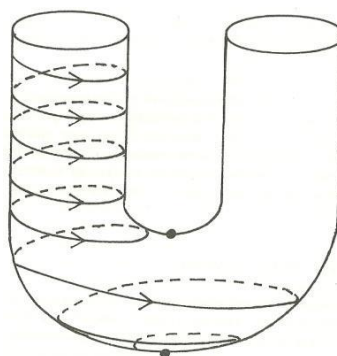


Figura 10: espaço de fase de um pêndulo amortecido, enrolado de forma cilíndrica e dobrado em “U”.

Fonte: Stewart, 1991.

Observe que o sistema parte de um estado com energia suficiente para realizar movimento circular, perdendo energia até começar a pendular, de forma que sua amplitude de oscilação diminuía. Após um tempo suficientemente grande o sistema encontra-se em repouso. Note que o sistema descreve no espaço de fase uma trajetória até o ponto do estado onde a energia do sistema é mínima. Segundo Stewart (1991), a esse estado de preferência do sistema onde a sua energia é mínima e eventualmente ele estabiliza dá-se o nome de atrator.

Segundo Ramesh et. al. (2018) a reconstrução de atratores possibilita caracterizar os estados físicos de acordo com sua previsibilidade, possibilitando estudar características dos estados do sistema do qual pode-se esperar futuras previsões. De acordo com Eckmann e Ruelle (1985), um atrator pode ter a mesma quantidade de graus de liberdade que as variáveis que influenciam o sistema que ele caracteriza, de modo que a análise do atrator fornece informações do comportamento das variáveis que compõem o sistema.

Conforme a figura 11, na literatura é encontrado quatro tipos básicos de atratores, eles são classificados topologicamente de acordo com as características que eles assumem em seus respectivos sistemas.

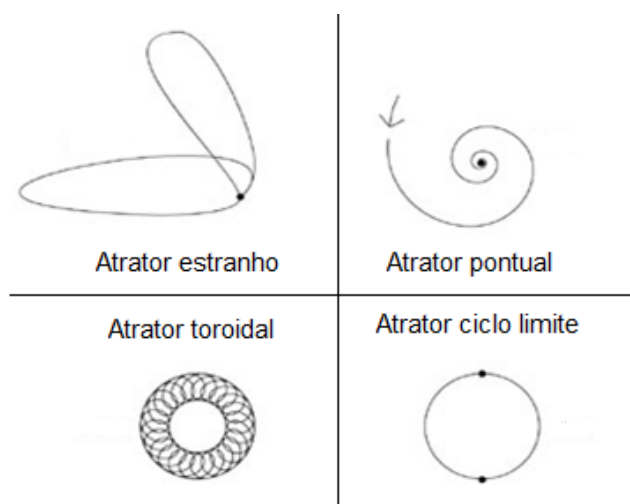


Figura 11: tipos básicos de atratores.

Fonte: Prado, 2017.

- Atratores Pontuais (estáveis): de ordem zero, esses são atratores que convergem para um único ponto no espaço de fase. São descritos como estáveis pois esses derivam de sistemas que atingem o equilíbrio estável.
- Atratores cíclicos limite (periódicos): de ordem um, descrevem uma circunferência no espaço de fase. Esses são atratores que derivam de sistemas periódicos.
- Atratores toroidais (quase-periódicos): são de ordem dois, eles derivam de sistemas cíclicos, eles têm componentes superpostos com frequências na mesma série. Por esse motivo, atratores desse tipo perfazem dois ciclos e se estabilizam formando um solenoide.
- Atratores estranhos (aperiódicos): sua ordem é maior que dois, podendo ser inteiros ou reais. São atratores que derivam de sistemas sensíveis às condições iniciais, ou seja, esses descrevem um sistema não linear.

Castilho (2011) enuncia que os atratores estranhos descrevem trajetórias aperiódicas - ou periódicas se consideramos como período infinito -, nunca se cruzam de modo que sua tenha comprimento infinito e está disposta em uma área finita do espaço de fase de volume zero. Tsonis (1992) descreve que essa condição é satisfeita pois esses atratores descrevem geometria fractal.

Em 1963 Lorenz publica o primeiro atrator estranho (figura 12), ele apresenta um comportamento complexo, embora seja regido por poucas e simples equações

diferenciais. Moreira (1993) diz que a dinâmica apresentada por Lorenz exibe características não usuais.

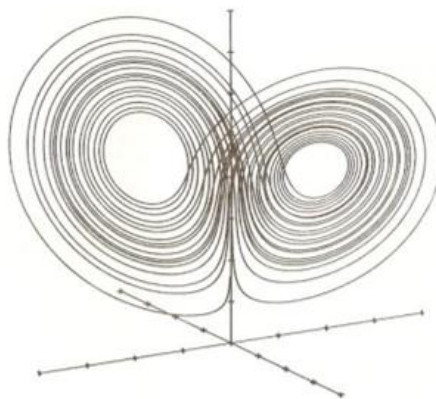


Figura 12: o atrator de Lorenz de 1963.

Fonte: Gleick, 1990.

Sistemas que apresentam atratores estranhos são chamados de caóticos determinísticos, ou seja, embora descreva um comportamento aperiódico e imprevisível, a sua dinâmica é regida por equações diferenciais determinísticas simples.

Van Den Bleek e Schouten (1993) descrevem que um sistema caótico está imerso em um espaço de fase n -dimensional, de forma que n é a dimensão de imersão do atrator e representa o número de graus de liberdade do sistema no espaço de fase verdadeiro. O atrator, mesmo imerso em um espaço n -dimensional, é restrito a apenas uma parte do seu espaço de fase. Segundo Castilho (2011), isto dá-se por conta da natureza fractal do atrator, sua estrutura é caracterizada por um número adimensional, a “dimensão de correlação”, um número não-inteiro que se refere à medida que o atrator preenche o espaço de imersão.

2.2.2.1.1. *Dimensionalidade Fractal*

Segundo Razminia et. al. (2020), a definição formal de fractais e seu conceito matemático é difícil até mesmo para matemáticos, entretanto Mandelbrot em 1975 afirma que um conjunto é denominado fractais se sua dimensionalidade de Hausdorff - dimensão fractal - for estritamente menor que a sua dimensão topológica. A dimensionalidade topológica de um sistema é sempre um número inteiro, logo a dimensionalidade do fractal é um número real.

Os fractais são um conjunto de objetos cuja forma é irregular ou fragmentada e apresenta essencialmente a mesma estrutura em todas as escalas, (NUSSENZVEIG, 2003). São suas principais características conforme a figura 13:

- Autossimilaridade, essa pode ser determinista ou estatística.
- Irregularidade, ou fragmentação em sua geometria.
- Sua dimensão não é inteira.

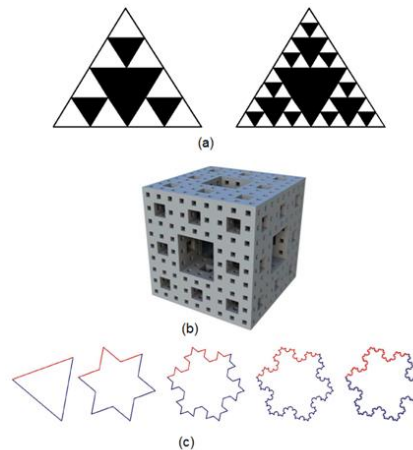


Figura 13: objetos fractais; (a) triângulo de Sierpinski, (b) Esponja de Menger e (c) curva de Koch.

A definição de *dimensão topológica* é construída por Poincaré e Brouwer no início do século XX. Por definição, uma das propriedades da dimensão topológica elimina ao menos uma das variáveis do problema, de forma que possibilite melhor a dinâmica global do sistema. Nussenzveig (2003) descreve que outra definição de dimensionalidade é dada por Kolmogorov, ele aponta que é a quantidade que mede o quanto um objeto ou um conjunto preenche um lugar no espaço que está imerso. A ideia de Kolmogorov é a que mais se aproxima da definição da dimensionalidade do atrator. Por sua vez, Eckmann & Ruelle (1985) apontam que a dimensão de um conjunto é a quantidade de informação necessária para definir em um espaço pontos com exatidão.

O conceito de dimensão como número de coordenadas necessárias para definir estados é um conceito geométrico com relação com escalas de volumes, ou hiper volumes, em função de parâmetros de complementos conforme a equação a seguir.

$$V \propto L^d$$

onde “ V ” é o volume, “ L ” é o comprimento e “ d ” é a dimensionalidade.

Isolando d :

$$d = \log(V)/\log(L) \quad 2.16$$

Essas aplicações “ V ” e “ L ” são um subconjunto de $\mathbb{R}^m$, dessa forma as métricas naturais a serem usadas são definidas pela norma, a equação 2.16 transforma-se em:

$$d = \log(N_\varepsilon)/\log(1/\varepsilon) \quad 2.17$$

onde “ N_ε ” é a quantidade de segmentos e “ ε ” tamanho relativo de um segmento.

Campanharo et al. (2007) enuncia que um atrator imerso espaço de fase de dimensão progressivamente mais elevado exibe cada vez mais sua estrutura complexa com seus desdobramentos e suas medidas de dimensão aumentada. Essa característica aumenta continuamente até que o atrator seja revelado por completo. Essa condição é alcançada quando a dimensão de imersão é suficientemente alta. A medida da densidade da dimensão do atrator imerso no espaço de fases denomina-se de “dimensão de correlação” o seu método é descrito por Grassberger e Procaccia (1983). Esse método fornece uma estimativa do número mínimo de equações diferenciais necessárias para descrever a dinâmica do sistema. A dimensão de correlação D_c é dada por:

$$d_c = \log[C(R)]/\log[R] \quad 2.18$$

“ $C(r)$ ” é uma função de correlação integral e é dada por:

$$C(r) = (1/N^2) \sum_{\substack{i,j=1; \\ i \neq j}}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \quad 2.19$$

onde “ N ” é o número de pontos analisados no atrator, a função “ θ ” é uma função degrau de Heaviside, sob as seguintes condições:

$$1 \text{ se } x \geq 0$$

$$\theta(x) \quad 2.20$$

$$0 \text{ se } x < 0$$

“ $C(r)$ ” é obtido primeiramente adotando um ponto de referência para “ X_i ” no espaço de fase, a partir desse ponto e com o auxílio da função 2.20, é contado número de pontos dentro do raio “ r ” da hiper esfera, obtém-se então a medida de quanto a

presença deste ponto de referência influencia na posição dos demais dados, essa é de fato a função correlação. Por fim, o mesmo procedimento é repetido para todos os dados, onde a cada seção um dado é tomado como referência.

O valor da dimensão de correlação é obtido através da inclinação da curva $\log[C(r)]$ vs $\log[r]$, exemplificada na figura 14.

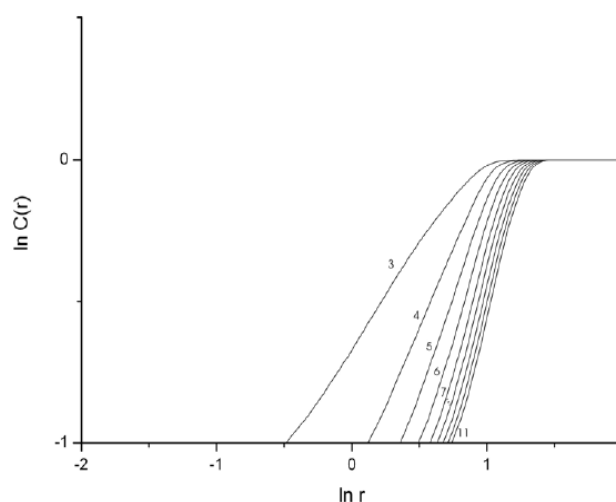


Figura 14: gráfico da dimensão de correlação pelo método de (GRASSBERGER e PROCACCIA, 1983).

Fonte: Grassberger e Procaccia, (1983).

O gráfico apresenta o formato de joelho onde a dimensão de correlação é revelada no eixo $\log[C(r)]$, no ponto onde o gráfico satura. O eixo $\log[r]$ ainda aponta a quantidade de variáveis que compõem o espaço de fase para reconstruir o atrator. Quanto maior a presença variáveis estocásticas o sistema apresenta menor será a tendência de joelho e mais difícil será caracterizar o atrator, conforme aponta De Paulo (2015).

2.2.3. Sistemas Naturais / Dinâmica Micrometeorológica

Lorenz quando descreve o seu atrator (figura 12), ele estava questionando os métodos de previsão do tempo da época, esses baseados em regressão linear. No entanto tais fenômenos são fundamentalmente não-lineares, de forma que tais métodos não apresentam resultados consistentes. A conclusão que Lorenz obteve foi que a previsão

do tempo em um tempo suficientemente longo é impossível. Sistemas como o de Lorenz apresentam características de sistemas caóticos determinísticos.

Ruelle e Takens (1971) são responsáveis pela classificação do nome estranho os atratores descritos por sistemas caóticos. O nome foi adotado quando estudam o fenômeno da turbulência, segundo eles, a turbulência deveria descrever em um espaço de fase alguma configuração que eles nomeiam de “atrator estranho”. Diversos outros estudos em diversas áreas confirmaram a existências de atratores estranhos associados a situações específicas, obtidos a partir de séries temporais em diferentes áreas.

Atratores estranhos também foram identificados em fenômenos que se propunha a descrever a dinâmica de sistemas ambientais (naturais). Exemplos disto são trabalhos como de Fraedrich e Leslie (1989) que encontrou atratores estranhos em trajetórias de ciclones tropicais, o trabalho de Gober et al. (1992) que identificou em séries temporais relacionadas ao El Niño ou ainda o estudo da previsibilidade da variação decadal do pacífico estudada por Ramesh et al. (2018). Outros trabalhos deste século são, por exemplo, os de trabalhos que buscam identificar a dinâmica da floresta Amazônica Legal, como os de Mello (2010) ou De Paulo (2015) que estuda a floresta de transição da Amazônia.

Portanto, sistemas ambientais são sistemas complexos: permitem fluxo de matéria e energia, são sistemas fora do equilíbrio - embora admitam estabilidade -, não-lineares e em um espaço de fase apresentam dinâmica fractal, ou seja, descrevem autossimilaridade, irregularidade em sua geometria e dimensionalidade não inteira. Outra característica desses sistemas é o acoplamento estrutural. Maturana et al. (1997) chamam de acoplamento estrutural a compatibilidade entre as variáveis que compõem o sistema perturbando-se mutuamente, ocasionando mudanças de forma não destrutiva buscando manter a estabilidade do sistema.

A característica de acoplamento estrutural das variáveis atmosféricas é apresentada por De Paulo (2015). Em seu estudo é observado que a maior presença de umidade, graças ao período de chuva, provoca alteração na estrutura do atrator observado no período seco. Além disso, o atrator observado no período chuvoso apresenta em sua estrutura níveis maiores de complexidade. Portanto devido o acoplamento estrutural um sistema complexo e dinâmico - como as interações

micrometeorológicas - uma variável influencia na dinâmica das demais, porém o sistema tende a voltar para o seu estado de maior estabilidade.

2.3. SÉRIES TEMPORAIS

Conforme mencionado na sessão anterior a obtenção de atratores é dado utilizando séries temporais, ou seja, para cada variável que compõem o espaço de fase - cada eixo de espaço - descreve a série de uma variável e essa demonstra como a série se comporta ao longo do tempo.

Gomes (2004) enuncia que a qualquer conjunto de observações realizadas sequencialmente ao longo do tempo é atribuído o nome de séries temporais. As séries temporais podem ser contínuas ou discretas, enquanto contínuas, as observações são realizadas continuamente ao longo do tempo; já as séries temporais discretizadas, descrevem observações realizadas em tempos específicos, nesses casos geralmente o intervalo entre uma observação e outra é igual.

Se para um sistema estudado, são observadas n variáveis, a série temporal é multivariada, dada por:

$$\{X_1(t), X_2(t), \dots, X_k(t); t \in T\} \quad 2.21$$

em um espaço de fase, as coordenadas generalizadas " X_k " descreve as variáveis, cada uma em um eixo do plano cartesiano.

Segundo Ehlers (2005), nesses casos várias séries relacionadas são analisadas de maneira conjunta, ou seja, cada tempo " t " descreve um vetor de estado observado. Cada " t " revela o estado que cada variável assume e consequentemente o estado do sistema. Nicolis & Prigogine (1998) observa que por conta do acoplamento estrutural, ainda que analisado apenas uma variável - apenas uma série temporal - estamos na realidade considerando e obtendo informações de várias outras variáveis independentes.

O estudo de séries temporais é um método importante pois apresenta os seguintes principais objetivos:

- É possível identificar padrões de tendências de um sistema, se este apresenta sazonalidade, se há observações discrepantes e ainda se este apresenta mudança estrutural em seu padrão de comportamento sazonal.

- Devido ao acoplamento estrutural é possível utilizar uma série para explicar variação em outra.
- Há possibilidade de prever valores futuros ou supor passado com a série original. Entretanto assume-se que o futuro é incerto e as previsões são incertas por conta da forte interação entre as variáveis.
- O controle dos processos, pois os valores das séries temporais medem a “qualidade” de um processo.

2.4. O RACIONALISMOS E A COMPLEXIDADE

Uma característica importante da teoria da complexidade é a oposição filosófica ao pensamento cartesiano. Descartes (1637) estabelece a base da ciência moderna considerando três principais aspectos:

1. Racionalismo: os fenômenos naturais são compreendidos apenas racionalmente;
2. Determinismo: os fenômenos naturais são compreendidos em termos de causa e efeito.
3. Compartimentalização: os fenômenos universais podem ser individualizados, pois conhecendo individualmente cada parte do Universo será possível compreender o mesmo como o todo. O universo funcionaria como um relógio que entendendo as partes entende o relógio todo.

Um exemplo de que as bases cartesianas não são suficientes para descrever os fenômenos da natureza, surge na década de 1860 quando Maxwell une duas leis aparentemente distintas e independentes - a eletricidade e o magnetismo - e revela o comportamento da luz - radiação eletromagnética. O campo elétrico e magnético estão continuamente e simultaneamente em atividade de forma que é inadequado tratá-los como partes individuais.

Outra característica da luz - radiação eletromagnética - apontada por segundo Da Silva (2007) é que ela apresenta duplo caráter, podendo ser descrita enquanto onda e enquanto partícula, ou seja, ela tem comportamento dual. Esta característica dual fere o caráter determinista da base filosófica de Descartes.

2.4.1. Leis de Radiação

Enquanto onda, a radiação eletromagnética é composta pela oscilação conjunta, ortogonais entre si dos campos elétricos e magnéticos, além de transversal a propagação da radiação eletromagnética, conforme a figura 15.

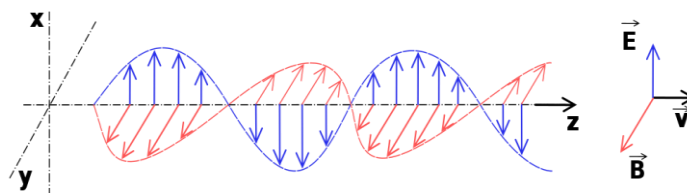


Figura 15: propagação do campo elétrico (E), magnético (B) e orientação do campo eletromagnético gerado (V).

Fonte: Wikimedia, 2007.

A radiação eletromagnética por ter características ondulatória é portadora de comprimento “ λ ” de onda e frequência “ ν ”; elas estabelecem a seguinte relação com a velocidade de propagação da radiação eletromagnética no vácuo “ c ”:

$$\lambda \nu = c \quad 2.23$$

Einstein em seu estudo do efeito fotoelétrico (1905), efeito esse onde a luz é estudada segundo sua natureza corpuscular, conclui que possível relacionar a energia do fóton - partícula de luz - com a sua frequência pela seguinte relação:

$$E = h\nu \quad 2.24$$

onde “ h ” é a constante de Planck, igual $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$. A equação 2.24 descreve que quanto maior a frequência do fóton, maior será a sua energia.

A energia eletromagnética pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência; sendo essa disposição denominada de espectro eletromagnético. Esse apresenta subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico que dá origem a energia eletromagnética. O espectro eletromagnético se estende desde comprimentos de onda muito curtos, associados aos raios

cósmicos, até ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de onda, [...]

(DE MORAES, 2002, cap.1)

As principais subdivisões (bandas) do espectro eletromagnético são: ondas de raios gama, ondas de raio-X, ondas ultravioletas, radiação visível - aos olhos humanos -, ondas de infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio. Essa sequência está da maior frequência para a menor conforme a figura 16.

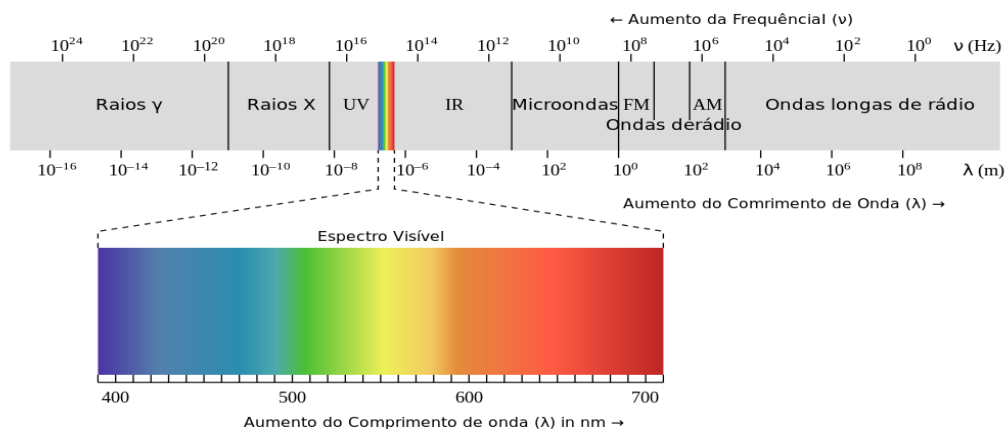


Figura 16: espectro eletromagnético.

Fonte: Wikimedia, 2010.

Eisberg e Resnick (1985) chamam atenção para a lei de radiação de Stefan-Boltzmann e a lei do deslocamento de Wien. A lei de Stefan-Boltzmann descreve que todo corpo com temperatura média acima de zero absoluto emite radiação eletromagnética. Stefan-Boltzmann estabelecem relação proporcional entre a irradiância espectral emitida por um corpo a temperatura média desse corpo elevado a quarta potência; analiticamente:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.25$$

onde “ E ” é a irradiância espectral, “ ε ” é a emissividade da superfície, “ σ ” constante de Stefan-Boltzmann e “ T ” a temperatura em Kelvin.

Por sua vez, Wien descreve a proporcionalidade inversa entre o comprimento de onda máximo emitido e a temperatura do corpo, o produto entre essas grandezas descreve a constante de Wien, conforme a equação 2.26.

$$\lambda_{\text{máx}} T = \text{cte.} \quad 2.26$$

As leis de radiação enunciadas analiticamente nas equações 2.24, 2.25 e 2.26 oferecem discussões relevantes para diversos campos da física. Sua interpretação favorece a compreensão do transporte de calor via radiação. Isso pois, conforme Stefan-Boltzmann todo corpo emite radiação para o meio que o cerca e esse também é atingido pela radiação que o meio e outros corpos emitem. O fluxo, portanto, é estabelecido do corpo mais aquecido para o menos, de modo que esse esfriará, isso pois sua taxa de emissão de energia radiante foi maior que a de absorção.

A matéria condensada, portanto, é capaz de emitir radiação, isso significa que todos os corpos emitem luz, conforme a equação 2.25, no entanto não vemos isso em corpos com temperatura ambiente. Isso pois de acordo com a lei de Wien - equação 2.26 - a matéria com baixas temperaturas emite o seu comprimento de onda máximo na faixa do infravermelho, não visível ao olho humano. Dessa forma os corpos são visíveis pela luz que eles refletem. Portanto, corpos com temperatura elevada emitem luminosidade própria, no entanto o que vemos é o máximo que esse corpo emite dentro do espectro visível.

A forma que um corpo vai emitir radiação depende de sua composição, porém há um tipo de corpo que descreve um espectro térmico de característica universal. Esses corpos absorvem em sua superfície a radiação que incide sobre ele e por conservação eles emitem toda radiação que foi incidida, a esses corpos é dado o nome de Corpo Negro. Esses corpos têm capacidade de emitir todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Esses descrevem a seguinte a distribuição de comprimento de onda conforme a figura 17.

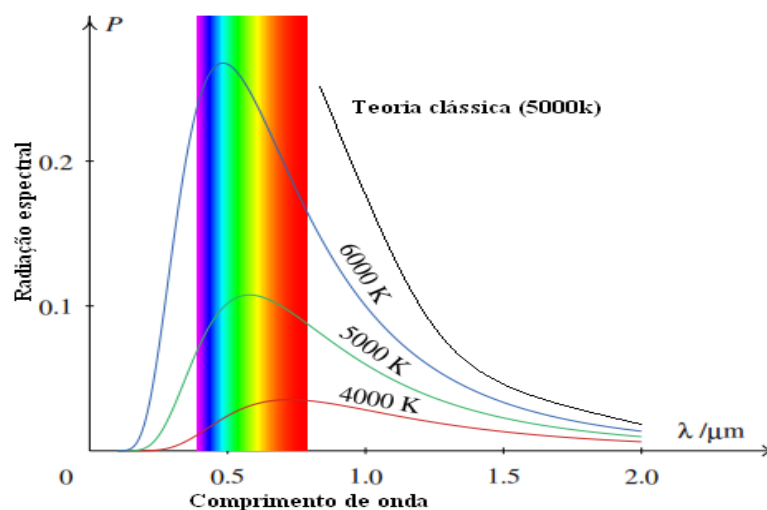


Figura 17: distribuição da radiação de corpos negros para diferentes temperaturas.

Fonte: Wikimedia, 2013.

Note que a emissão espectral depende apenas da temperatura do corpo e que o pico do comprimento de onda é deslocado para valores menores conforme a temperatura aumenta.

2.4.2. Saldo de Radiação

De forma geral, toda energia presente na Terra é em última instância proveniente do Sol. Borges et al. (2010) aponta que, a radiação solar é a principal fonte de energia para todos os fluxos energéticos realizados no sistema solo-planta-atmosfera

O Sol é um corpo negro cuja sua temperatura absoluta na superfície é de aproximadamente 6000K. Monteith (1973) enuncia que o espectro solar pode ser dividido em três principais regiões: o ultravioleta com comprimento de onda de $0,3\mu m$ a $0,4\mu m$, a radiação visível de $0,4\mu m$ a $0,7\mu m$ - respectivamente do azul ao vermelho, e o infravermelho de $0,7\mu m$ a $3,0\mu m$. A energia radiante que o Sol produz em seu núcleo através do processo de fusão do hidrogênio se propaga até a nossa atmosfera por aproximadamente $1,5 \cdot 10^{11} m$ em um intervalo de 480s - oito minutos. A densidade energética que atinge o topo da atmosfera é de aproximadamente $1370 W/m^2$.

A atmosfera é constituída por uma matriz básica, essa em ar seco é composta por aproximadamente nitrogênio 78% (N_2), oxigênio 21% (O_2), e outros gases de concentração mais baixas e variante como dióxido de carbono (CO_2), gás metano

(CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃), e vapor de água (H₂O). Essa com matriz básica desempenha papel fundamental na manutenção da vida na Terra. A importância física dá-se, pois, esses elementos influenciam diretamente na radiação que chega à superfície terrestre por absorverem em determinadas bandas parte da radiação.

Na figura 18, observamos as principais bandas de absorção da radiação solar pela matriz básica atmosférica.

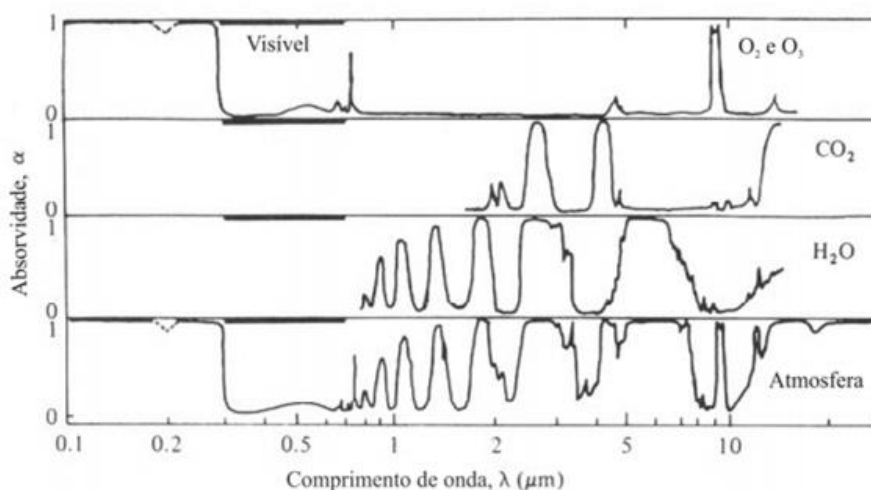


Figura 18: absorção dos principais componentes atmosféricos.

Fonte: Seinfeld, 1998.

Note que a radiação presente na região do ultravioleta é atenuada graças a absorção do ozônio e do oxigênio e pelo processo de espalhamento na atmosfera. A redução da radiação ultravioleta é importante pois essa é muito energética, portanto, ionizante capaz de causar implicações mutagênicas em células animais e vegetais. Na interação com o ozônio e o oxigênio, a radiação ultravioleta é deduzida de aproximadamente 7% no topo da atmosfera para 3% ao nível do mar.

A radiação que chega à Terra em maior quantidade é infravermelha, essa responsável pelo aquecimento. Por sua vez, grande parcela da radiação infravermelha (calor) é reduzida pela absorção dos gases diatômicos (dióxido de carbono, vapor de água e ozônio). A absorção da radiação infravermelha por esses elementos constituintes ocorre por conta da geometria dessas moléculas, pois estas interagem fortemente com a radiação acima dos 400 nm.

Outro efeito importante e responsável pela manutenção da vida é o efeito estufa, também originado pela interação dos constituintes atmosféricos e a radiação solar. Esse fenômeno ocorre, pois, a atmosfera funciona como uma estufa, parte da radiação emitida pelo Sol é refletida, parte é absorvida. O que é absorvido pela Terra, a aquece de modo que essa emita radiação, de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann descrita na equação 2.25. Terra emite radiação com comprimento de onda de aproximadamente $15\mu m$, para esse comprimento de onda o dióxido de carbono, por exemplo, se apresenta favorável a interação descrevendo modo vibracional. Essa interação faz com que a radiação emitida pela Terra ao ser enviada para o espaço interage com a atmosfera de forma que parte dela seja retida.

Embora seja um fenômeno importante para a manutenção da vida, o efeito estufa tem colaborado para o aquecimento global por conta da interferência antropogênica, como o desmatamento e a liberação de dióxido de carbono devido à queima de combustíveis fósseis Jones (1992).

Desconsiderando a ação antropológica, Seinfeld et al (1998) descreve que a atmosfera mantém aproximadamente imutável a taxa de seus constituintes, isso ocorre, pois, a atmosfera é um sistema dinâmico que realiza troca de gases com a vegetação, oceanos e organismos biológicos. Esses processos de trocas descrevem ciclos atmosféricos, esses envolvem processos físicos (como os citados acima) e bioquímicos.

Dos processos bioquímicos, observa-se três principais constituintes atmosféricos importantes para a manutenção da vida; um desses é o oxigênio por exemplo. O oxigênio é presente em níveis altos na atmosfera por conta dos seres vivos fotossintetizantes, e é indispensável na obtenção de energia através do processo respiratório. Observe ainda que na figura 19 há uma janela de absorção na região visível do espectro com pouca atenuação da radiação, essa faixa compreende a radiação fotossinteticamente ativa (PAR). A presença de vapor de água, atua de forma a regular a transpiração vegetal e o dióxido de carbono é matéria prima para o processo de fotossíntese.

Segundo Querino et al. (2017), todo tipo de radiação provida pelo Sol e que posteriormente atinge a superfície da Terra é denominada de radiação global “ R_g ”. Quirino et. Al. (2017) aponta que conhecer “ R_g ” e seus componentes é fundamental

para conhecer a energia total disponível no sistema solo-planta-atmosfera e então entender os processos atmosféricos, e consequentemente as condições de tempo e clima da Terra. Pois segundo Gusmão (2012), “ R_g ” é responsável pelos processos de origem química, física e biológica.

De acordo com Pavão et al. (2018) “ R_g ” sofre variação sazonal. Isso é por conta do movimento aparente do Sol (Norte-Sul) que caracteriza as estações do ano. Outra variação de “ R_g ” é na escala diária, de modo que diferentes locais num mesmo intervalo de tempo experimentem valores de “ R_g ” distintos.

No entanto, não é todo “ R_g ” que chega à Terra que está disponível para a realização dos processos. Parte da radiação que chega à Terra chega diretamente, uma fração é refletida pela superfície em que incide e parte é espalhada nas interações atmosféricas. Além disso, a superfície terrestre, devido ao seu aquecimento, também emite radiação. Desse balanço de entrada e saída de radiação é descrito o saldo de radiação - radiação líquida - , ou seja, a radiação que permanece disponível na Terra para a realização dos processos emergentes da interação Terra-Atmosfera.

O saldo de radiação é obtido pelo balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL). As ondas curtas - faixa de $0,3\mu m$ a $0,4\mu m$ do espectro eletromagnético - são provenientes do Sol, devido a sua alta temperatura. Como já mencionado, parte dessa radiação chega na superfície terrestre de forma direta “ R_g ” e parte é refletida “ R_{g_ref} ”. Querino (2013) descreve que o coeficiente de reflexão da radiação de onda curta - a razão entre R_g e R_{g_ref} para uma determinada superfície - é o albedo “ α ”. O albedo define a capacidade de uma superfície de refletir a radiação eletromagnética. Inamdar et al. (2015) sugere que a variação do albedo implica na alteração do microclima local, pois este causa alteração na quantidade de energia que é armazenada na interface biosfera-atmosfera.

O BOL, por sua vez, é a relação estabelecida entre a radiação que chega à superfície terrestre por conta do aquecimento da atmosfera “ R_{atm} ” e a do solo “ R_{sup} ”. R_{sup} , conforme a interpretação da lei de Stefan-Boltzmann, depende unicamente da temperatura absoluta da superfície, o mesmo não ocorre com R_{atm} , pois depende da pressão de vapor d’água e da cobertura das nuvens no instante em questão.

De forma geral as estimativas empíricas para a obtenção do saldo de radiação “ R_{liq} ” partem da equação seguinte:

$$R_{liq} = [R_g(1 - \alpha)] + [R_{atm} - R_{sup}] \quad 2.29$$

As condições atmosféricas influenciam diretamente na disponibilidade de R_{liq} , de forma geral assume-se que durante o dia R_{liq} é positivo, ou seja, há a prevalência da entrada da radiação, por sua vez com o resfriamento noturno, R_{liq} torna-se negativa. No entanto, dias nublados tendem a ter menor entrada de R_g , portanto a presença de umidade é um agente importante no saldo de radiação.

2.4.3. Balanço de Energia

A energia disponível na interface Terra-atmosfera descrita por R_{liq} é principalmente distribuída em cinco processos: transpiração vegetal, evaporação, aquecimento do ar e solo e fotossíntese. Os processos de transpiração vegetal (processo biológico) e evaporação da água disponível no solo, sobre a vegetação (processo físico) são indistinguíveis, de forma que são tratados unicamente como a evapotranspiração. Parte de R_{liq} é utilizada para aquecer o solo e o ar. E ainda em média 3% de utilizada na fotossíntese.

Dessa forma R_{liq} , descreve também a energia disponível e distribuída para a realização dos processos acima descritos. Assim podemos reescrever R_{liq} da seguinte maneira:

$$R_{liq} = ET + H + G \quad 2.30$$

onde, “ET” é a evapotranspiração, “H” calor sensível para aquecimento do ar e “G” calor sensível para aquecimento do solo.

Machado et al. (2016) aponta que o balanço de energia sofre variação sazonal com aumento de “ET” nas estações chuvosas e consequentemente diminuição de “H” e “G”. A menor quantidade de energia disponível para aquecer o ar “H” e o solo “G”, implica em menores valores de temperatura de ar e solo. Portanto a disponibilidade hídrica no solo e na atmosfera, a umidade, atua de forma a regular a distribuição de R_{liq} . Isso ocorre, pois, a água precisa de muita energia para ser aquecida e/ou evaporada. Desta forma é possível notar o acoplamento estrutural entre o saldo de radiação, os processos em si e a presença de água seja na atmosfera - em seus três estados - ou na superfície na forma líquida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na Reserva Biológica do Jaru. Instituída como área de preservação pelo decreto nº 83.716 de julho de 1979, a Reserva Biológica do Jaru - Rebio Jaru - é localizada em 10° 46' S e 61° 56' O. Disposta na região nordeste do estado de Rondônia, na divisa com o estado de Mato Grosso. Entre os municípios de Ji-Paraná, Machadinho d'Oeste e Vale do Anari. Teve sua ampliação decretada em 02 de maio de 2006, compreendendo atualmente uma área de 3.532 km² da floresta primária que segundo Rudke et al. (2013), em grande parte constituída pela floresta primária. A seguir (figura 19) a localização espacial da área de estudo.

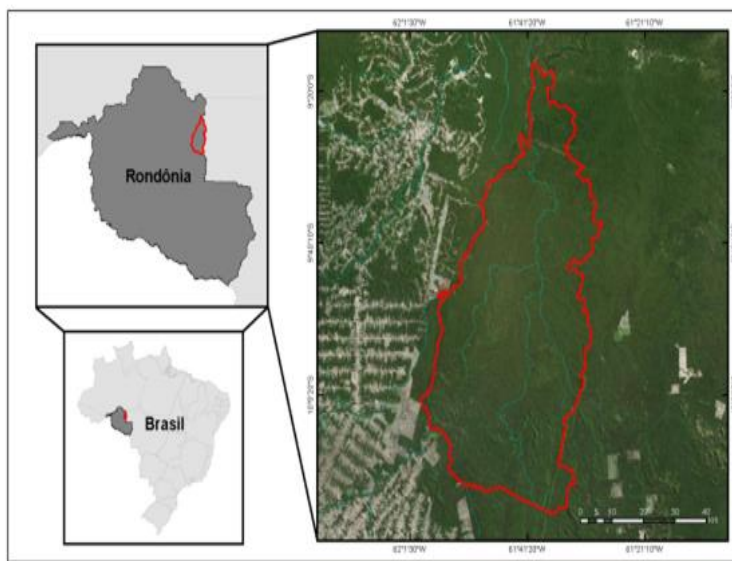


Figura 19: Localização geográfica da Reserva Biológica do Jaru.

Fonte: De Souza e Aguiar (2018).

A unidade de conservação abriga aproximadamente 0,09% do bioma da Floresta Amazônica. A região possui vastidão em rios e igarapés, além de todas as microbacias do rio Tarumã, confluem para o rio Ji-Paraná.

Segundo De Souza e Aguiar (2018) a região é fundamental na composição do Corredor que de Conservação da Amazônia Meridional, que se estende do estado de Tocantins até o estado de Rondônia. A Sul a região também faz divisa com o território Terra Indígena Igarapés de Lourdes.

A distribuição de precipitação pluvial em Rondônia ao longo do ano é por Franca (2015), com dados de 1981 a 2011, conforme a figura 20. Com o seu estudo podemos identificar períodos de seca e chuva no estado de Rondônia.

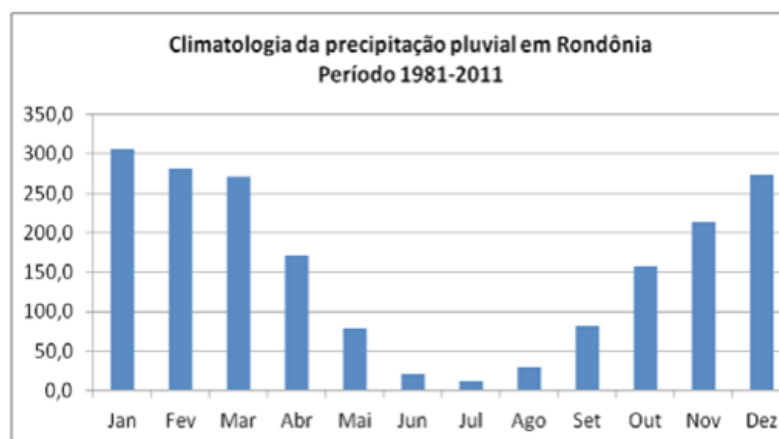


Figura 20: Climatologia da precipitação pluvial no estado de Rondônia, período de estudo de 1981 a 2011.

Fonte: Franca (2015).

3.2. METODOLOGIA E COLETA DE DADOS

A obtenção de dados da temperatura do ar e umidade relativa do ar, foram realizadas a 62 m por psicrômetro (HMP 35, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland). Após coleta de dados, o armazenamento foi realizado por meio de sistema de aquisição de dados: um Datalogger (CR 10 X, Campbell Scientific, Int., UT, USA). O sistema do datalogger foi programado para realizar leitura das variáveis a cada 30 segundos e realizar o armazenamento de médias dos dados a cada 30 minutos.

3.3. TEOREMA DE TAKENS

A chave para o entendimento de sistemas abertos (complexos) é a reconstrução de atores em uma topologia de espaço de fase. Ramesh et. al. (2018) propõe que seu entendimento possibilita compreender a previsibilidade, estabilidade e relação entre os estados do sistema. Há diversos métodos de reconstruir um atrator, entretanto há implicações desses métodos que apontam vantagens e desvantagens. Conforme discutido na sessão Dimensionalidade Fractal, o coeficiente de correlação $C[r]$ (figura 14) apresenta a quantidade necessária de variáveis a reconstrução de um atrator e

consequentemente a interpretação da dinamicidade do sistema que ele descreve, no entanto, a relação não indica quais são essas variáveis.

Usualmente, para facilitar a visualização gráfica do atrator, esse é reconstruído em um espaço de fase tridimensional - ainda que o gráfico de $\log[C(r)]$ vs $\log[r]$ não sature em três ou aproximadamente três -, ou seja, é necessário no mínimo três séries temporais para reconstruir um atrator. A escolha de três variáveis com interações fortes e múltiplas no sistema de modo que essas possam representar a dinâmica do sistema como um todo apresenta-se como um problema.

Takens (1981) considera o acoplamento estrutural e reduz o número de séries necessárias para reconstruir o atrator. Dessa forma a trajetória completa de sistema dinâmico em um espaço de fase pode ser reconstruída a partir da medida de uma única variável. Pinto (2009) conclui que, em um sistema onde as equações dinâmicas que descrevem a evolução das variáveis não são conhecidas, o atrator associado a este sistema pode ser obtido conhecendo apenas uma série temporal de valores associados a uma variável.

Campanharo (2007) aponta que, dada a escolha da variável com interação suficientemente forte com as demais variáveis do sistema, o atrator reconstruído é de topologia equivalente ao atrator que seria reproduzido caso conhecesse as equações diferenciais das demais variáveis, ou caso tivesse as séries temporais das demais variáveis. Por ter a vantagem de utilizar somente uma série temporal, Sugihara et al. (2012) e Deyle et al (2011) sugerem que o método descrito e aplicado por Takens (1981) é o que oferece mais simplicidade.

Takens (1981) baseia seu método na obtenção de vetores de estado relacionando a série de dados original e a mesma série com seus estados com atrasos temporais, ou seja, um único ponto carrega a informação da série original e da mesma série, porém atrasada. Em um espaço de fase n dimensional definido pelas coordenadas generalizadas $\{X_k(t)\}$ (sendo $k = 1, 2, 3, \dots, n$), a coordenada " $X_1(t)$ " o eixo que corresponde a série original. A aplicação da técnica dá-se por desmembrar a série temporal original " $X_1(t)$ " em deslocamentos temporais sucessivos de defasagem " τ " fixa, essa é definida por " $\tau = m \Delta t$ ", para m número inteiro e Δt o intervalo de tempo real. Por último, são utilizados apenas os N pontos equidistantes do conjunto de dados

obtido. Analiticamente o espaço de fase construído segundo a descrição da equação 2.21 “ $\{X_1(t), X_2(t), \dots, X_k(t); t \in T\}$ ”, assume a seguinte forma:

$$X_1 = X_1(t_1), \dots, X_1(t_N)$$

$$X_2 = X_1(t_1 + \tau), \dots, X_1(t_N + \tau)$$

2.22

$$\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots$$

$$X_n = X_1[t_1 + (n - 1)\tau], \dots, X_1[t_N + (n - 1)\tau]$$

Ramesh et al. (2018) aponta que o atrator obtido segundo o teorema de Takens (1981) é um conjunto de sombras, ou seja, o que vemos é sombra do atrator da variável escolhida. Portanto é importante a escolha de um τ onde a *sombra* obtida seja a que melhor descreve o atrator real.

Para isso, é utilizado um τ onde as séries defasadas tenham menor correlação com a série real. Isso pois o atrator reconstruído é bastante sensível ao tempo de atraso - defasagem - escolhido. Abravanel (1993) descreve que um tempo de defasagem muito curto os eixos “ $X_2, X_3, \dots, X_n$ ” são praticamente indistinguíveis, a trajetória tenderá a uma reta; o oposto origina atratores com trajetória dispersa. Ambos os casos resultam em atratores reconstruídos mal definidos.

Há diversas aplicações práticas para o Teoremas de Takens, Yap et al. (2014) aponta isso analisando sua estabilidade, outro apontamento é o de Gutman (2018) que analisa a topologia dinâmica e o teorema de Takens. É possível também realizar aplicações financeiras, conforme Fontes (2013) sugere. Prieto (2014) utiliza o teorema para estudar concentração de materiais particulados na atmosfera.

3.3.1. Atratores de Temperatura do ar

Capistrano (2007) em seu estudo se propõe investigar qual variável melhor descreve a dinâmica de um sistema ambiental através do teorema de Takens. Utilizando o gráfico de joelho, foi identificado que a temperatura do ar é a variável que em aspectos gerais a que ocupa menor volume em um espaço de fase, ou seja, apresenta menor dimensionalidade.

A dimensionalidade ao longo do ano não é constante, isso devido variações e interações das próprias variáveis, entretanto para períodos específicos de seca e chuva é possível caracterizar a dinâmica micrometeorológica. No período seco a dimensionalidade apresentava valores menores que dois, o que indica um nível de periodicidade, ainda que o objeto identificado seja estranho por se tratar de um atrator de dinâmica fractal.

No período chuvoso, o atrator reconstruído por dados de temperatura do ar, conforme apresenta Capistrano (2007) mantém dimensionalidade menor que as demais variáveis, no entanto o seu módulo aumenta para valores ligeiramente a cima de dois. Segundo De Paulo (2015), o aumento da dimensão indica aumento na complexidade do atrator que será obtido. No resultado de De Paulo (2015) é notável em seu atrator reconstruído o aumento da complexidade do período seco para o chuvoso, conforme a figura 21.

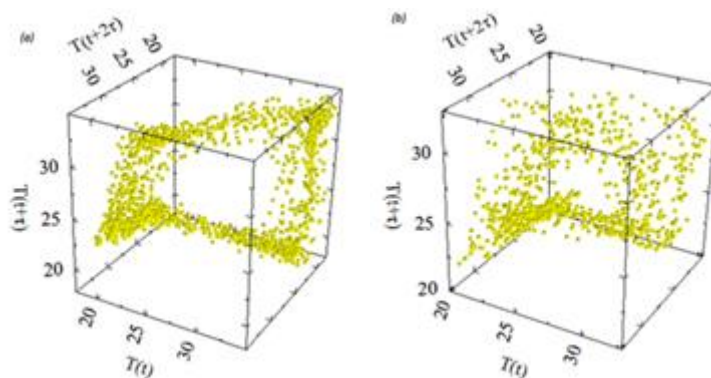


Figura 21: atratores reconstruídos segundo o teorema de Takens, com dados de temperatura do ar, (a) período seco e (b) período chuvoso.

Fonte: De Paulo et al, 2015.

Capistrano (2007) descreve que o número mínimo de variáveis necessárias para compreender a temperatura do ar, ou seja, seu grau de liberdade, é menor que o grau de liberdade das demais variáveis. Os resultados concordam com o estudo da dimensionalidade, de maneira que no período de seca a temperatura do ar apresenta entre seis e sete graus de liberdade, já no período chuvoso isso se eleva para valores superiores a nove. Portanto com graus de liberdade maiores o atrator reconstruído tenderá a apresentar nível de complexidade maior, conforme o obtido por De Paulo (2015). Entretanto por ter dimensionalidade e graus de liberdade menores que as

demais variáveis - para cada período - o atrator reconstruído da temperatura do ar é mais compreensível que os atratores possíveis de serem reconstruídos pelas demais variáveis, logo esse melhor descreve a dinâmica do sistema estudado.

Em essência, a temperatura do ar é a variável que apresenta menor complexidade na reconstrução do atrator e tem correlação com um número significativo de variáveis. Para a reconstrução do atrator, no entanto, é necessário estudar o tempo de menor correlação entre a série real e as séries defasadas, isso pois o tempo de defasagem depende do sistema estudado. Palú (2008) sugere que o valor de “ τ ” ideal para a reconstrução de atratores de temperatura do ar é de cinco horas.

A correlação entre as variáveis descreve o acoplamento estrutural entre elas. É notável uma tendência de alteração na estrutura dos atratores se comparado o construído no período seco e chuvoso. Isso indica que a variável estudada não é apenas moldada pelos seus graus de liberdade, mas essa pode carregar informação deles também. Prado (2017), por exemplo, investigou a possibilidade de o método revelar dados de radiação. Neste trabalho, além de aplicar a metodologia investigada por Prado (2017), estudou-se a interferência que ocorre no período seco e chuvoso através de dados de umidade relativa do ar. Com isso investigou-se o acoplamento estrutural entre as variáveis: temperatura do ar, radiação líquida e umidade relativa do ar.

Segundo De Paulo (2015), os meses onde o período chuvoso e seco é mais intenso, melhor caracteriza o atrator do período em questão, isso pois os demais meses representam a transição de um regime para outro. De acordo com Andrade et al (2009), os meses onde a estação seca e chuvosa se intensifica na Reserva Biológica de Jarú, são respectivamente, (junho, julho e agosto) e (dezembro, janeiro e fevereiro).

3.4. ROTAÇÃO DO ESPAÇO DE FASE

Na perspectiva do Teorema de Takens, é possível que a matriz do espaço de fase reconstruído carregue informações de outras variáveis correlacionadas. Conforme Prado (2017) é possível estimar o comportamento da radiação líquida - saldo de radiação - disponível a um sistema utilizando a técnica de Takens associada a rotação de matrizes.

Capistrano (2007) aponta que o atrator reconstruído segundo o Teorema de Takens, de modo geral, apresenta-se em escala diferente e rotacionado em relação à figura obtida caso o atrator fosse reconstruído com as variáveis compondo o espaço de fase, cada uma em um eixo cartesiano. Isso significa, conforme aponta Prado (2017), que rotacionando a matriz obtida segundo Takens e realizando uma transformação linear, é possível, ainda que não perfeitamente, obter o comportamento das variáveis que teoricamente compõem o espaço de fase.

Prado (2017) sugere que realizando a rotação e a transformação linear na matriz obtida segundo o Teorema de Takens, se o comportamento dos dados obtidos em um dos eixos corresponde a série temporal de radiação líquida, é possível obter o comportamento das demais variáveis a partir apenas das informações da variável utilizada - nesse caso a temperatura. Consequentemente, quanto mais os dados obtidos - pela rotação - e o seu comportamento gráfico forem parecidos com os dados reais coletados na torre, maior será a quantidade de informação de “ R_{liq} ” contida em “ T_{ar} ”.

O atrator reconstruído foi obtido em um espaço de fase tridimensional, ou seja, para reconstruí-lo utilizaremos uma matriz cujos eixos correspondem a $T_{ar}(t)$, $T_{ar}(t + \tau)$ e $T_{ar}(t + 2\tau)$. Após o processo de rotação e transformação linear, Prado (2017) aponta que, um desses eixo deverá corresponder a “ R_{liq} ”. Prado (2017) ainda em seus estudos enuncia que, o eixo que melhor descreve “ R_{liq} ” é o correspondente à segunda coluna.

Arfken (1985) descreve que para o espaço tridimensional a rotação de uma matriz é possível através de um aparato matemático correspondente a uma matriz de rotação - $R^{M \times N} = [R(\alpha, \beta, \gamma)]$ -, aplicada a todos os dados. Onde α , β e γ correspondem aos ângulos de rotação respectivamente em torno dos eixos “z”, “y” rotacionado e “x” rotacionado. Esses obedecem a seguinte expressão:

$$R(\alpha, \beta, \gamma): \quad 3.1$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\gamma) \cos(\beta) \cos(\alpha) - \sin(\gamma) \sin(\alpha) & \cos(\gamma) \cos(\beta) - \sin(\gamma) \cos(\alpha) & -\cos(\gamma) \sin(\beta) \\ -\sin(\gamma) \cos(\beta) \cos(\alpha) - \cos(\gamma) \sin(\alpha) & -\sin(\gamma) \cos(\beta) \sin(\alpha) + \cos(\gamma) \cos(\alpha) & \sin(\gamma) \sin(\beta) \\ \sin(\beta) \cos(\alpha) & \sin(\beta) \sin(\alpha) & \cos(\beta) \end{pmatrix}$$

Em um espaço de fase, as coordenadas de um ponto são dadas pelo vetor:

$$R(\alpha, \beta, \gamma): \quad 3.2$$

$$\begin{pmatrix} T(t) \\ T(t + \tau) \\ T(t + 2\tau) \end{pmatrix}$$

Aplicando a matriz de rotação, o mesmo ponto será agora descrito por:

$$R(\alpha, \beta, \gamma): \quad 3.3$$

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\gamma) \cos(\beta) \cos(\alpha) - \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\alpha) & \cos(\gamma) \cos(\beta) - \text{sen}(\gamma) \cos(\alpha) & -\cos(\gamma) \text{sen}(\beta) \\ -\text{sen}(\gamma) \cos(\beta) \cos(\alpha) - \cos(\gamma) \text{sen}(\alpha) & -\text{sen}(\gamma) \cos(\beta) \text{sen}(\alpha) + \cos(\gamma) \cos(\alpha) & \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\beta) \\ \text{sen}(\beta) \cos(\alpha) & \text{sen}(\beta) \text{sen}(\alpha) & \cos(\beta) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T(t) \\ T(t + \tau) \\ T(t + 2\tau) \end{pmatrix}$$

A figura 22 exemplifica a gerada a partir do Teorema de Takens e a matriz de rotação de acordo com a equação 3.1 para o ângulo de rotação de 250° para alfa.

Tar	T_ar +5	T_ar + 10
24.39	21.89	22.52
24.73	21.89	22.35
24.94	21.89	22.46
25.31	21.9	22.14
25.6	21.95	22.03
26.13	22.14	21.98
26.25	22.35	22.03
26.41	22.71	22.01
26.88	23.23	22.02
26.82	23.84	21.98
27.35	24.39	21.89
24.4	24.73	21.89
24.29	24.94	21.89
24.59	25.31	21.9
24.4	25.6	21.95
24.37	26.13	22.14
24.19	26.25	22.35
24.01	26.41	22.71
23.85	26.88	23.23

(a)

-0.42262		-0.90631		0
0.906308		-0.42262		0
0		0		1

(b)

Figura 22: (a) matriz de tempos defasados em τ e 2τ , com τ igual a cinco horas, (b) matriz de rotação para α igual a 250°.

Note que a rotação é realizada apenas em torno de α , conforme Prado (2017) investiga em seus estudos. Prado (2017) ainda aponta em seus estudos que o ângulo ideal para a rotação da matriz do espaço de fase reconstruído é de 250°. A partir da rotação

será gerada outra matriz, que conforme aponta Prado (2017), a segunda coluna desse apresenta comportamento semelhante ao comportamento da radiação líquida.

O perfil da série de dados obtidos após a rotação da matriz e a transformação linear, foi comparada com o perfil descrito pela série da radiação líquida dos anos estudados - 2008, 2009 e 2010. O procedimento de rotação foi realizado para os todos os meses, dos anos de 2008, 2009 e 2010, posteriormente foi analisada a informação mútua entre os dados de radiação líquida coletado na torre e os dados obtidos pela metodologia. São apresentados no trabalho apenas os resultados – reconstrução dos atratores de temperatura do ar, perfis de radiação líquida e informação mútua - dos meses de fevereiro e agosto, os meses onde o período de chuva e seca são mais intensos. Isso pois de acordo com o apontamento de De Paulo (2015) o período em que o regime de chuva ou seca é mais intenso, caracteriza melhor o todo período estudado por desconsiderar a transição entre os regimes de chuva e seca.

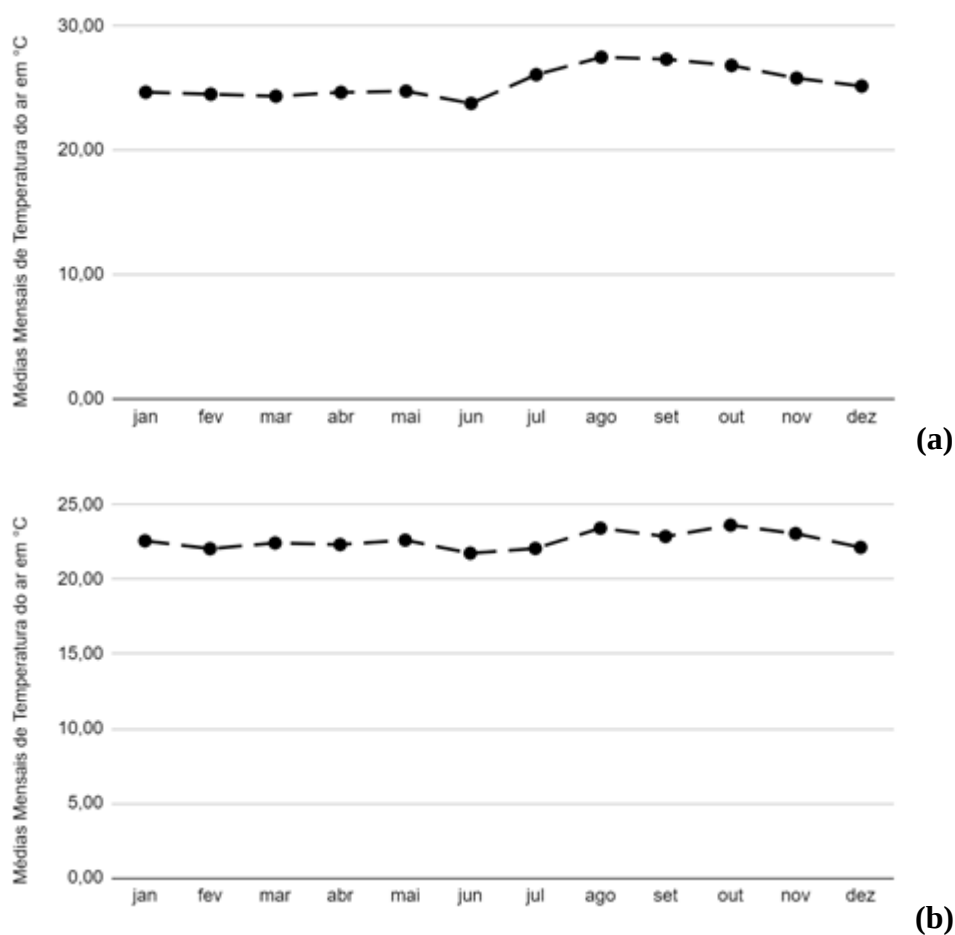
Foi escrito um programa em R para analisar a informação mútua, a análise foi realizada para diferentes intervalos de tempo. Isso indicou o quanto as séries estão fora de fase. Foi analisada a informação mútua entre as séries da radiação líquida e da temperatura do ar dos meses de fevereiro e agosto dos três anos estudados - 2008, 2009 e 2010 - e também entre as séries de radiação líquida real e a série obtida pela metodologia de Prado (2017) - rotação da matriz de espaço defasados.

Investigando a informação mútua entre as séries de radiação líquida - obtida pela torre e pelo método de Prado (2017) - ao longo dos anos estudados - 2008, 2009 e 2010 -, foi possível inferir a relação com a umidade relativa do ar. Para isso, foi analisado o resultado informação mútua em comparação com a umidade relativa do ar. Essa última análise buscou verificar se a presença de água interfere ou não na informação mútua entre as séries estudadas - radiação líquida coletada na torre e perfil obtido pela técnica de Prado (2015), ou seja, se interfere na relação entre a temperatura do ar e a radiação líquida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO COMPORTAMENTAL DAS VARIÁVEIS

Na busca pela compreensão do possível acoplamento estrutural entre as variáveis micrometeorológicas através da análise da rotação do Teorema de Takens, primeiramente utilizamos as séries temporais para caracterizar a evolução das variáveis nos três anos de dados. A figura 23 apresenta as médias mensais da temperatura do ar de 2008, 2009 e 2010.



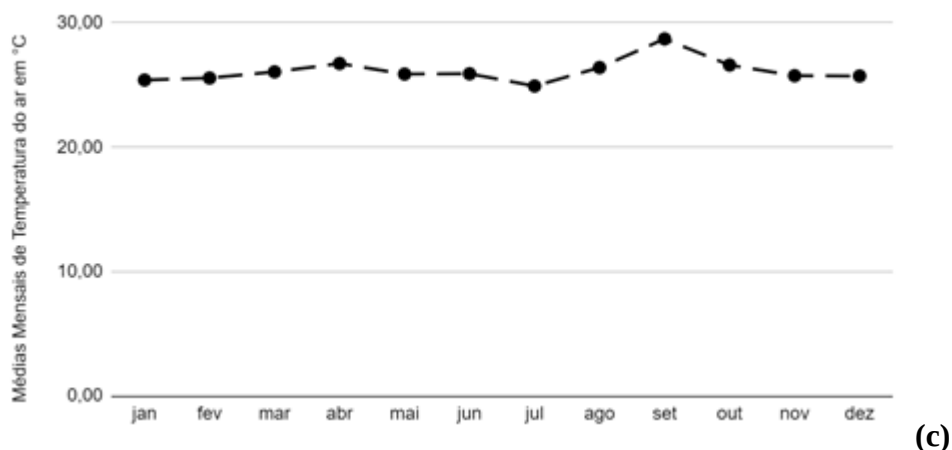
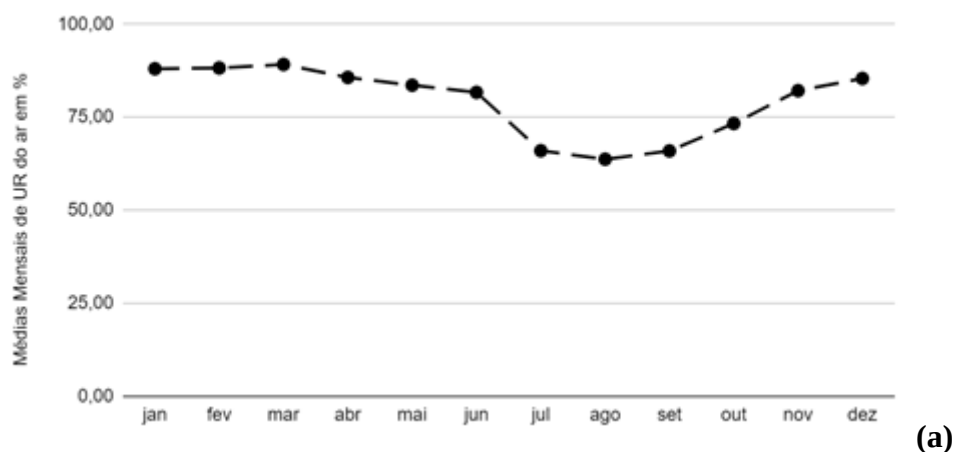


Figura 23: médias mensais da temperatura do ar dos anos de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Note que a variação anual é pequena nos três anos estudados, sendo maior nos anos de 2008 e 2010. A baixa variação anual ocorre pois o local de estudo é um local de floresta, por esse motivo a evapotranspiração no local além do regime de chuvas condiciona a presença de água em abundância na atmosfera o que atenua as altas na temperatura e variações bruscas. Mesmo com pouca variação ao longo do ano, é possível observar que os meses de maiores médias da temperatura do ar (junho, julho e agosto) coincidem com o período de menos intensidade no regime de chuva.

As altas nas médias da temperatura do ar coincidem com a menor quantidade de água disponível na atmosfera, isso é observado no gráfico ilustrado na figura 24, este aponta as médias mensais de umidade relativa do ar.



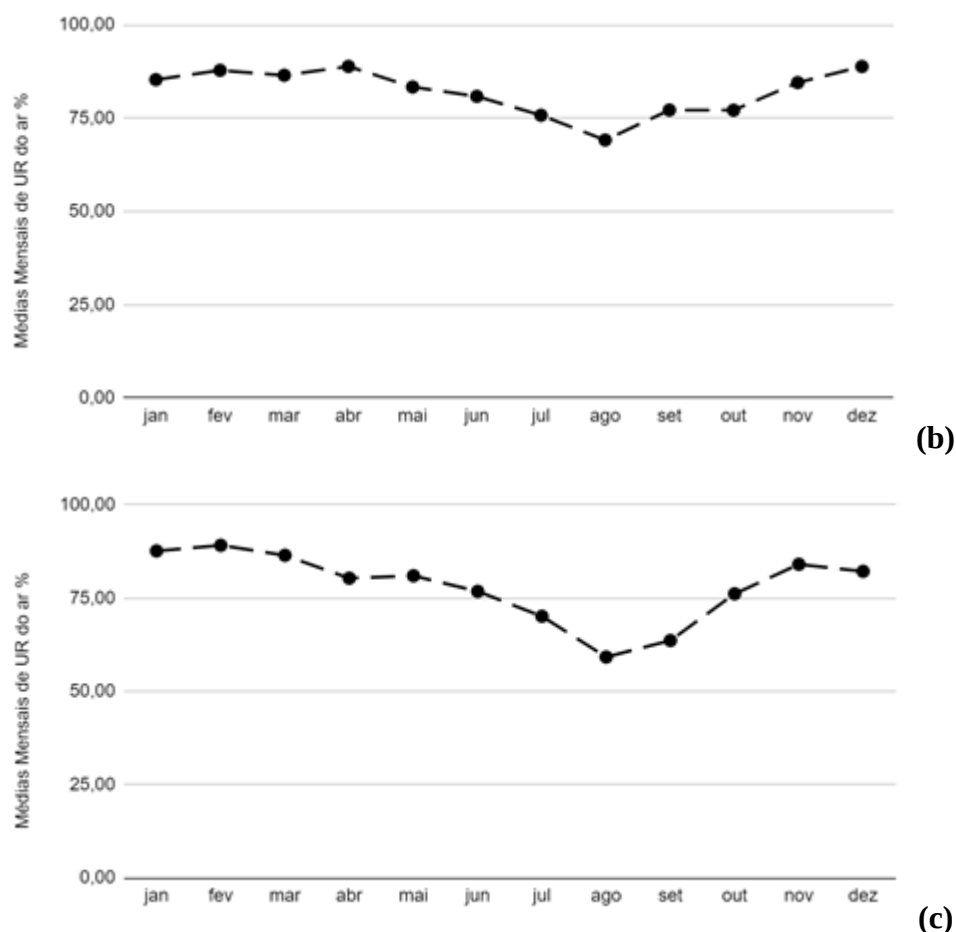


Figura 24: médias mensais de umidade relativa do ar de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

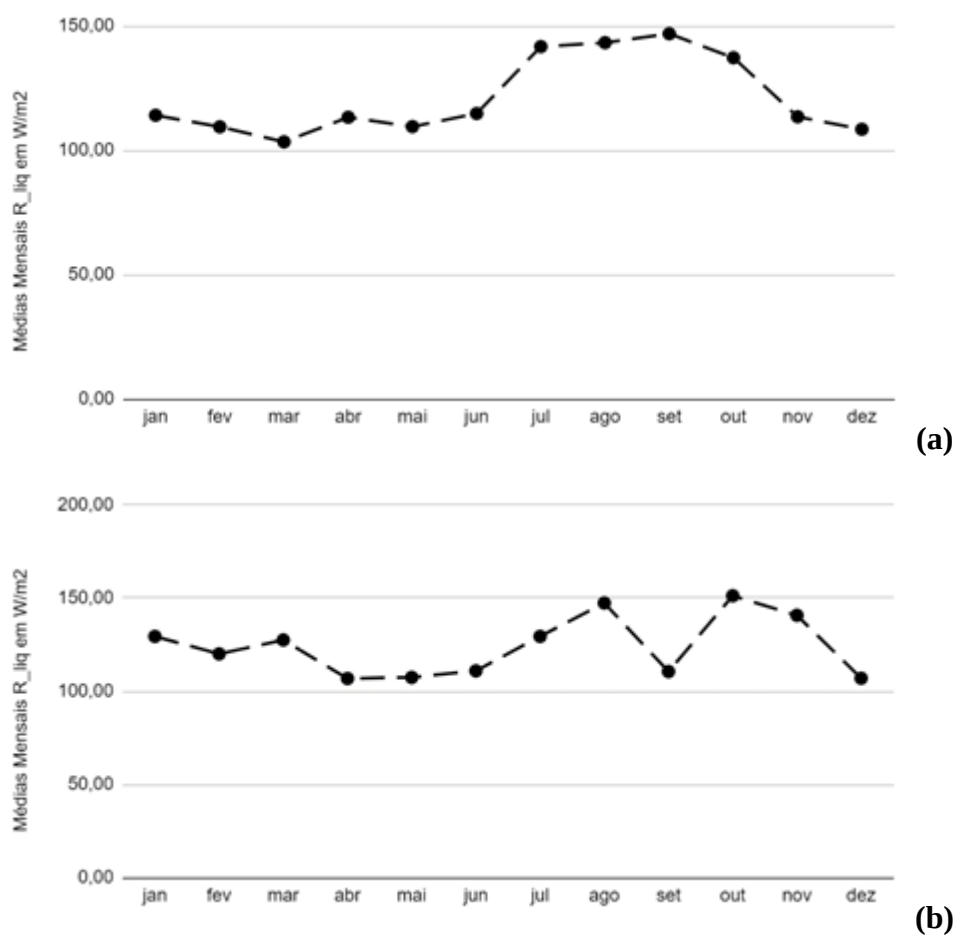
Em momento algum dos anos estudados é observado médias mensais de umidade relativa do ar muito baixo, de forma a intuir ausência de chuva, portanto o período de seca caracteriza diminuição nas chuvas, não em sua ausência. A mesma interpretação pode ser aplicada a evapotranspiração, uma vez que esta influência também nos dados de umidade relativa do ar, além de que quanto maior a presença de água, maior será a realização do processo de evapotranspiração.

Observe que a partir do mês de maio a umidade relativa do ar tende a decrescer, alcançando menor valor em agosto. O período mais úmido, por sua vez, tem intensidade entre os meses de novembro a março, com o maior registro em fevereiro. Na figura 24 é notável que, o ano de 2009 foi marcado por médias mensais de umidade relativa do ar maior que os outros anos, por outro lado, 2010 foi o ano com menores valores de umidade.

Analisando os gráficos ilustrados nas figuras 23 e 24, é possível intuir que no ano de 2009 o período de chuva se antecipou, tendo início em setembro. Isso é indicado na diminuição da média da temperatura do ar do mês de setembro, juntamente com a tendência de aumento que a umidade relativa do ar assume.

Em 2010, conforme a figura 24, é possível ainda notar que a tendência de diminuição na umidade relativa do ar inicia-se em março, atingindo um mínimo em abril. Esta análise, acompanhada dos dados de média de temperatura do ar do gráfico correspondente a 2010 (figura 23), abril é marcado por descrever um máximo na média mensal da temperatura do ar.

A interpretação da interação entre as variáveis temperatura do ar e umidade relativa do ar é melhor entendida ao observarmos também a evolução das médias mensais da radiação líquida - saldo de radiação -, isso é ilustrado na figura 25.



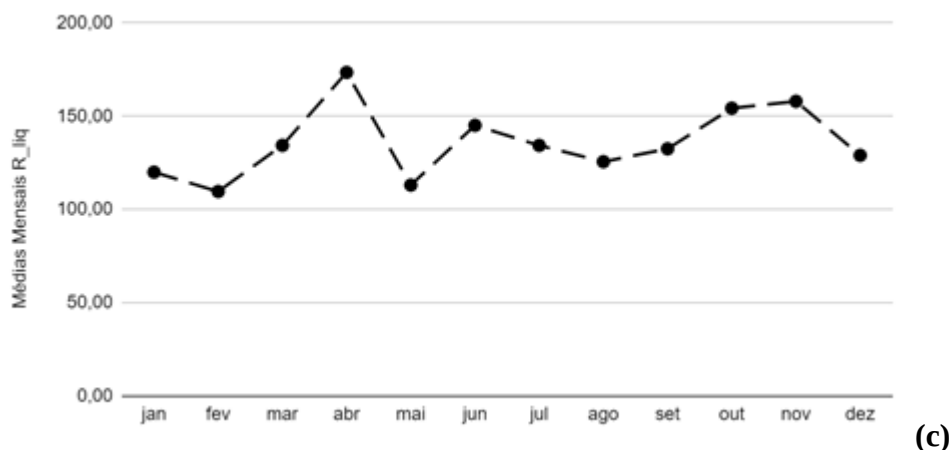


Figura 25: médias mensais da radiação líquida dos anos de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Conforme a seção Saldo de Radiação e Balanço de Energia, na distribuição da radiação líquida parte é dedicada para o aquecimento do ar. Entretanto, por conta do calor específico da água, quanto maior a umidade relativa do ar menor será a variação da temperatura do ar. Além disso, no período chuvoso, por conta da abundância de água, a maior parte de radiação líquida é dedicada à evapotranspiração, isso influencia também no aumento da umidade relativa do ar. De forma geral observando as figuras 23, 24 e 25, o período em que a intensidade da umidade relativa diminui coincide com o aumento da radiação líquida, de forma que a maior parte da radiação é dedicada para o aquecimento do ar.

Observe na figura 25 que, a partir do mês de maio a radiação líquida descreve tendência de crescimento, coincidindo com o período de decréscimo da umidade relativa do ar - menor disponibilidade de água na atmosfera -, condiciona aumento da temperatura do ar. Essa relação é intuída a partir da análise das ilustrações gráficas obtidas nas figuras 23, 24 e 25.

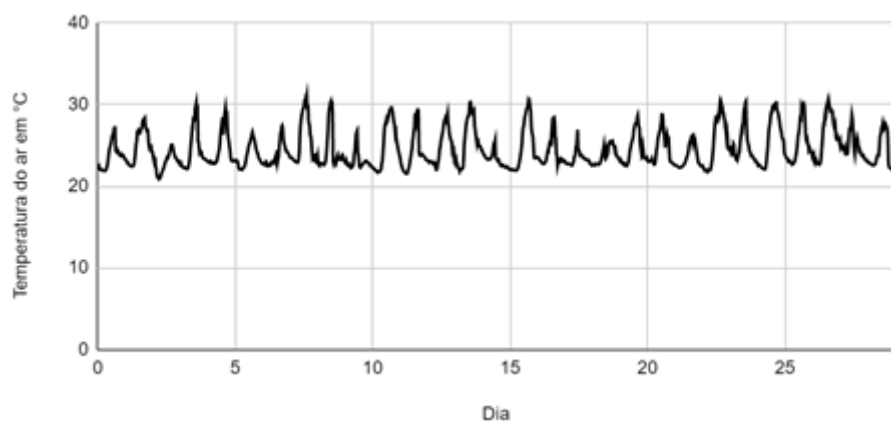
Em 2009, devido a antecipação do período de chuva - já discutida -, a presença de nuvens pode ter ocasionado a diminuição da radiação líquida registrada em setembro (figura 25 - b). Note que a radiação líquida diminuiu em setembro e a temperatura também.

Em abril de 2010 é observado o maior pico da radiação (figura 25 - c), isso provavelmente ainda é efeito da antecipação do período de chuva em setembro de 2009, de forma que em abril a diminuição nas nuvens possibilitou um maior registro

da radiação líquida. O mês de abril de 2010 (figuras 23, 24 e 25 - c) exemplifica bem que não trivial a relação entre as variáveis: umidade, temperatura do ar e radiação líquida. Note a média mensal da umidade relativa do ar em abril de 2010 (figura 24 - c), ainda é alta - ligeiramente acima dos 80% -, embora apresente tendência de decrescimento. Entretanto a disponibilidade alta de radiação líquida influencia na média mensal da temperatura do ar em abril descreva um pico, ainda que não seja o maior valor mensal do ano, aponta para um pico.

Há uma variabilidade na presença de água na atmosfera ao longo dos anos estudados; fevereiro se destaca como o mês mais úmido e agosto como o menos úmido, de modo que os demais meses representam transição entre o período mais e menos úmido. Dessa forma os meses que melhor caracterizam a dinâmica do período mais e menos úmido são respectivamente fevereiro e agosto, portanto esses foram utilizados para reconstruir os atratores de temperatura do ar.

Os resultados a seguir (figuras de 26 a 31) são referentes a séries temporais de temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação líquida; para os anos de 2008, 2009 e 2010 os meses de fevereiro e agosto.



(a)

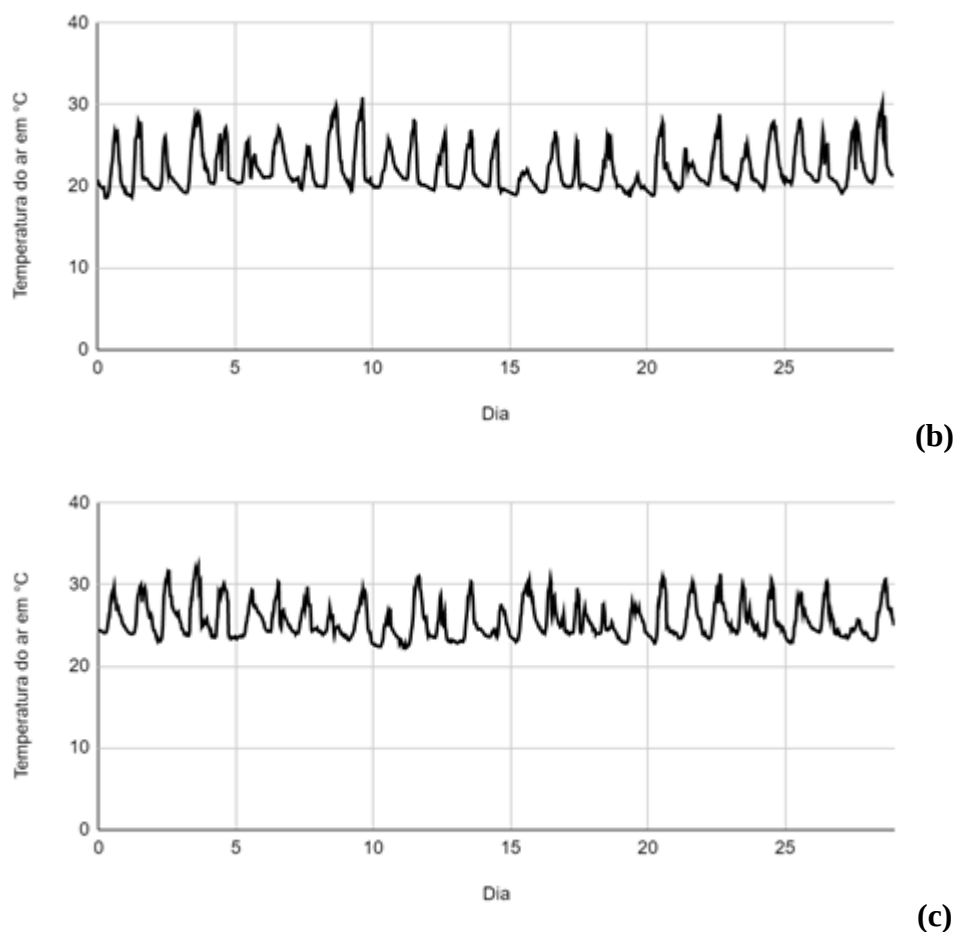


Figura 26: série de temperatura do ar, ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Nos três anos estudados, o mês de fevereiro é marcado por variação na amplitude térmica pequena. Observe que em 2008 e 2010 (figura 26 - a e c) os valores assumidos pela temperatura do ar está deslocados para valores maiores, sendo 2008 o ano a marcar maiores valores de temperatura do ar no período chuvoso. Por sua vez, 2009 (figura 26 - b) apresenta valores menores que os demais anos.

Na figura 27, a primeira observação pertinente é a diferença entre a amplitude térmica no mês de fevereiro e agosto. A variação térmica ao longo dos dias no período menos úmido é mais abrupta que no período mais úmido, isso ocorre em todos os anos.

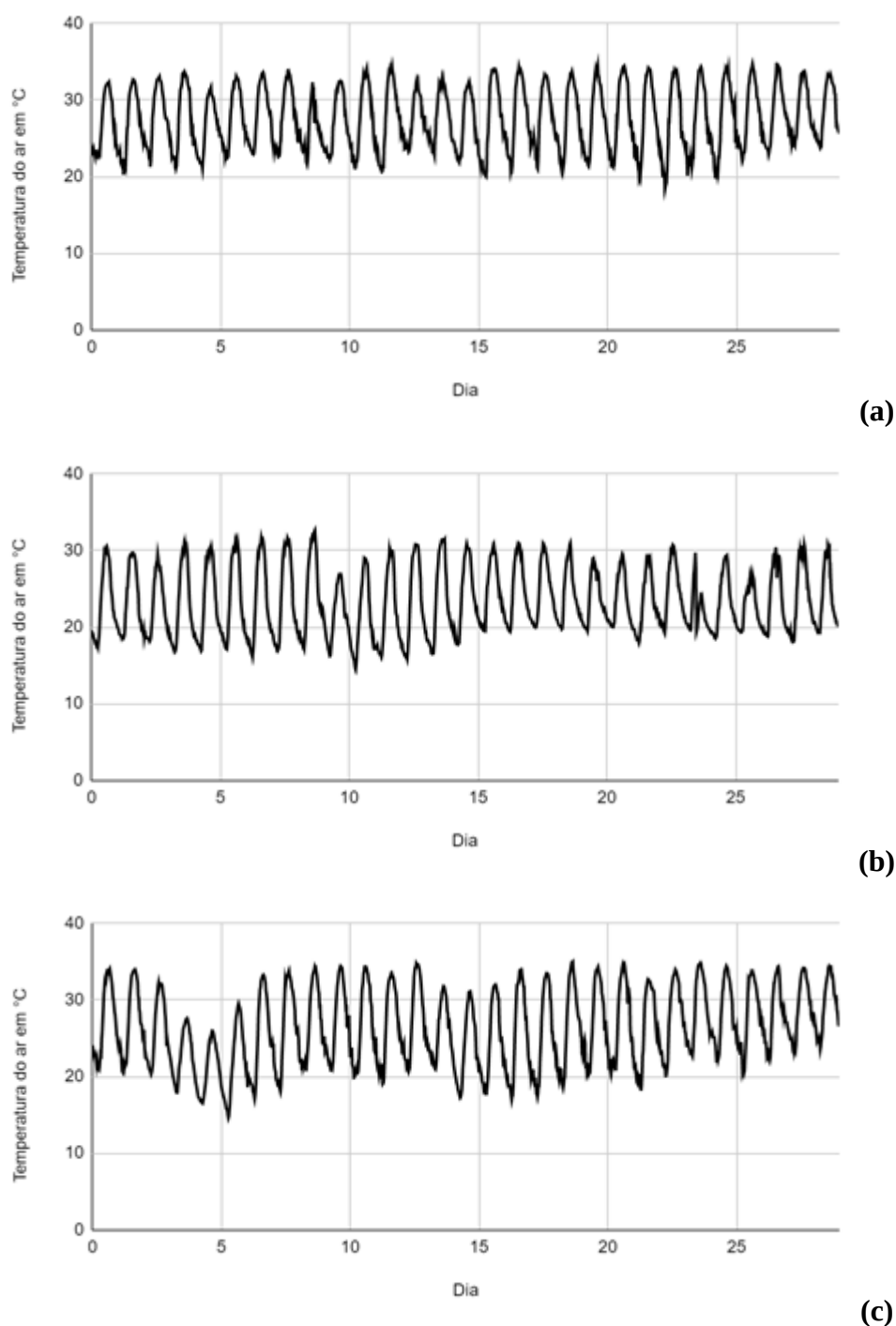
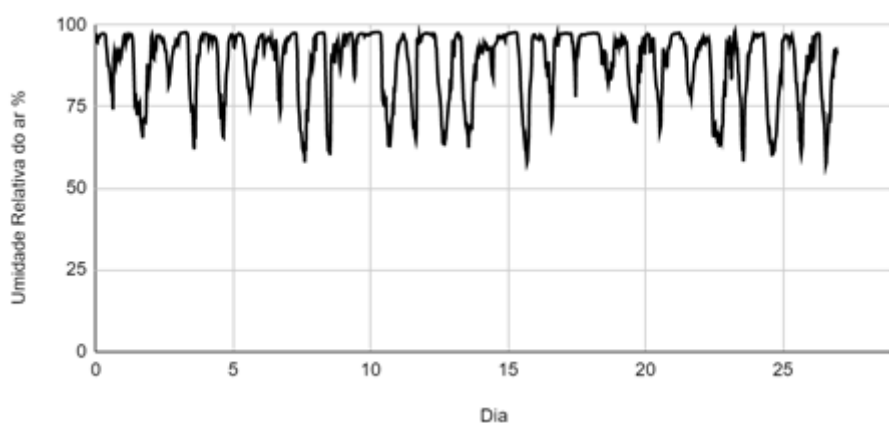


Figura 27: série de temperatura do ar, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

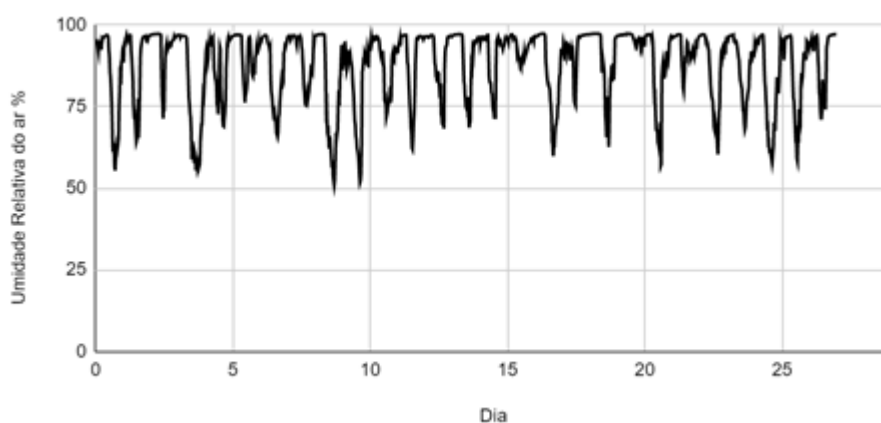
Na figura 27 (c) é possível notar que, o ano de 2010 apresenta-se deslocado para altas temperaturas do ar com pouca variação no período seco, tal como aconteceu em fevereiro do mesmo ano (figura 26 - c). Esse resultado indica que 2010 foi o ano mas seco, isso pode ser resultado da antecipação do período de chuva no ano anterior.

O ano de 2008 marca menos variações na amplitude térmica (figura 27 - a) se comparado com 2010, ano em que há registro da menor e da maior temperatura no mês de agosto. Em 2009 (figura 27 - b) é notada a menor variação e consequentemente a menor amplitude térmica em comparação com os demais anos, para o período seco, mês de agosto.

Outra série analisada é a umidade relativa do ar ao longo dos meses de seca e chuva, figuras 28 e 29. De acordo com a figura 28, mesmo havendo variância ao longo do mês, o período chuvoso, mês de fevereiro, caracteriza em todos os anos altos valores de umidade relativa do ar. Em todos os anos houve tendência em manter-se em valores elevados a umidade relativa do ar no mês de fevereiro.



(a)



(b)

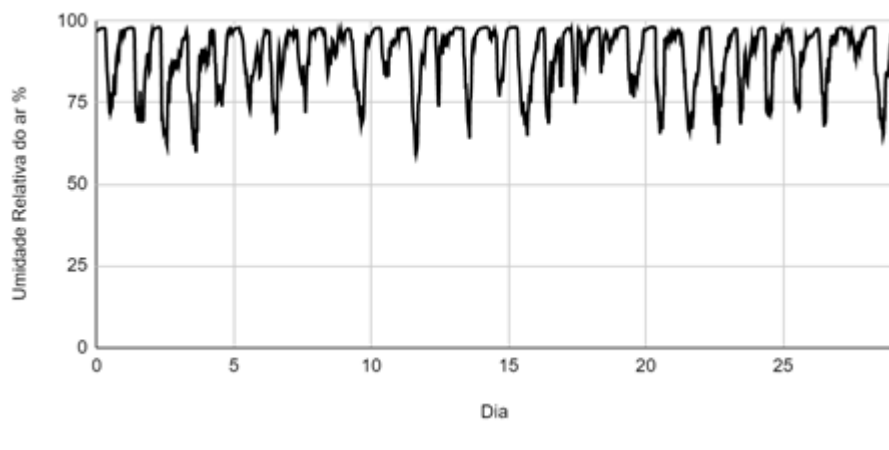
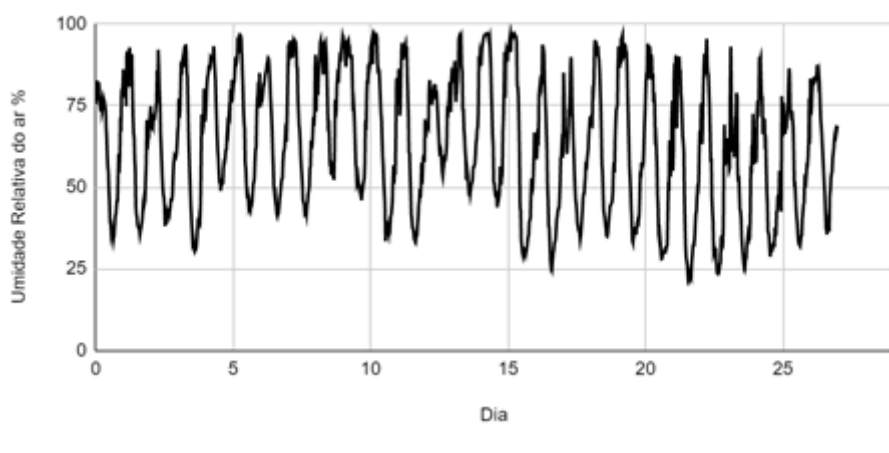


Figura 28: série de umidade relativa do ar, ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

O ano de 2009 marcou maior variabilidade na umidade relativa do ar no período úmido em comparação como os demais anos (figura 28). Fevereiro de 2010 marcou umidade maior que os demais anos, isso ainda indicativo da antecipação da chuva em 2009. Em todos os anos houve tendência de valores altos na umidade no mês de fevereiro.

Conforme a figura 29, as variações nos valores registrados para a umidade relativa do ar no mês de agosto, foram mais intensas em todos os anos. De forma a marcar o período seco.



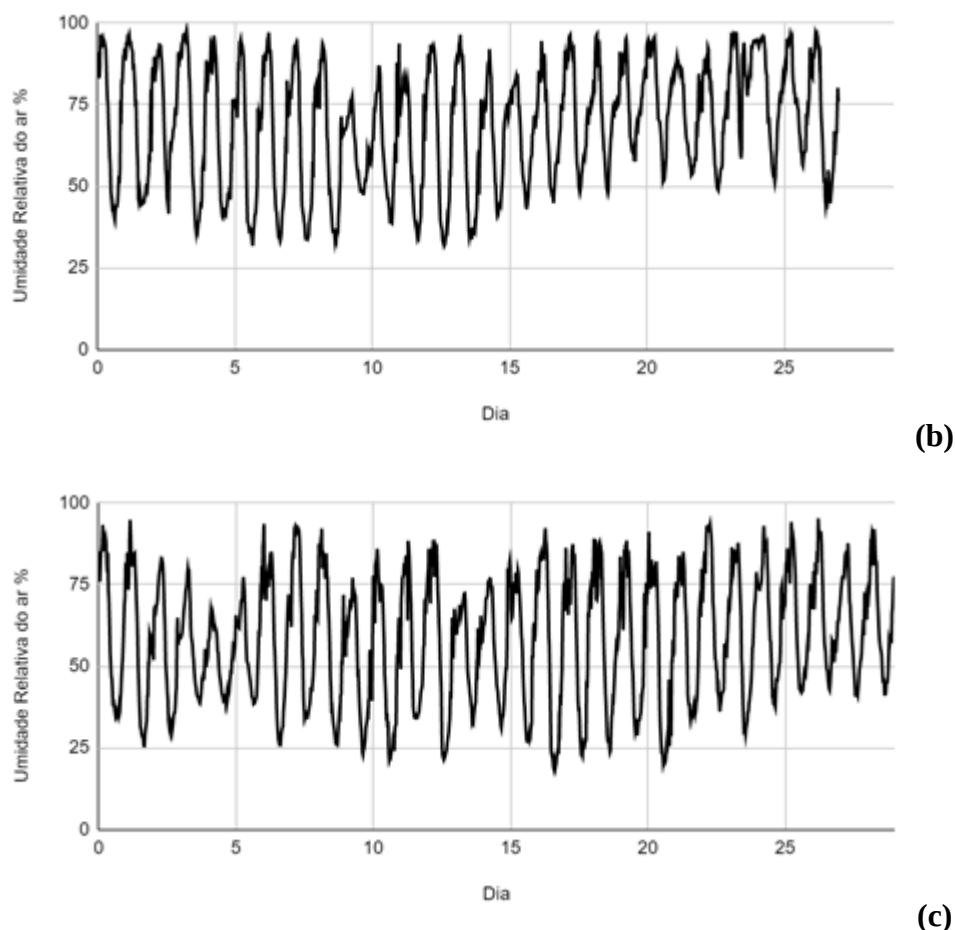


Figura 29: série de umidade relativa do ar, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Outro indicativo da antecipação do período chuvoso no ano de 2009, é marcada na figura 29 (b), essa descreve que no mês de agosto a umidade relativa do ar tendeu a manter-se em valores mais elevados, diferente do registrado no mesmo período dos demais anos. Em 2008 e 2010 (figura 29 - a e c) nota-se variações abruptas e baixos valores de umidade relativa do ar. O ano de 2010 marca ainda seca mais intensa, que colabora para variações abruptas na sua temperatura do ar conforme discutido anterior e ilustrado na figura 27 (c).

Ao observar evolução nas séries de temperatura do ar e umidade relativa do ar, identificamos que conforme esperado, os períodos de mais úmidos a temperatura do ar descreve menor em sua variação, o oposto ocorre em períodos secos. Isso ocorre pois o calor específico da água é maior que o calor específico do ar seco. Outro fator a ser considerado é a disponibilidade de radiação líquida utilizada tanto no processo

de aquecimento do ar, quanto na evapotranspiração, esse último que colabora para o aumento da umidade relativa do ar. As figuras 30 e 31 ilustram a série da radiação líquida para o período úmido e seco, respectivamente, fevereiro e agosto.

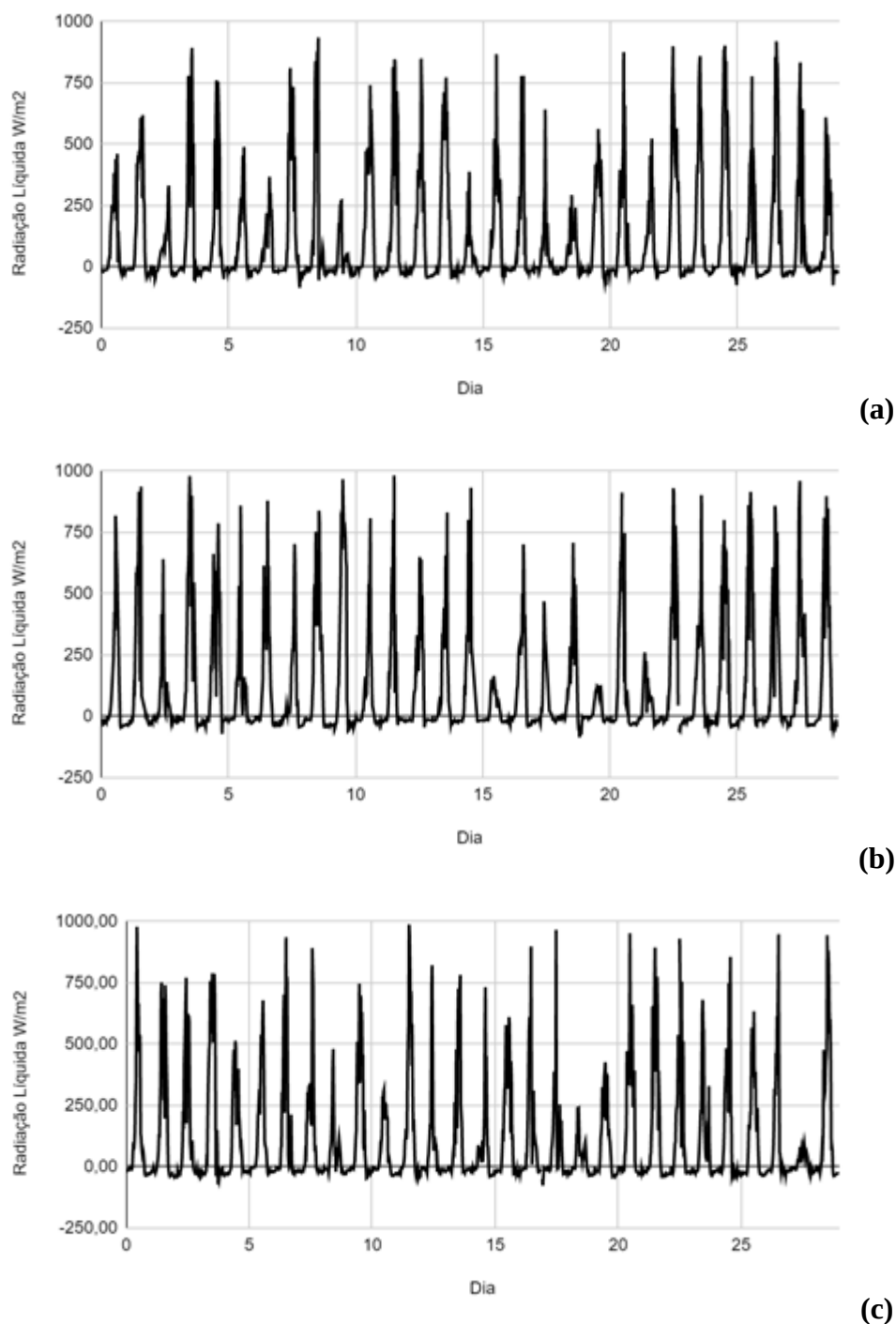
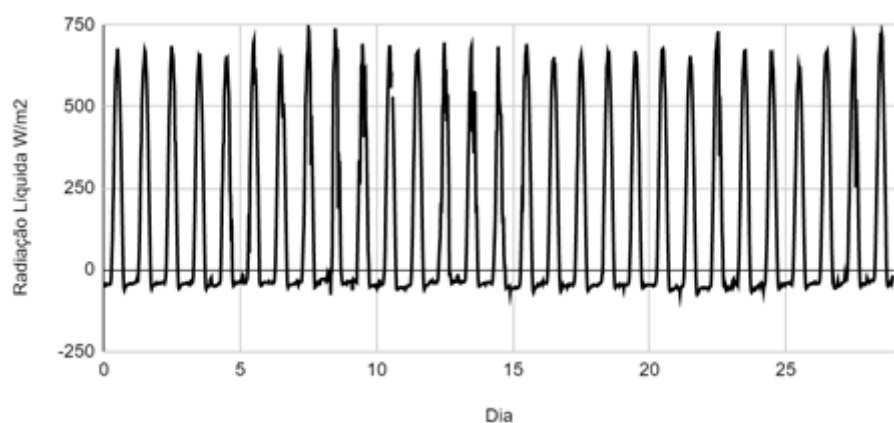


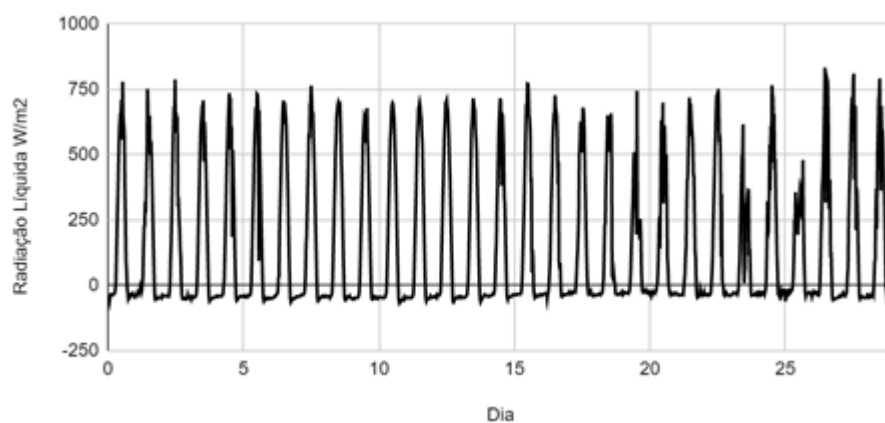
Figura 30: série de radiação líquida disponível ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Fevereiro coincide com o Verão no Hemisfério Sul, o que disponibiliza mais radiação direta provinda do Sol, o que registra nesse período picos elevados de radiação líquida. Entretanto os baixos valores de radiação líquida, ocorre por conta da presença de nuvens de chuva, essas abundante no período úmido. A presença em abundância de umidade faz com que uma pequena parte da radiação líquida seja utilizada no aquecimento do ar.

Na média, conforme as figuras 30 e 31 em todos os anos, o mês de fevereiro marcou valores inferiores ao mês de agosto, porém com picos mais elevados.



(a)



(b)

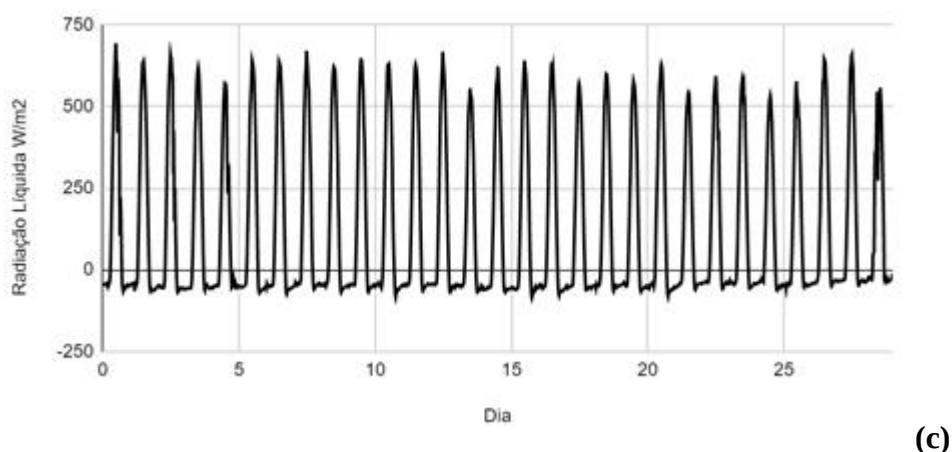


Figura 31: série de radiação líquida disponível ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

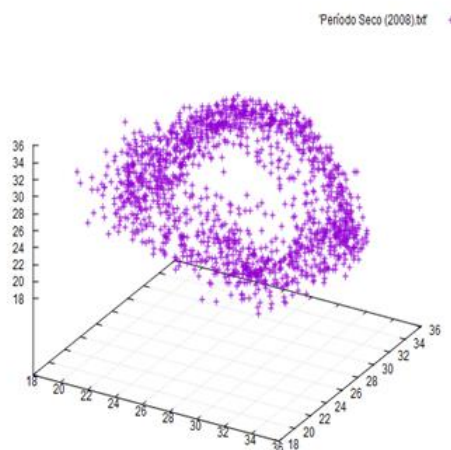
O período seco é caracterizado por variações menos abruptas na radiação líquida, ou seja, menor presença de nuvens. Porém com valores menos intensos que o período úmido, conforme apresentado na figura 31. Isso dá-se pela menor disponibilidade de radiação solar para o local nesse período por conta do inverno no Hemisfério Sul. Esse período é marcado por variações térmicas no ar mais elevado, pois ainda que a radiação líquida disponível seja menor, a ausência de umidade faz com que uma maior parte da radiação líquida seja dedicada para o aquecimento do ar.

4.2. RECONSTRUÇÃO DE ATRADORES DE TEMPERATURA DO AR

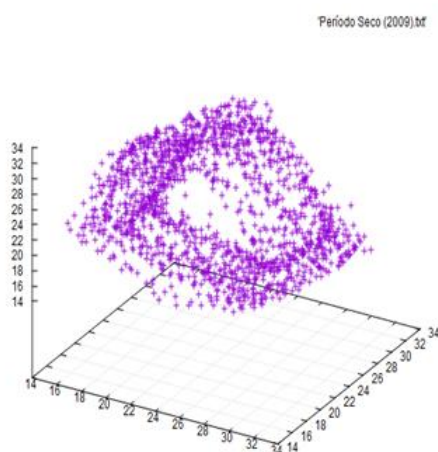
A reconstrução de atrator possibilita identificação de estrutura e estabilidade do sistema estudado. A estabilidade do sistema revela a situação para a qual o sistema tende a permanecer. Na figura 32 e 33 é reconstruído os atratores dos anos de 2008, 2009 e de 2010 para os meses de agosto e fevereiro, respectivamente períodos seco e chuvoso.

Embora os atratores reconstruídos e ilustrados na figura 32, sejam do mesmo período, é notável a diferença entre eles, isso pois se trata de um fractal natural. Em todos os anos é possível notar semelhança dinâmica. Todos os atratores descrevem periodicidade, ainda que de essa descreva uma figura não euclidiana. A obtenção de

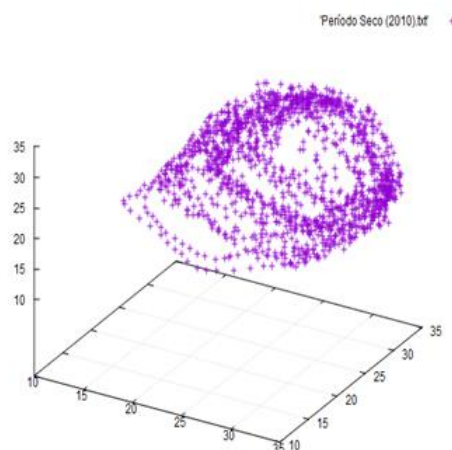
atratores estranhos eram esperados por se tratar de um sistema complexo a dinâmica micrometeorológica da floresta.



(a)



(b)



(c)

Figura 32: atratores reconstruídos de temperatura do ar para o mês de agosto de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010, posicionados em 30° de rotação no plano cartesiano.

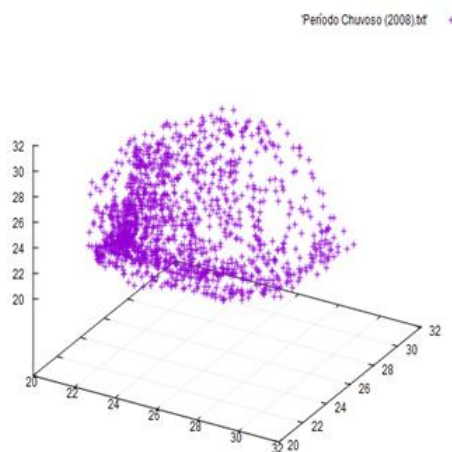
Observe que há acúmulo de pontos nas extremidades da diagonal superior e inferior em todos os atratores reconstruídos, além de uns poucos pontos centralizados na imagem. O acúmulo de pontos em na parte inferior e superior do espaço de fase, caracterizada no período seco valores altos e baixos valores de temperatura do ar, o que caracteriza maior variação e maior amplitude térmica no período em questão.

Nessa perspectiva é possível interpretar o atrator reconstruído no mês de agosto (figura 32) juntamente com as séries das temperaturas do ar do mesmo período (figura 27). Observando a figura 32 (b) e (c) - 2009 e 2010 - indica que a imagem se estende em profundidade, o mesmo ocorre em 2008 (a), mas devido a aparente circunferência ser melhor definida, os pontos no espaço de fase estão sobrepostos o que dificulta a visualização.

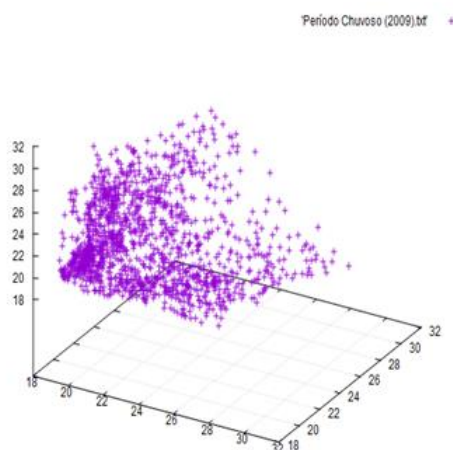
O ano de 2009 (figura 32 - b) marca maior concentração de pontos ao centro da figura, esse ano marcou menor amplitude térmica, o que reforça que a abertura da do atrator que indica menor amplitude térmica. A presença de pontos mais concentrados ao centro do atrator pode indicar maior umidade no período estudado. Conforme a discussão anterior a respeito da umidade relativa do mês de agosto de 2009, o período seco marcou maior índice de umidade relativa do ar, em comparação com os outros anos. A concentração de pontos ao centro indica menor amplitude térmica, o que indica valores mais elevados de umidade relativa.

O atrator de 2010 (figura 32 - c) aponta um deslocamento para uma região superior no espaço de fase, indicio de temperatura mais elevada. Esse resultado mostra-se de acordo com a tendência de temperaturas do ar mais elevadas (figura 27 - c) capazes de tender a deslocar o atrator reconstruído - o inverso que ocorreu em 2009. No período mais úmido - mês de fevereiro - é possível verificar a descaracterização dos atratores do período seco, conforme a figura 33. Embora descaracterizado a imagem continua a descrever um atrator.

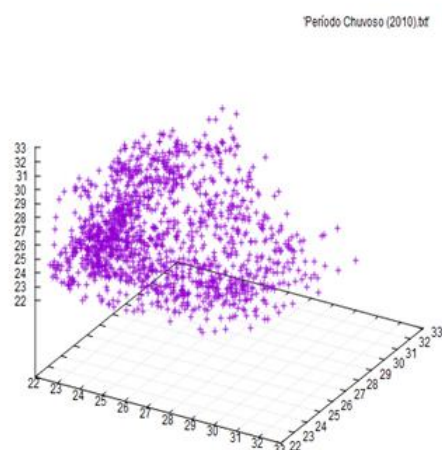
A descaracterização dá-se, pois, por conta do aumento da dimensionalidade dos atratores de temperatura do ar no período chuvoso - conforme apontado na literatura -, é esperado que ele descreva uma dinâmica mais complexa, tal como o obtido na figura 33. Para o mesmo período - fevereiro - todos os atratores de temperatura do ar para o período chuvoso, embora mais desorganizado se comparado com do período seco, apresentaram semelhança. Embora muito mais complexo, é possível observar uma tendência periódica emergente nos três anos estudados.



(a)



(b)



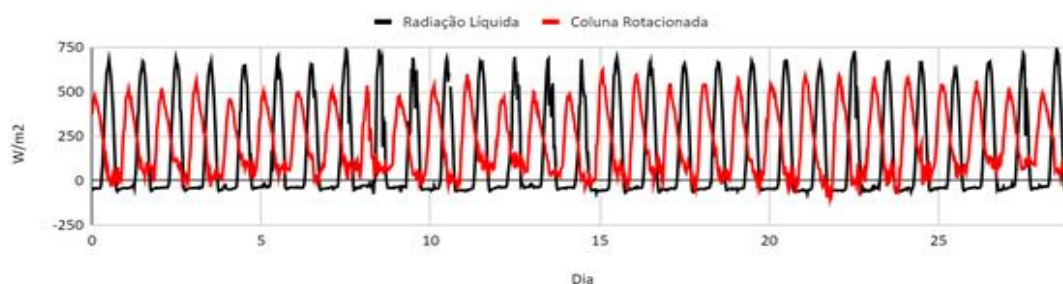
(c)

Figura 33: atratores reconstruídos de temperatura do ar para o mês de fevereiro (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010, posicionados em 30° de rotação no plano cartesiano.

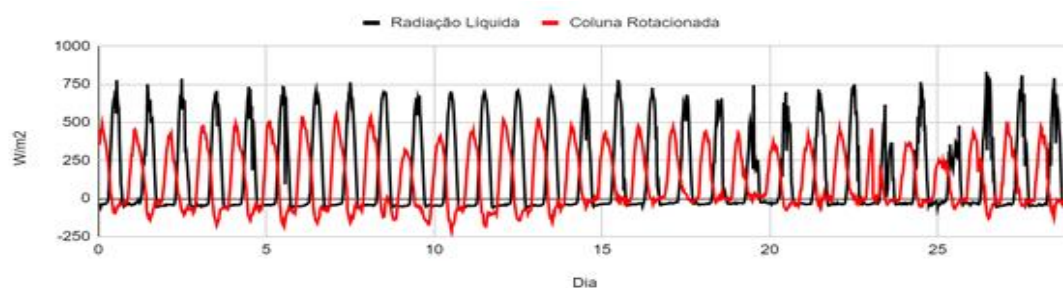
Comparando períodos secos e úmidos de cada ano (figuras 32 e 33), nota-se que o período chuvoso não caracteriza concentração de pontos nas extremidades do atrator reconstruído. O atrator se caracteriza com maior concentração de pontos ao centro do espaço de fase. Esse resultado indica menor amplitude térmica, consequência da maior umidade no período em questão.

4.3. MATRIZ DE TEMPERATURA DO AR ROTACIONADA

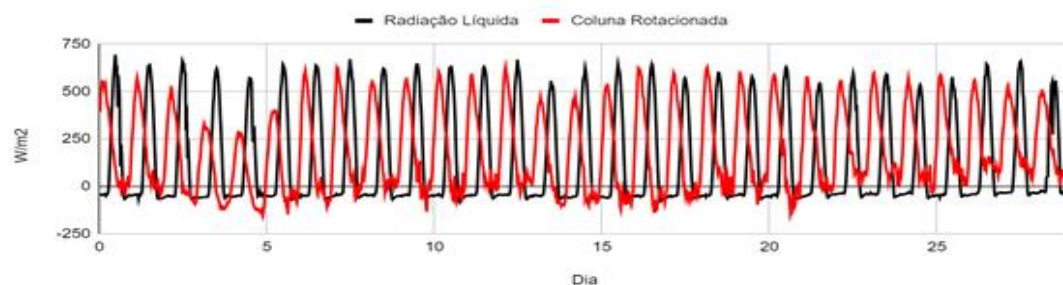
Os resultados a seguir (figura 34 e 35) indicam o perfil da radiação líquida coletada da torre e o perfil obtido segundo a técnica de rotação de matriz aplicada sobre a matriz de tempos defasados. As figuras 34 e 35 ilustram os dados obtidos para um mês do período seco e um mês do chuvoso, respectivamente, agosto e fevereiro de cada ano estudado. Para todos os meses, conforme indica a metodologia, foi realizada a mesma transformação linear.



(a)



(b)



(c)

Figura 34: séries de radiação líquida e séries obtidas pela rotação da matriz de temperatura do ar de agosto, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

A primeira observação pertinente notável na figura 34 é que em todos os anos é que os máximos e mínimos das séries de dados estão defasados. Os gráficos

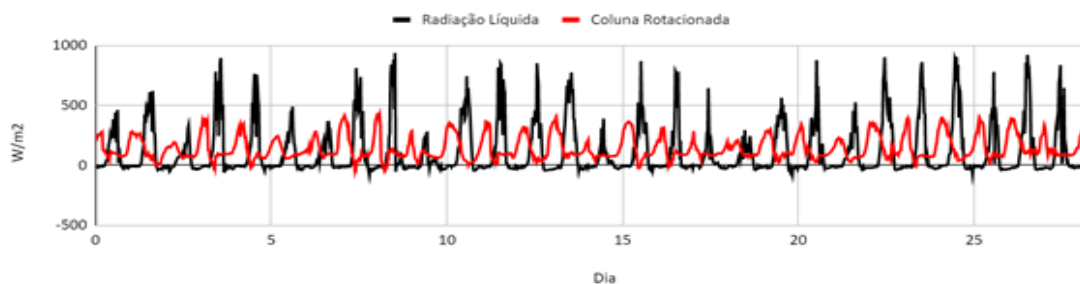
apresentados na figura indicam adiantamento nos dados obtidos pelo método em comparação com os dados coletados na torre. É possível que a defasagem temporal final apresentada pelos dados rotacionados, em relação aos dados originais de radiação, esteja relacionada com a defasagem temporal de 5 horas utilizada para a reconstrução do espaço de fase, uma vez que, utilizando valores arredondados:

$$\frac{5}{\cos(250^\circ)} \cong -15$$

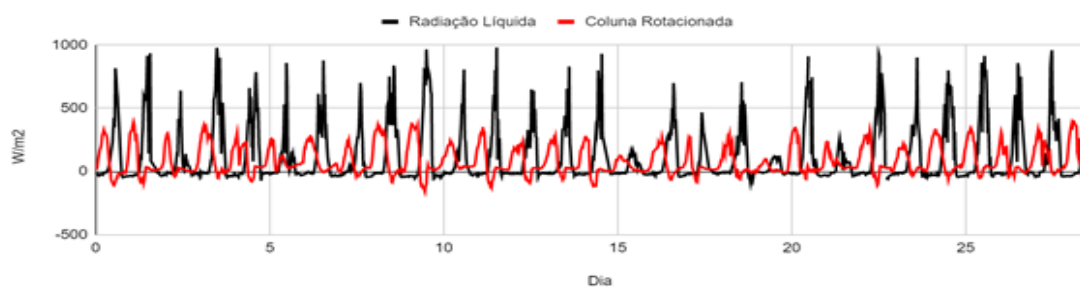
Com base nesse resultado empírico, é possível que a defasagem inicial (τ) utilizada na construção da matriz do espaço de fase, o ângulo utilizado na matriz de rotação (α) e a defasagem final (δ) esteja relacionada pela seguinte expressão analítica:

$$\delta \cong \frac{\tau}{\cos(\alpha)}$$

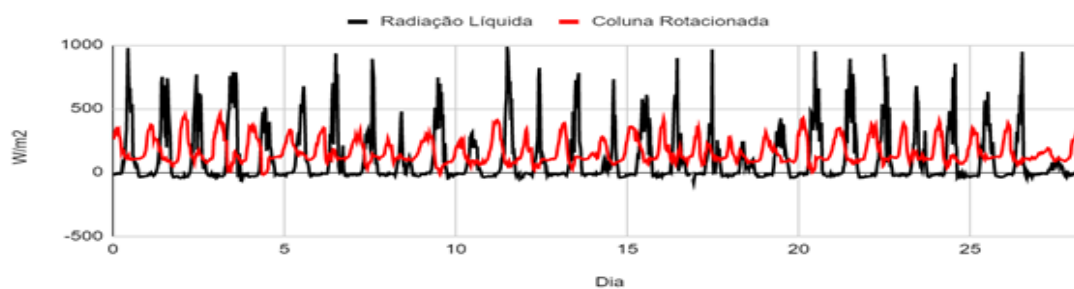
Na figura 35 também é notado máximos e mínimos deslocados nas duas séries em todos os anos. Também é possível observar na figura 35 que, embora tenha utilizado a mesma transformação linear que foi utilizada no mês de agosto (figura 34), as séries em escalas ligeiramente diferentes.



(a)



(b)

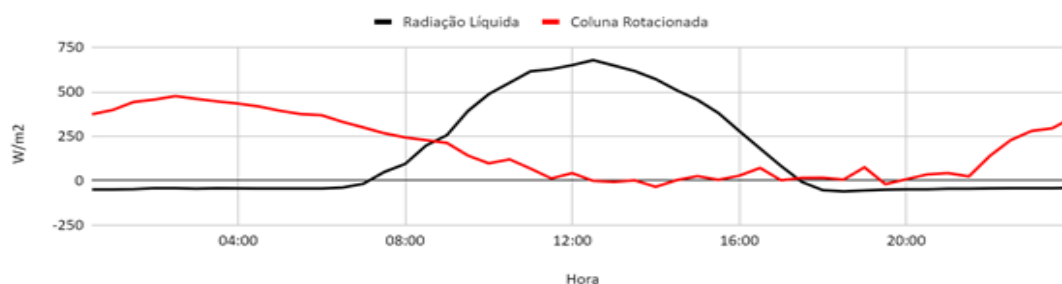


(c)

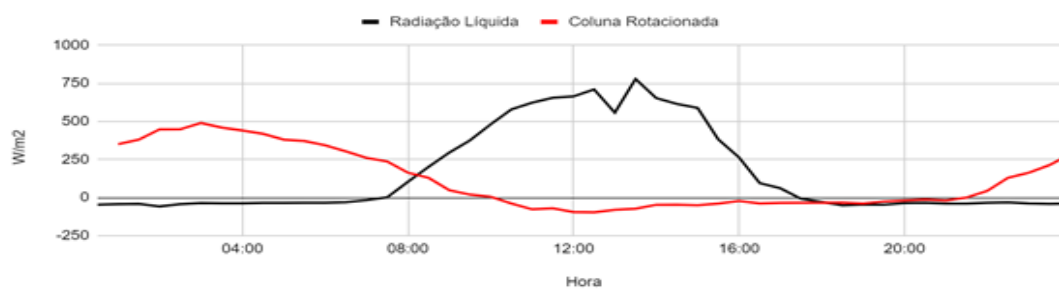
Figura 35: séries de radiação líquida e séries obtidas pela rotação da matriz de temperatura do ar de fevereiro, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

A figura 35 indica que, para o mês de fevereiro - período chuvoso - é necessária outra transformação linear. É esperado que por se tratar de sistema aberto - complexo - a transformação linear não seja a mesma para períodos diferentes, as figuras 34 e 35 reforçam isso. Há a possibilidade que esse resultado seja devido a interferência da maior presença de umidade no mês de fevereiro, devido ao aumento da complexidade presente na dinâmica do ecossistema no período chuvoso, conforme é apontado na sessão Atratores de Temperatura do Ar e ilustrado nos atratores reconstruídos (figuras 32 e 33).

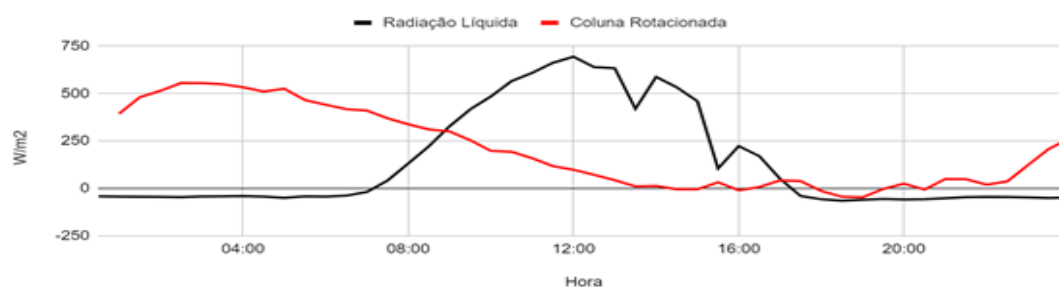
Nas figuras 36 e 37 são apresentadas a comparação entre os perfis da séries de dados coletados na torre e obtidos pela técnica do primeiro dia do mês de referência utilizado no período seco e chuvoso, respectivamente, agosto e fevereiro. Os mesmos efeitos - máximos e mínimos defasados e aumento da complexidade no período chuvoso - observados em escala mensal (figuras 34 e 35) ocorre em escala diária, esses são observados na escala diária com mais clareza.



(a)



(b)

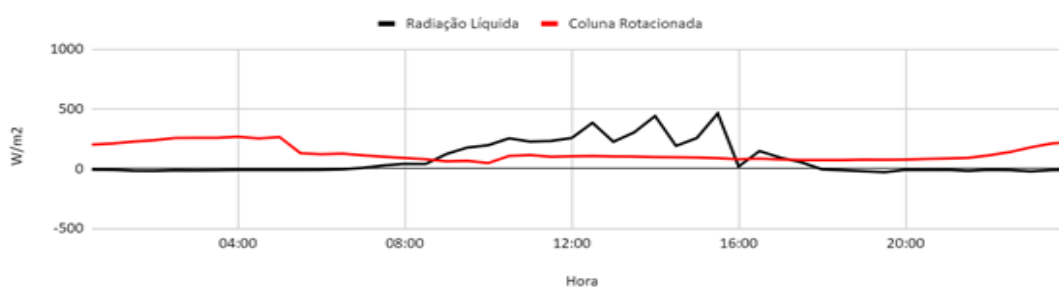


(c)

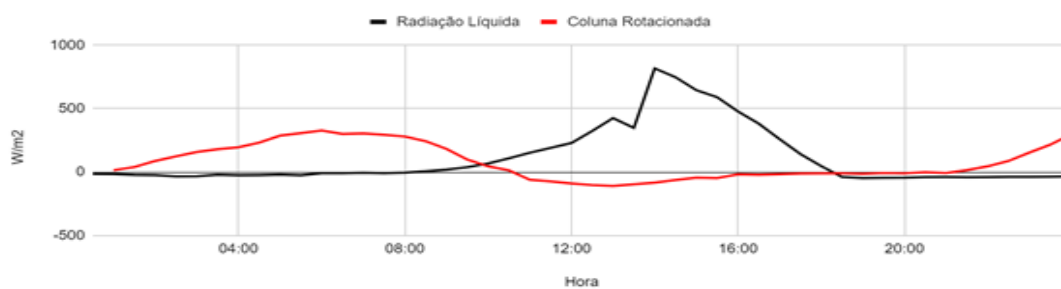
Figura 36: evolução dinâmica da radiação líquida do período seco e da série obtida pela rotação da matriz de temperatura do ar ao longo do primeiro dia de agosto, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

A figura 36 indica que ao perfil obtido segundo a técnica de rotação de matriz apresenta uma aproximação do perfil real, ignorando por exemplo variações instantâneas na radiação líquida registrada na torre. Exemplo disso é a figura 36 (b) e (c), em que a radiação líquida apresenta picos ao longo do dia, provavelmente devido passagem de nuvens, o perfil obtido pela técnica utilizada não apresenta essa variação.

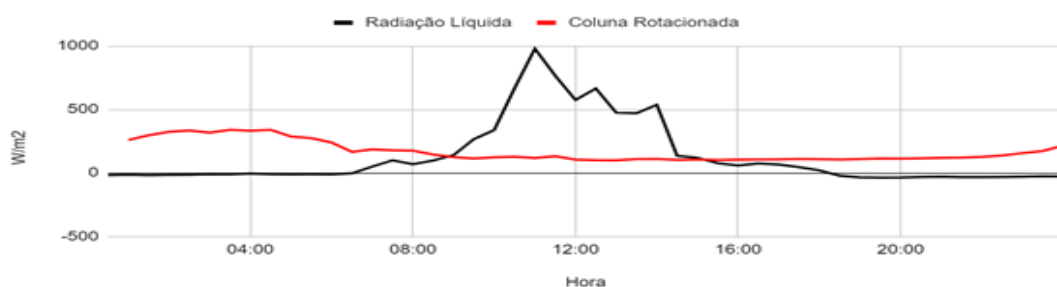
Os perfis estudados para o mês de fevereiro dos anos estudados são apresentados na figura 37. O mesmo resultado a respeito da transformação linear apontados pela interpretação da figura 35 é reforçada na figura 37.



(a)



(b)



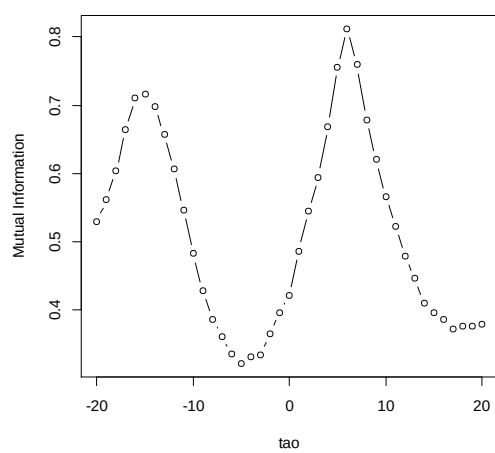
(c)

Figura 37: evolução dinâmica da radiação líquida do período chuvoso e da série obtida pela rotação da matriz de temperatura do ar ao longo do primeiro dia de fevereiro, dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

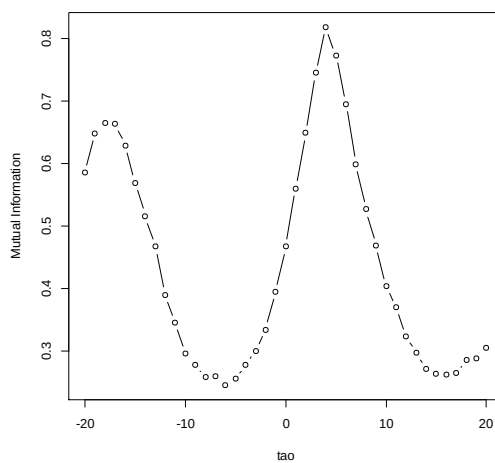
O resultado reforça que a transformação não é expressa uma lei geral para todos os períodos do ano, sendo mais sensível a períodos úmidos. A figura 37 também aponta mais indícios de que o perfil obtido pela técnica expressa uma aproximação do perfil real, conforme já apontado pela discussão dos resultados da figura 36.

4.4.ANÁLISE DA INFORMAÇÃO MÚTUA

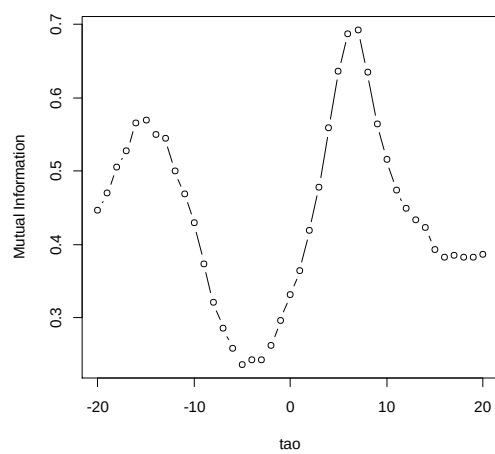
A análise da informação mútua aponta para a semelhança entre as séries, ou seja, o quanto as séries apresentam a mesma informação. Nessa perspectiva as figuras 38 e 39 apresentam a informação mútua entre a radiação líquida e a temperatura do ar, isso revela o quanto de informação a respeito da radiação líquida a temperatura do ar carrega. Essa análise foi realizada para os anos de 2008, 2009 e 2010, apenas para os meses de agosto e fevereiro, os meses de referência para as análises dos períodos de seca e chuva, respectivamente.



(a)



(b)

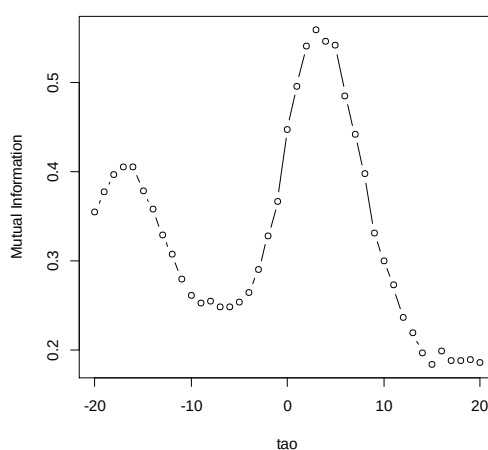


(c)

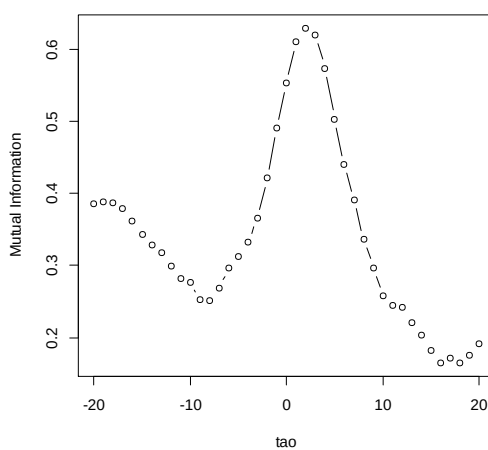
Figura 38: análise da informação mútua vs tempo defasado entre radiação líquida e temperatura do ar para agosto de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Como a temperatura do ar é uma variável função da radiação líquida é esperado que a o máximo de informação entre elas seja obtida com atraso, isso é caracterizado nos resultados da figura 38. A ilustração (figura 38) aponta que em todos os anos no período seco, representado pelo mês de agosto, a informação mútua manteve níveis acima ou próximos a 70%.

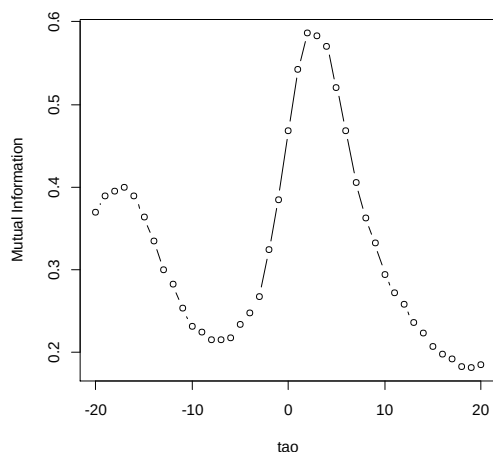
Os resultados obtidos da informação mútua vs tempo de defasagem para o mês de fevereiro apresentados na figura 39, aponta semelhança no atraso entre as séries analisadas, o que é esperado. Entretanto a informação mútua entre as séries diminui no mês de fevereiro em todos os anos.



(a)



(b)

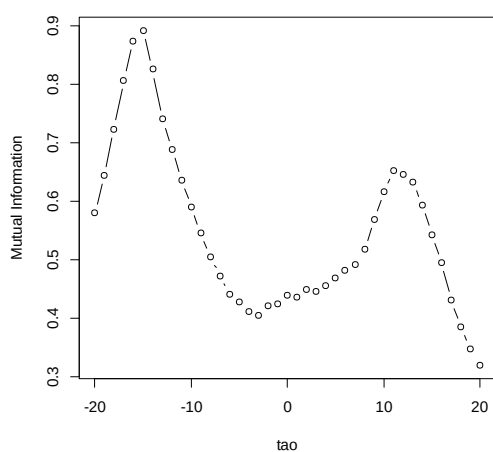


(c)

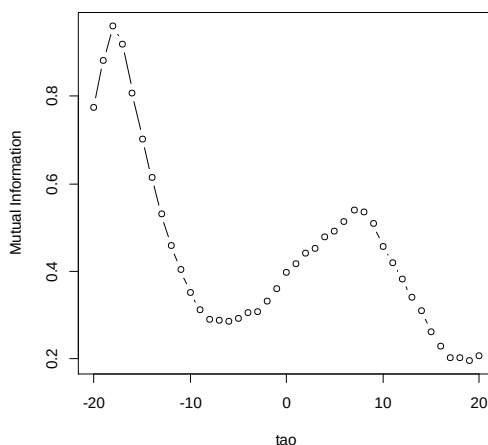
Figura 39: análise da informação mútua vs tempo defasado entre radiação líquida e temperatura do ar para fevereiro de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Para o período chuvoso, conforme indica a figura 39, a informação mútua entre as séries de radiação líquida e temperatura do ar diminui, chegando a marcar valores próximos a 50%. As análises indicam que a temperatura do ar pode ser descrita aproximadamente apenas como uma função da radiação líquida em meses secos, o mesmo não ocorre no período úmido.

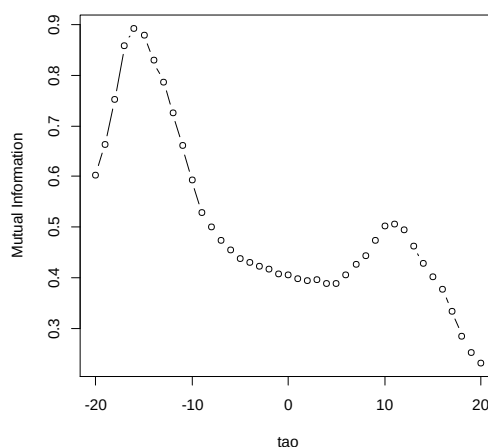
Também foram verificados a informação mútua vs tempo de defasagem entre as séries obtidas pela técnica de rotação de matrizes e as séries reais. Como os dados obtidos pela rotação do espaço de fase de temperatura do ar, o resultado da figura 40 e 41 aponta o quanto de informação de radiação líquida é possível obter aplicando a técnica de rotação de matrizes a temperatura do ar.



(a)



(b)

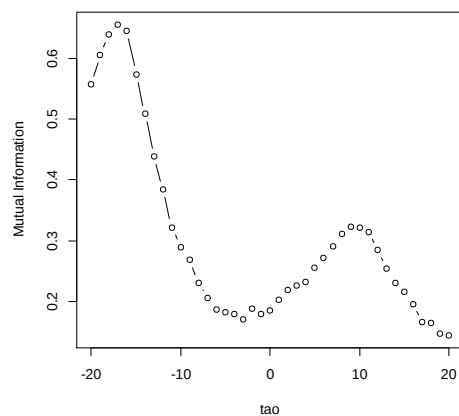


(c)

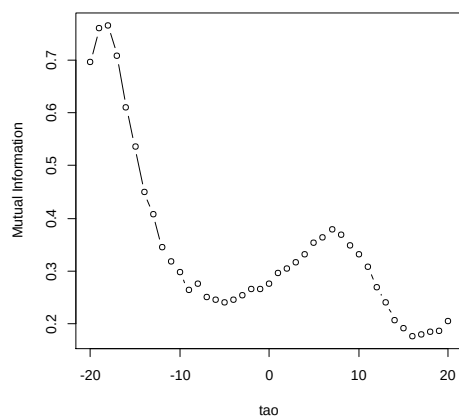
Figura 40: análise da informação mútua vs tempo defasado entre as séries obtidas pela rotação das matrizes de temperatura do ar com as séries da radiação líquida de agosto dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Os resultados obtidos na figura 40, indica que as séries obtidas segundo a técnica estão adiantadas em comparação com as séries reais. Esse resultado reforça a discussão apontada na sessão anterior a respeito das séries estarem fora de fase. Embora defasados, a informação obtida segundo a rotação de matrizes de temperatura do ar apresenta corresponde a aproximadamente 90% da informação real, para o mês de agosto.

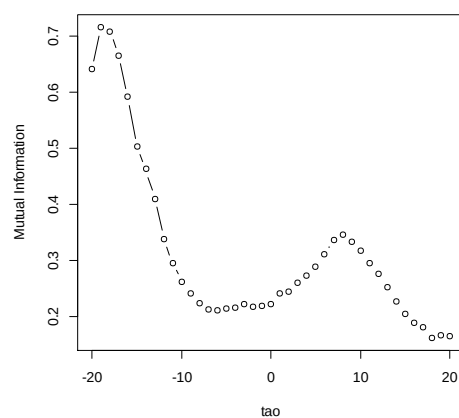
Para o período chuvoso - mês de fevereiro -, foi verificada na figura 41, que embora que o tempo de defasagem apresentou as mesmas características, entretanto a informação mútua entre as séries – real e obtida pela técnica – diminuiu.



(a)



(b)



(c)

Figura 41: análise da informação mútua vs tempo defasado entre as séries obtidas pela rotação das matrizes de temperatura do ar com as séries da radiação líquida de fevereiro dos anos (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

A figura 41 apresenta resultados para a informação mútua máxima para o mês de fevereiro com valores aproximados entre 60% e 70%. Esses resultados sugerem que haja um limiar para a umidade, onde a partir dele a umidade interfere na relação entre a temperatura do ar e radiação líquida, de forma que os dados obtidos via a técnica descrevam menos a realidade.

Na perspectiva do acoplamento estrutural de sistemas complexos, é possível inferir dados da umidade relativa do ar, por conta de sua interferência no sistema. A interferência da umidade na relação estabelecida entre a temperatura do ar e da radiação líquida, atua no sistema de maneira que a temperatura do ar carregue informação dela também. Isso confirmado na sessão Atratores de Temperatura do Ar que aponta que a temperatura do ar é a variável micrometeorológica com maior correlação com as demais variáveis.

Os resultados obtidos indicam que a informação mútua entre a os dados obtidos segundo a técnica de rotação da matriz de temperatura do ar de tempos defasados e os dados de radiação líquida são uma medida indireta da umidade relativa. A figura 42 informações a mútua entre as séries obtidas pela técnica e a série real aumenta conforme a umidade relativa do ar diminui. Dessa forma, no ecossistema estudado a informação mútua tende apresentar baixos índices nos períodos chuvosos e elevar-se nos períodos secos. Isso indica que no período chuvoso a temperatura do ar não pode ser aproximada apenas de uma função dependente da radiação líquida.

A figura 42 revela que nos meses em que a umidade relativa do ar marca seus valores mínimos, a informação mútua entre a série obtida pela técnica e a série de radiação líquida real marca valores máximos. O inverso ocorre quando a umidade relativa do ar marca valores máximos. Dessa forma a partir de junho a informação mútua tende a ser maior que a umidade relativa do ar, marca o seu valor máximo entre julho e setembro, meses esses onde a umidade relativa do ar marca seus menores valores. A partir do mês de outubro assume tendência de marcar valores inferiores a umidade relativa do ar. A análise se refere aos anos de 2008, 2009 e 2010, conforme a figura 42 ilustra.

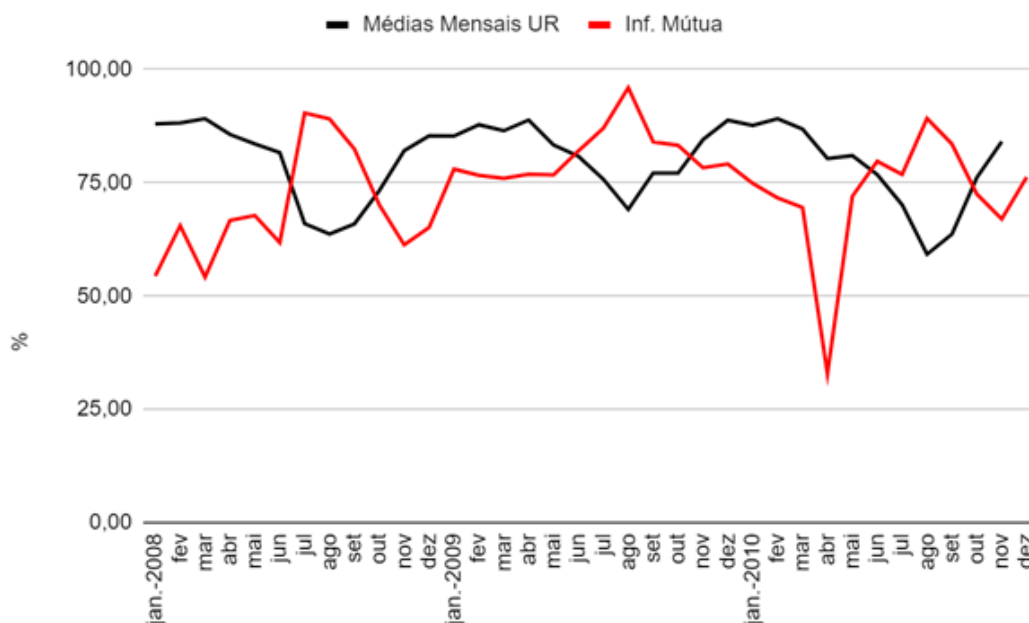


Figura 15: médias mensais de umidade relativa do ar e informação mútua de cada mês. Dados em porcentagem.

A partir do mês de outubro a umidade relativa do ar tende valores maiores que a informação mútua entre as séries obtidas pela metodologia e a radiação líquida real, de acordo com a figura 42, assumindo maiores valores entre março e abril. Enquanto no período seco, para os três anos, o comportamento entre a informação mútua das séries analisadas - obtida pela técnica e a radiação líquida real - e a umidade relativa do ar são bem caracterizados de forma inversa e semelhante, no período chuvoso a semelhança no comportamento não é tão bem caracterizada.

Exemplos da menor similaridade no comportamento ilustrado na figura 42, é fevereiro de 2008 que é marcado por média mensal de umidade relativa do ar acima de 80% e ainda assim marca um pico na informação mútua entre as séries obtidas pela técnica de rotação de matizes e a radiação líquida coletada na torre. Abril de 2009 é outro exemplo, esse mês marca a maior média mensal de umidade relativa do ar, por outro lado a informação mútua do mesmo período não é a menor. Ou ainda abril de 2010, mês onde a informação mútua é o menor registro dos três anos estudados, entretendo o mesmo mês não marca sequer o um máximo de umidade relativa do ar no ano em questão.

Os resultados apontam que não é trivial determinar a partir de qual valor de umidade relativa do ar, a informação mútua e a própria umidade relativa do ar descreveram comportamento inversos e semelhantes. Embora valores de umidade relativa do ar próximos a 80% indique a inversão entre os máximos e mínimos da umidade relativa do ar e informação mútua - entre as séries obtidas pela técnica e a série real de radiação líquida - e a região de maior semelhança ainda que com comportamento inverso é para valores inferiores aos 80% da umidade relativa do ar.

A diminuição na semelhança entre a umidade relativa do ar e informação mútua das séries analisadas, indica que não é apenas a maior presença de umidade influencia na informação mútua, consequentemente na temperatura do ar. Caso contrario a informação mútua apresentaria semelhança - mesmo com comportamento inverso - com a umidade relativa do ar. Isso indica novamente que a temperatura do ar no período úmido se torna uma variável dependente não apenas da radiação líquida, mas também da umidade relativa e de outras variáveis mais presentes no período chuvoso.

Realizando uma regressão linear (figura 43) de umidade relativa do ar pela informação mútua obtida é possível notar proporcionalidade com fator decrescente entre as grandezas.

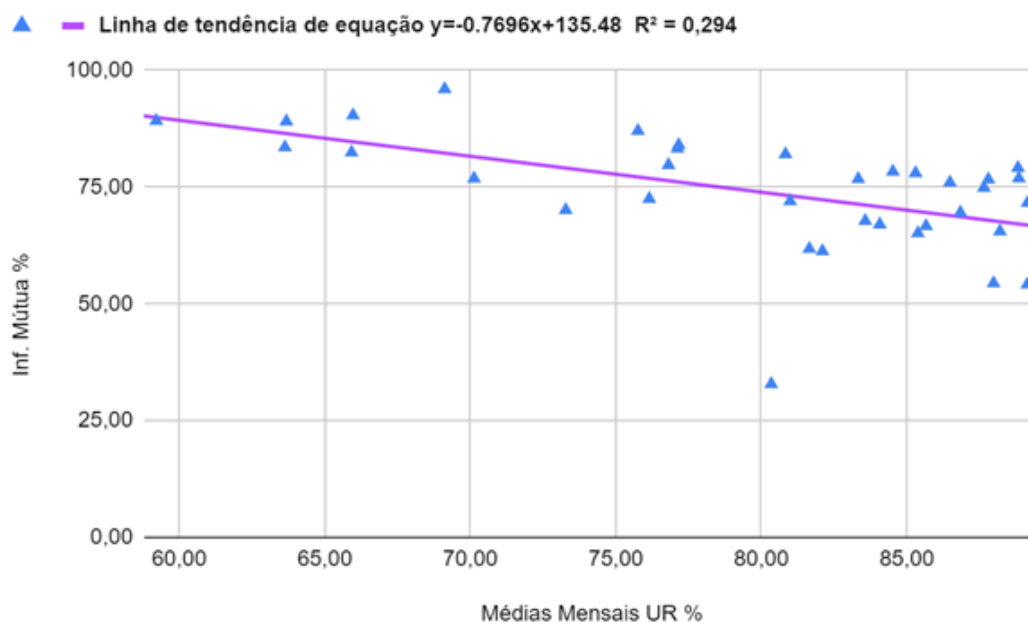


Figura 43: regressão linear de informação mútua com os dados de umidade relativa do ar.

Essa relação demonstra a possibilidade de utilizar a técnica de rotação de matrizes aplicada a matriz de temperatura construída segundo o teorema de Takens, não apenas para obter informações da radiação líquida, mas também de inferir dados da umidade relativa do ecossistema estudado. Entretanto, essa apresenta maior precisão no período seco, havendo necessidade do estudo mais detalhado a cerca das demais variáveis estocásticas presentes no período chuvoso que torna a dinâmica micrometeorológica do ecossistema mais complexo.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através da investigação realizada neste trabalho, apontam para a eficiência na caracterização da dinâmica do ecossistema estudado utilizando o Teorema de Takens. Com os resultados obtidos também há indicativos da potencialidade do método de rotação de matrizes em caracterizar a radiação líquida e a umidade relativa do ar na Reserva Biológica de Jarú.

Aplicando o teorema de Takens a séries de temperatura do ar foi possível obter a caracterização da dinâmica do ecossistema que constitui a Reserva Biológica de Jarú. Em todos os anos obtivemos ciclos semelhantes, o que aponta estabilidade na dinâmica estudada. É necessário apontar que a estabilidade apresenta dinamicidade, por conta da vasta interação entre as variáveis que compõem a dinâmica micrometeorológica da floresta. Essa conclusão é apontada nos diferentes atratores obtidos no período seco e chuvoso, de forma que no período de maior umidade a dinâmica apresenta maior grau de complexidade no atrator obtido, o que revela a presença maior de variáveis estocásticas. Entretanto, ainda assim, é possível notar a periodicidade na dinâmica micrometeorológica da floresta.

A técnica de rotação do espaço de tempos defasados foi aplicada ao espaço de fase tridimensional, construído segundo a teoria de Takens, com dados de temperatura do ar. Os resultados apontam para a possibilidade de caracterizar perfis de radiação líquida rotacionando o espaço de fase de tempos defasados. Entretanto a caracterização do perfil e radiação líquida se mostra sensível em períodos onde a dinâmica apresenta maior grau de complexidade, como o período chuvoso.

Os resultados dos perfis de radiação líquida obtidos pela técnica de rotação dos espaços de fase de tempos defasados da temperatura do ar, indicam adiantamento em relação aos dados reais, tanto na escala mensal quanto na escala diária. Ao analisar a informação mútua entre as séries reais de radiação líquida e as obtidas pela técnica o adiantamento se confirma. A defasagem final – adiantamento das séries obtidas em relação as séries reais - é resultado da relação empírica entre o tempo de defasagem utilizado na construção do espaço de fase da temperatura do ar e o ângulo utilizado na matriz de rotação.

Foram analisadas a informação mútua entre as séries de temperatura do ar e radiação líquida, a qual aponta que a temperatura do ar é uma com maior nível de

correlação no período seco com a radiação líquida. A informação entre a temperatura do ar e a radiação líquida diminui no período chuvoso. Esse resultando aponta para a diminuição da capacidade da temperatura do ar de descrever o comportamento da radiação líquida em períodos mais úmidos.

O resultado anterior a respeito da capacidade da temperatura do ar de descrever o comportamento da radiação líquida, é reforçado com a análise da informação mútua entre as séries de radiação líquida real e as séries obtidas pela rotação da matriz de tempos defasados. Segundo os resultados inferidos, a informação mútua decresce à medida que a umidade aumenta, de forma que elas descrevam comportamento semelhante, ainda que inverso. A umidade relativa é melhor inferida a partir do comportamento da informação mútua nos períodos secos.

A sensibilidade na relação entre a radiação líquida e a temperatura do ar com a umidade, revela a possibilidade de obter informações acerca da umidade relativa do ar com a obtenção de dados da informação mútua entre os dados reais e os dados obtidos pela técnica, conseqüentemente a relação estabelecida com a temperatura. A relação entre a informação mútua e umidade relativa é melhor estabelecida no período seco.

Conclui-se, portanto, que existe inter-relação - acoplamento - entre as variáveis umidade relativa do ar, temperatura do ar e radiação líquida. A inter-relação varia ao longo da dinâmica do ecossistema. Essa relação é melhor definida no período seco, de forma que a termodinâmica do ecossistema estudado seja determinada aproximadamente apenas pela radiação líquida, o mesmo não ocorre em períodos chuvosos.

Estudos futuros são necessários, na busca por compreender melhor o acoplamento estrutural entre variáveis micrometeorológicas, principalmente a presença de variáveis estocásticas predominantes no período chuvoso. Além do estudo dos limites de obtenção de dados do ecossistema utilizando apenas uma série de dados associados a técnicas de análises de sistemas complexos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARBANEL, H. D. I.; BROW, R.; SIDOROWICH, J. J.; TSIMRING, L. S. **The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems**. Review of Modern Physics. Vol. 65, n. 4, p.1331-1392. 1993

ANDRADE, Nara Luisa Reis de et al. **Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição Amazônia-cerrado**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 24, n. 3, p. 346-355, 2009.

ARFKEN, G. **Mathematical Methods for Physicists**. Boston. Academic Press, 1985.

BIUDES, Marcelo Sacardi et al. **Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 202, p. 112-124, 2015.

BORGES, V.P.; OLIVEIRA, A.S.; FILHO, M.A.C.; SILVA, T.S.M.; PAMPONET, B.M. **Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas**, Bahia. Rev Bras de Eng Agr e Amb. v.14 (1), 74–80, 2010.

CAMPANHARO, A.S.L.O.; RAMOS, F.M.; MACAU, E.E.N.; ROSA, R.R.; BOLZAN, M.J.A.; SÁ, L.D.A. **Searching chaos and coherent structures in the atmospheric turbulence above the Amazon forest**. Phil. Trans. R. Soc. A, Vol. 366, p. 579-589, 2007.

CAPISTRANO, V. B. **Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas em Sinop-MT Utilizando a Teoria da Complexidade**. Cuiabá, 2007. 62p. Dissertação (Mestrado) - Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. 6.ed. São Paulo: Cultrix, 1997. p.256. (tradução: Newton Roberval Eicheberg)

CASTILHO, Guilherme José de et al. **Análise de caos em leito fluidizado circulante**. Campinas, 2011. 09-26p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas.

COTLER, Jordan et al. **Chaos, complexity, and random matrices**. Journal of High Energy Physics, v. 2017, n. 11, p. 48, 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.

DA FRANCA, Rafael Rodrigues. **Climatologia das chuvas em Rondônia–período 1981-2011**. Revista Geografias, p. 44-58, 2015.

DA SILVA, Fabio WO. **A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 1, p. 149-159, 2007.

DE MORAES, Elisabete Caria. **Capítulo 1 fundamentos de sensoriamento remoto**. 2002. IMPE

DE PAULO, Iramaia Jorge Cabral et al. **Introdução à teoria da complexidade**. Cuiabá: Universidade Aberta do Brasil, 2012. v. 1. 73p.

DE PAULO, S. R.; de PAULO, I. J. C.; de DECKER. **Reconstructing the micrometeorological dynamics of the southern Amazonian transitional forest**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 30 p. 2015.

DE SOUZA, Wesley; AGUIAR, Renata Gonçalves. **Educação ambiental em duas escolas localizadas no entorno da Reserva Biológica do Jaru–Amazônia Ocidental**. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 13, n. 1, p. 172-191, 2018.

DEYLE, Ethan R.; SUGIHARA, George. **Generalized theorems for nonlinear state space reconstruction**. Plos one, v. 6, n. 3, p. e18295, 2011.

ECKMANN, J. P. & RUELLE, D. **Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors**. USA, Review of Modern Physics, Vol. 57, n. 3, p. 617-656. 1985.

EHLERS, R.S. **Análise de Séries Temporais**. Curitiba, 2005. 90p. Departamento de Estatística. Universidade Federal do Paraná. Disponível em <http://leg.est.ufpr.br/~ehlers/notas>. Acesso em: 21 março. 2010.

FONTES, Nuno Ricardo Moura. **Sistemas dinâmicos, análise numérica de séries temporais e aplicações às finanças**. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Economia e Gestão.

FRAEDRICH, K.; LESLIE, L. M. **Estimates of cyclone track predictability**. Q. J. R. Meteor. Soc. 155, 79–92. 1989.

GLEICK, J. **Caos: A criação de uma nova ciência**. 3.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1990. 310p.

GOBER, M.; HERZEL, H.; GRAF, H. **Dimension analysis of El Niño/southern oscillation time series**. Ann. Geophys. 10, 729–734. 1992.

GOMES, A. G & VARRIALE, M. C. **modelagem de ecossistemas: uma introdução**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2004. 503p.

GUSMÃO, ANA C.V.L.; DA SILVA, BERNARDO B.; MONTENEGRO, SUZANA M. G.L. ; GALVÍNCIO, JOSICLÊDA D. **Determinação do Salso radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 10, p. 1107 - 1114, 2012.

GUTMAN, Yonatan; QIAO, Yixiao; SZABÓ, Gábor. **The embedding problem in topological dynamics and Takens' theorem**. Nonlinearity, v. 31, n. 2, p. 597, 2018.

GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. **Characterization of Strange Attractors**. The American Physical Society. USA, Vol.50, n. 5, p. 346-349. 1983.

INAMDAR, A. K.; GUILLEVIC, P. C. **Net Surface Shortwave Radiation from GOES Imagery - Product Evaluation Using Ground-Based Measurements from SURFRAD**. Remote Sensing, v. 7, n. 8, 10788 - 10814, 2015.

JONES, H. G. Plants and Microclimate. **A quantitative approach to environmental plant physiology**. 2^a ed. New York: Cambridge University Press, 1992, 413p.

LORENZ, E. **Deterministic nonperiodic flow**. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 20. p. 130-141. 1963.

LORENZ, E. **The essence of chaos**. USA/Seattle: University of Washington Press, 1993. 227p.

MACHADO, Nadja Gomes et al. Sazonalidade do balanço de energia e evapotranspiração em área arbustiva alagável no Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 82-91, 2016.

MATURANA, Humberto R.; GARCIA, Francisco J. Varela. **De máquinas e seres vivos: autopoiese; a organização do vivo**. Artes médicas, 1997.

MELLO, G. J. **Análise de Séries Temporais de Variáveis Micrometeorológicas Medidas em Floresta de Cambarazal no Pantanal Matogrossense Utilizando a Teoria da Complexidade**. Cuiabá, 2010. 90p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental – Instituto de Física. Universidade Federal de Mato Grosso.

MENDES, R. V. **Medidas de Complexidade e Auto-Organização**, Universidade Técnica de Lisboa, pg. 3 – 14, 1998.

MONTEITH, J. L. **Principles of Environmental Physics**. London: 1^a ed. Edward Arnold, 241p. 1973.

MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas Dinâmicos**. 3.ed. São Paulo, editora Livraria da Física, 2011. 670p.

MOREIRA, I. de C. **Sistemas Caóticos em Física – Uma Introdução**. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 15, p. 1-19. 1993.

NICOLIS, G. e PRIGOGINE, I. **Exploring Complexity – An Introduction**. 5^a edição. New York, U.S.A.: W. H. Freeman and Company, 1998. 312p.

NUSSENZVEIG, H. M. **Complexidade e caos**. ed.2. Rio de Janeiro: editora UFRJ, 2003. 276p.

OLIVEIRA, E. L. de. **Análise da dinâmica de um pêndulo elástico com excitação vertical no suporte**. São José do Rio Preto, 2006. 68p. Dissertação (Mestrado) – Matemática Aplicada, Universidade Estadual Paulista.

PALÚ, A. E. R. **Determinação do Tempo de Defasagem Mais Adequado Para Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas Numa Floresta de Transição no Norte de Mato Grosso**. Cuiabá, 2008. 48p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física – Universidade Federal de Mato Grosso.

PINTO, R. M. A. **Análise de Séries Temporais Através de Representações do Espaço de Fases**. Porto (PORTUGAL), 2009. 75p. Dissertação (Mestrado) - Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

PRADO, M. F. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Obtenção de Informações sobre Saldo de Radiação a Partir da Temperatura do Ar em Ecossistemas Naturais**. Cuiabá, 2017. 68p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física – Universidade Federal de Mato Grosso.

PRADO, M. F. **Modelagem Primária da Temperatura do Ar em uma Floresta de Transição Amazônia-Cerrado no Norte do Mato Grosso**. Cuiabá, 2011. 62p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física – Universidade Federal de Mato Grosso.

PRIETO, W. H.; TOMAZ, E.; CREMASCO, M. A. Aplicação da Teoria do Caos em dados de concentração de material particulado inalável na atmosfera. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química-COBEQ**. 2014. p. 8540-8547.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S. **Impacto do Desmatamento de uma Área de Mangue no Albedo Superficial**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 4, p. 401 - 408, 2013.

RAMESH, Nandini; CANE, Mark A. **The predictability of tropical Pacific decadal variability: Insights from attractor reconstruction**. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 76, n. 3, p. 801-819, 2019.

RAZMINIA, Kambiz; RAZMINIA, Abolhassan; SHIRYAEV, Vladimir I. **Application of fractal geometry to describe reservoirs with complex structures**. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, v. 82, p. 105068, 2020.

RUELLE, D. **Change and chaos**. 10. ed. United States of American: Princeton University Press. 1991. 195p.

RUELLE, D., TAKENS, F. **On the nature of turbulence**. Communications in Mathematical Physics, v.20, p.167-192, 1971

RUELLE, D. **Chaotic evolution and strange attractors: the statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 96p.

RUDKE, A. P. et al. **Análise multitemporal da cobertura vegetal na reserva biológica do Jaru e zona de amortecimento, Rondônia.** Anais XVI Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto-SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, INPE, p. 1564-1570, 2013.

SAVI, M. A. **Caos em Sistemas Mecânicos.** Série Arquimedes – Volume 1, p.1-27, 2002. Ed. J.M. Balthazar, M. Boaventura, G.N. Silva, M. Tsuchida. SBMAC – Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, SPYROS N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** New york, USA: John Wiley & Sons, Inc. , 1326 p.1998.

SUGIHARA, George et al. **Detecting causality in complex ecosystems.** Science, v. 338, n. 6106, p. 496-500, 2012.

STEWART, I. **Será que Deus joga dados?: A nova matemática do caos.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991. P. 336. Coleção ciência e cultura.

TAKENS, F. **Detecting strange attractors in turbulence.** In Dynamical systems and turbulence (eds D. A. Rand & L. S. Young). Lecture notes in mathematics, no. 898, pp. 366–381. Berlin, Germany: Springer. 1981.

TSONIS, A.A. **Chaos: from theory to applications.** New York: Plenum Press, 1992, 274 p.

VAN DEN BLEEK, C. M., SCHOUTEN, J. C. **Deterministic chaos: a new tool in fluidized bed design and operation.** Chemical Engineering Journal, v. 53, pp. 75-87, 1993.

VAN DER SCHAAF, J., VAN OMMEN, J.R., TAKENS, J.C., SCHOUTEN, J.C., VAN DEN BLEEK, C.M. **Similarity between chaos analysis and frequency**

analysis of pressure fluctuations in fluidized beds. Chemical Engineering Science, vol. 59, no. 8-9, pp.1829–1840, 2004.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia.** 2ª edição. Brasília: INMET, 2001. 532p.

VILLATE, Jaime E. **Introdução aos sistemas dinâmicos: uma abordagem prática com máxima.** 2011. 09-112p.

VILLATE, Jaime E. Dinâmica e sistemas dinâmicos. 2019. 238-292p.

WOODSIDE, Arch G.; NAGY, Gábor; MEGEHEE, Carol M. **Applying complexity theory: A primer for identifying and modeling firm anomalies.** Journal of Innovation & Knowledge, v. 3, n. 1, p. 9-25, 2018.

YAP, Han Lun et al. **A first analysis of the stability of Takens' embedding.** In: 2014 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2014. p. 404-408.