



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
APLICADAS

**MODELAGEM DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL
PARA O BIOMA CERRADO POR MEIO DE DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO ORBITAL**

Kleber Renato da Paixão Ataíde

TESE DE DOUTORADO

N.º 003

BRASÍLIA
Junho de 2012



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
APLICADAS

**MODELAGEM DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL
PARA O BIOMA CERRADO POR MEIO DE DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO ORBITAL**

Kleber Renato da Paixão Ataíde

Tese de doutorado apresentada junto ao curso de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas – Área de Hidrogeologia e Meio Ambiente, para obtenção do título de Doutor em Geociências Aplicadas.

Orientador:

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

BRASÍLIA
Junho de 2012



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
APLICADAS

**MODELAGEM DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL
PARA O BIOMA CERRADO POR MEIO DE DADOS DE SENSORIAMENTO
REMOTO ORBITAL**

Kleber Renato da Paixão Ataíde

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Prof. Dr. Edson Eyji Sano

Ataíde, Kleber Renato da Paixão

Modelagem de Determinação da Evapotranspiração Real para o Bioma Cerrado por meio de Dados de Sensoriamento Remoto Orbital.

Kleber Renato da Paixão Ataíde:

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista. – Brasília, 2012.

Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Geociências Aplicadas – Hidrogeologia e Meio Ambiente.

1. Índices de vegetação, 2. Evapotranspiração, 3. Balanço de energia,
4. Sensoriamento remoto.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Luiz e Maria, à minha esposa e ao meu filho, Alessandra e Kauã e aos meus irmãos Kleyver e Walber.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por essa experiência vivida.

A realização deste trabalho é o resultado do esforço pessoal, mas sem sombra de dúvidas, só foi possível percorrer esta jornada graças à participação de inúmeras pessoas que direta ou indiretamente influenciaram na escolha do caminho a ser trilhado e no sucesso deste trabalho, aos quais externo aqui todo o meu sincero agradecimento.

Aos meus pais, Luiz e Maria e aos meus irmãos Kleyver e Walber, pelos ensinamentos, ajuda e incentivo dados ao longo da minha vida.

À minha esposa Alessandra e ao meu filho Kauã pelo apoio e compreensão, por me alegrarem e manterem acordado para estudar.

Aos amigos da Seção de Produtos e Imagens de Satélites, Alaor, Gal, Ivanete e Wagner pela ajuda, incentivo e compreensão pelos dias que precisei me ausentar para a jornada acadêmica.

Aos amigos José Mauro, Fabrício, Wallace, Sidney, Alan, André, Fábio Conde, Andrea Ramos, Mozar e Danielle pela ajuda, pela companhia, sugestões e conselhos dados para melhoria deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Gustavo Baptista e ao Prof. Antônio Nuno pelos ensinamentos e direção dada ao trabalho.

Aos colegas de turma do Instituto de Geociências que foram companheiros durante essa trajetória, Paulo Henrique, Tatiana, Pedro, Mona Lisa, Marcia, Marisa, Rodrigo e tantos outros cuja colaboração foi imprescindível.

A todas as instituições públicas de ensino, pelas quais passei e adquiri a base do conhecimento.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia e ao LP DAAC pela cessão dos dados meteorológicos horários e dos produtos do sensor MODIS utilizados nesse estudo, bem como ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pelo suporte tecnológico para o seu desenvolvimento.

“Para o desenvolvimento da ciência, deve-se adotar uma postura mais liberal em termos do posicionamento frente às novas ideias.”

Feyerabend, 1977

Modelagem de Determinação da Evapotranspiração Real para o Bioma Cerrado por meio de Dados de Sensoriamento Remoto Orbital

RESUMO

Este estudo avalia correlações entre a evapotranspiração real (ETR) e informações obtidas por sensoriamento remoto, como índice de vegetação realçado (EVI), índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), radiação solar global (RG) e temperatura da superfície (LST) para o bioma do Cerrado brasileiro, foram gerados modelos empíricos por meio de regressão não linear multivariada, baseados em observações efetuadas em 32 estações meteorológicas automáticas em dias de céu claro durante os períodos úmido e seco nos anos de 2007 a 2010. Foram utilizadas imagens do sensor MODIS/Aqua obtidas próximo às 14h local para obtenção dos índices de vegetação como indicadores das variações sazonais da atividade fotossintética dos diferentes tipos fisionômicos circundantes de cada estação meteorológica automática de superfície (EMAS) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) assim como o comportamento da LST e RG como indicadores de energia disponível para o processo de evapotranspiração. Os resultados mostram que existe uma correlação positiva da ETR com EVI, NDVI e RG e uma correlação negativa com a temperatura da superfície, em condições normais, quando a disponibilidade hídrica acompanha a variabilidade sazonal. O Modelo Não Linear que contém como parâmetros RG e EVI apresentou o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8694, já o Modelo Não Linear que contém como parâmetros RG e NDVI apresentou R^2 igual a 0,8680 os quais foram calibrados para estimativa de valores de ETR acima de 0,05 mm. Por fim, as análises propiciaram a geração da ETR diária (mm/dia).

ABSTRACT

This study evaluates the correlations between real evapotranspiration (ETR) and information obtained by remote sensing, such as Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Solar Radiation (Rs) and Land Surface Temperature (LST) for the Cerrado biome in Brazil, empirical models were generated by nonlinear regression multivariate analysis based on observations made on 32 automatic weather stations on a clear day during the wet and dry periods in the years 2007 to 2010. Images from MODIS / Aqua obtained close to 14h local to obtain the vegetation index as indicators of seasonal variations in photosynthetic activity of different physiognomic types around each automatic weather station surface (EMAS) of the National Institute of Meteorology (INMET) well as the behavior of (LST) and (Rs) as indicators of energy available for evapotranspiration. The results show a positive correlation of ETR with EVI, NDVI and Rs and a negative correlation with the LST, under normal conditions, where the water there is not always available. The nonlinear model that contains as parameters Rs and EVI shows the coefficient of determination (R^2) equal to 0.8694, whereas the nonlinear model that contains as parameters Rs and NDVI shows R^2 equal to 0.8680 which was calibrated to estimate the ETR above 0.05 mm. Finally, the analysis enabled the generation of ETR daily (mm / day).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1: REFLECTÂNCIA DO DOSSEL DA VEGETAÇÃO EM VÁRIOS COMPRIMENTOS DE ONDA DO PONTO VERDE AO SENESCENTE.....	26
FIGURA 2-2: ESQUEMA DE ORGANIZAÇÃO DAS IMAGENS MODIS PARA DOWNLOAD (TILES).....	34
FIGURA 2-3: BUFFER COM RAIO DE 0,5 KM NA ESTAÇÃO A001 SOBREPOSTO A UMA IMAGEM COM RESOLUÇÃO ESPACIAL DE APROXIMAÇÃO 1 KM.....	40
FIGURA 2-4: EXEMPLO IDEALIZADO PARA O GRÁFICO DE RESÍDUOS VERSUS VALORES AJUSTADOS.....	54
FIGURA 2-5: EXEMPLO DE UM PADRÃO NA SEQUÊNCIA DE RESÍDUOS QUE SUGERE CORRELAÇÃO DOS ERROS, NÃO DESEJÁVEL.....	55
FIGURA 2-6: GRÁFICO DE NORMALIDADE DE RESÍDUOS.....	55
FIGURA 3-1: FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.....	68
FIGURA 3-2: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NO BIOMA CERRADO.....	73
FIGURA 3-3: CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE DE INSTALAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.....	76
FIGURA 3-4: EXEMPLO DOS SÍTIOS DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DESCRITAS NA TABELA 3-3.....	78
FIGURA 3-5: GRÁFICO DE UMIDADE RELATIVA E PRECIPITAÇÃO PARA BRASÍLIA NO PERÍODO DE 30 ANOS. FONTE: INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2012).....	80
FIGURA 3-6: TEMPERATURA MÉDIA COMPENSADA (°C) E PRECIPITAÇÃO ANUAL NA ÁREA DE ESTUDO, FONTE: INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2012).....	80
FIGURA 3-7: TEMPERATURA MÍNIMA (°C) E TEMPERATURA MÁXIMA (°C).....	81
FIGURA 3-8: GRÁFICO DE EVAPORAÇÃO PARA BRASÍLIA NO PERÍODO DE 30 ANOS.....	81
FIGURA 3-9: CARACTERÍSTICAS DO EDAFOCLIMÁTICAS DO AMBIENTE DE INSTALAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS, (IBGE-MAPAS, 2010) E INMET.....	82
FIGURA 3-10: RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE OBSERVADA VERSUS ESTIMADA (MJ.M ⁻²).....	84
FIGURA 3-11: ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA – EMAS, SENSORES, MASTRO COM CAIXA DATA-LOGGER, PAINEL SOLAR, CERCADO.....	91
FIGURA 3-12: DETALHE DE UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DE SUPERFÍCIE (EMAS), MOSTRANDO À ESQUERDA O PLUVIÔMETRO, AO CENTRO A ANTENA DE COMUNICAÇÃO VIA SATÉLITE E À DIREITA O “DATALOGGER” COM SENSOR DE TEMPERATURA, FIXADOS AO MASTRO.....	92
FIGURA 3-13: PERFIL HORÁRIO DA TAR (°C) E DA RG (MJ/M ²).....	95
FIGURA 3-14: BALANÇO HÍDRICO NORMAL PARA AS ESTAÇÕES A001, A045, A545, A505, A553 E A730.....	95
FIGURA 3-15: PERFIL HORÁRIO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (MM) DAS EMAS: A001, A008, A019, A032, A034, A045, A519 E A536.....	96
FIGURA 4-1: DISPERSÃO ENTRE (ETR) E VARIÁVEIS EXPLICATIVAS: LST, NDVI* E EVI* E RG.....	108
FIGURA 4-2: HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES DE EVI*.....	109
FIGURA 4-3: HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE PELO MODIS/AQUA.....	109
FIGURA 4-4: HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.....	110
FIGURA 4-5: HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL – THORNTHWAITE E MATHER, 1955.....	111
FIGURA 4-6: GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS VARIÁVEIS EVI*, LST, RG E ETR.....	112
FIGURA 4-7: DENDOGRAMA LIGAÇÃO COMPLETA COM DISTÂNCIA EUCLIDIANA.....	117
FIGURA 4-8: DENDOGRAMA DE LIGAÇÃO MÉDIA COM DISTÂNCIA EUCLIDIANA.....	117
FIGURA 4-9: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.....	119
FIGURA 4-10: CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DE CADA ESTAÇÃO POR GRUPO.....	119
FIGURA 4-11: ANÁLISE DOS RESÍDUOS VERSUS QUANTIS DA NORMAL DO MODELO NÃO LINEAR 1.....	124
FIGURA 4-12: ANÁLISE DOS RESÍDUOS, PREDITO VERSUS RESÍDUO DO MODELO NÃO LINEAR 1.....	125

FIGURA 4-13: GRÁFICO DE DISPERSÃO DOS VALORES OBSERVADOS VERSUS VALORES PREDITOS DO MODELO NÃO LINEAR 1 – TODOS VALORES DE ETR E TODO PERÍODO.....	125
FIGURA 4-14: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 1 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODA AMOSTRA.	126
FIGURA 4-15: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 1 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODA AMOSTRA, $ETR \leq 0,05\text{MM}$	126
FIGURA 4-16: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 1 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODA AMOSTRA, $ETR > 0,05\text{MM}$	127
FIGURA 4-17: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 1 VERSUS <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001 EM TODO PERÍODO, $ETR > 0,05\text{MM}$	127
FIGURA 4-18: ANÁLISE DOS RESÍDUOS VERSUS QUANTIS DA NORMAL DO MODELO NÃO LINEAR 2.	129
FIGURA 4-19: ANÁLISE DOS RESÍDUOS, PREDITO VERSUS RESÍDUO DO MODELO NÃO LINEAR 2.	129
FIGURA 4-20: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 2 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODAS ESTAÇÕES E TODO PERÍODO, $ETR > 0,05\text{MM}$	131
FIGURA 4-21: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 2 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001 EM TODO PERÍODO, $ETR > 0,05\text{MM}$	131
FIGURA 4-22: ANÁLISE DOS RESÍDUOS VERSUS QUANTIS DA NORMAL DO MODELO NÃO LINEAR 3.	133
FIGURA 4-23: ANÁLISE DOS RESÍDUOS, PREDITO VERSUS RESÍDUO DO MODELO NÃO LINEAR 3.	133
FIGURA 4-24: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 3 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODAS ESTAÇÕES E TODO PERÍODO.	134
FIGURA 4-25: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 3 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001, $ETR = \text{TODOS VALORES}$	134
FIGURA 4-26: ANÁLISE DOS RESÍDUOS VERSUS QUANTIS DA NORMAL DO MODELO NÃO LINEAR 5.	137
FIGURA 4-27: ANÁLISE DOS RESÍDUOS, PREDITO VERSUS RESÍDUO DO MODELO NÃO LINEAR 5.	137
FIGURA 4-28: GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE OS VALORES MODELADOS E OBSERVADOS DA <i>ETR</i>	137
FIGURA 4-29: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 4 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODAS ESTAÇÕES E TODO PERÍODO.	138
FIGURA 4-30: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 4 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001, $ETR > 0,05\text{MM}$	138
FIGURA 4-31: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 5 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODAS ESTAÇÕES E TODO PERÍODO.	139
FIGURA 4-32: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 5 VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001, $ETR > 0,05\text{MM}$	139
FIGURA 4-33: COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA EM RELAÇÃO À VEGETAÇÃO DA SUPERFÍCIE.	141
FIGURA 4-34: HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES DE <i>NDVI*</i>	142
FIGURA 4-35: GRÁFICO DE DISPERSÃO DAS VARIÁVEIS <i>NDVI*</i> , <i>LST</i> , <i>RG</i> E <i>ETR</i>	142
FIGURA 4-36: ANÁLISE DOS RESÍDUOS VERSUS QUANTIS DA NORMAL DO MODELO NÃO LINEAR 6.	148
FIGURA 4-37: ANÁLISE DOS RESÍDUOS, PREDITO VERSUS RESÍDUO DO MODELO NÃO LINEAR 6.	149
FIGURA 4-38: GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE OS VALORES MODELADOS E OBSERVADOS DA <i>ETR</i>	149
FIGURA 4-39: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 6 <i>NDVI*</i> VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA TODAS ESTAÇÕES E TODO PERÍODO.	150
FIGURA 4-40: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 6 <i>NDVI*</i> VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001, $ETR \text{ TODOS VALORES}$	150
FIGURA 4-41: ANÁLISE DOS RESÍDUOS VERSUS QUANTIS DA NORMAL DO MODELO NÃO LINEAR 7.	152
FIGURA 4-42: ANÁLISE DOS RESÍDUOS, PREDITO VERSUS RESÍDUO DO MODELO NÃO LINEAR 7.	152
FIGURA 4-43: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 7 <i>NDVI*</i> VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA PARA TODAS ESTAÇÕES E PERÍODO, $ETR > 0,05\text{MM}$	153
FIGURA 4-44: <i>ETR</i> INSTANTÂNEA ESTIMADA PELO MODELO NÃO LINEAR 7 <i>NDVI*</i> VERSUS A <i>ETR</i> INSTANTÂNEA OBSERVADA PARA ESTAÇÃO A001, $ETR > 0,05\text{MM}$	153
FIGURA 4-45: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE <i>ETR</i> , ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE BRASÍLIA-DF (2007-2010) PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.....	155

FIGURA 4-46: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DA FACULDADE DA TERRA – DF, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.....	155
FIGURA 4-47: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE ÁGUA EMENDADAS - DF, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.....	155
FIGURA 4-48: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE PALMAS – TO, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.....	156
FIGURA 4-49: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE PARANÁ – TO, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.	156
FIGURA 4-50: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE CAIAPÔNIA – GO, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.	156
FIGURA 4-51: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE CAMPINA VERDE – MG, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.....	157
FIGURA 4-52: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DIÁRIOS DE ETR, ET_p E ET_o PARA ESTAÇÃO DE CONCEIÇÃO DAS ALAGOAS - MG, PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7.	157
FIGURA 4-53: ETR DIÁRIA PELOS MODELOS NÃO LINEARES 5 E 7 NO PERÍODO CHUVOSO PARA A REGIÃO COM POUCA VEGETAÇÃO (A) E COM MUITA VEGETAÇÃO (B); E NO PERÍODO SECO COM POUCA VEGETAÇÃO (C) E COM MUITA VEGETAÇÃO (D).....	158
FIGURA 4-54: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA EM ÁREA POUCO VEGETADA E MUITO VEGETADA PRÓXIMO À ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DE BRASÍLIA NOS PERÍODOS CHUVOSO E SECO.	159
FIGURA 4-55: VALORES PREDOMINANTES DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ABAIXO E ACIMA DE 0,05 MM.	160
FIGURA 4-56: ETR DECENDIAL (THONTHWAITE E MATHER, 1955) NO PERÍODO CHUVOSO.	161
FIGURA 4-57: ETR DECENDIAL (THONTHWAITE E MATHER, 1955) NO PERÍODO SECO.	161
FIGURA 4-58: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA ESTIMADA NO PERÍODO CHUVOSO (DOA=059).	162
FIGURA 4-59: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIA ESTIMADA NO PERÍODO SECO (DOA=183).	163
FIGURA 4-60: EXEMPLO DE INTERFACE PARA CONSULTA DE ETR DIÁRIA ESTIMADA PELOS MODELOS NÃO LINEARES 4 E 5.	164

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1: CARACTERÍSTICAS DO SENSOR MODIS.	31
TABELA 3-1: ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS DE SUPERFÍCIE.....	70
TABELA 3-2:DADOS DISPONÍVEIS POR ESTAÇÃO ANUALMENTE.....	71
TABELA 3-3: CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE DE INSTALAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.....	77

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2-1: PRODUTOS MODIS DISPONÍVEIS.....	32
QUADRO 3-1: CARACTERÍSTICAS DAS INFORMAÇÕES DO PRODUTO MYD09GA.	99
QUADRO 3-2: CARACTERÍSTICAS DAS INFORMAÇÕES DO PRODUTO AQUA/MODIS V004 & V041 MYD11A1 (1 KM).	102
QUADRO 3-3: TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DE SUPERFÍCIE.....	104
QUADRO 4-1: ANÁLISE DESCRITIVA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO REALÇADO (EVI^*).	108
QUADRO 4-2: ANÁLISE DESCRITIVA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (LST).	109
QUADRO 4-3: ANÁLISE DESCRITIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL (RG).	110
QUADRO 4-4: ANÁLISE DESCRITIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (ETR).	110
QUADRO 4-5: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	112
QUADRO 4-6: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	113

QUADRO 4-7: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	113
QUADRO 4-8: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	114
QUADRO 4-9: AGRUPAMENTO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.....	118
QUADRO 4-10: DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE CADA ESTAÇÃO DO GRUPO 1.....	120
QUADRO 4-11: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA O GRUPO 1.....	121
QUADRO 4-12: DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE CADA ESTAÇÃO DO GRUPO 2.....	121
QUADRO 4-13: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA O GRUPO 2.....	122
QUADRO 4-14: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 1.....	123
QUADRO 4-15: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR 1.....	123
QUADRO 4-16: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 2.....	128
QUADRO 4-17: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR 2.....	128
QUADRO 4-18: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 3.....	132
QUADRO 4-19: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR 3.....	132
QUADRO 4-20: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 4.....	135
QUADRO 4-21: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR 4.....	135
QUADRO 4-22: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 5.....	136
QUADRO 4-23: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR5.....	136
QUADRO 4-24: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	140
QUADRO 4-25: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	140
QUADRO 4-26: ANÁLISE DESCRITIVA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI*).....	141
QUADRO 4-27: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	143
QUADRO 4-28: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON, ETR ≤ 0,05 MM.....	144
QUADRO 4-29: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ETR>0,05 MM.....	146
QUADRO 4-30: COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	147
QUADRO 4-31: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 6.....	147
QUADRO 4-32: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR 6.....	148
QUADRO 4-33: COEFICIENTES DO MODELO NÃO LINEAR 7.....	151
QUADRO 4-34: ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA DO MODELO NÃO LINEAR 7.....	151
QUADRO 4-35: ANÁLISE DESCRITIVA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO PARA ETR ABAIXO E ACIMA DE 0,05 MM.	160

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 2-1.....	13
EQUAÇÃO 2-2.....	15
EQUAÇÃO 2-3.....	16
EQUAÇÃO 2-4.....	17
EQUAÇÃO 2-5.....	17
EQUAÇÃO 2-6.....	17
EQUAÇÃO 2-7.....	18
EQUAÇÃO 2-8.....	18
EQUAÇÃO 2-9.....	18
EQUAÇÃO 2-10.....	18
EQUAÇÃO 2-11.....	20
EQUAÇÃO 2-12.....	20
EQUAÇÃO 2-13.....	42
EQUAÇÃO 2-14.....	43
EQUAÇÃO 2-15.....	44
EQUAÇÃO 2-16.....	44
EQUAÇÃO 2-17.....	44

EQUAÇÃO 2-18.....	45
EQUAÇÃO 2-19.....	46
EQUAÇÃO 2-20.....	46
EQUAÇÃO 2-21.....	46
EQUAÇÃO 2-22.....	46
EQUAÇÃO 2-23.....	47
EQUAÇÃO 2-24.....	47
EQUAÇÃO 2-25.....	48
EQUAÇÃO 2-26.....	49
EQUAÇÃO 2-27.....	50
EQUAÇÃO 2-28.....	50
EQUAÇÃO 2-29.....	50
EQUAÇÃO 2-30.....	50
EQUAÇÃO 2-31.....	50
EQUAÇÃO 2-32.....	51
EQUAÇÃO 2-33.....	51
EQUAÇÃO 2-34.....	51
EQUAÇÃO 2-35.....	51
EQUAÇÃO 2-36.....	59
EQUAÇÃO 2-37.....	63
EQUAÇÃO 2-38.....	64
EQUAÇÃO 2-39.....	67
EQUAÇÃO 3-1.....	85
EQUAÇÃO 3-2.....	85
EQUAÇÃO 3-3.....	86
EQUAÇÃO 3-4.....	86
EQUAÇÃO 3-5.....	86
EQUAÇÃO 3-6.....	86
EQUAÇÃO 3-7.....	87
EQUAÇÃO 3-8.....	87
EQUAÇÃO 3-9.....	88
EQUAÇÃO 3-10.....	88
EQUAÇÃO 3-11.....	89
EQUAÇÃO 3-12.....	89
EQUAÇÃO 3-13.....	89
EQUAÇÃO 3-14.....	90
EQUAÇÃO 3-15.....	100
EQUAÇÃO 3-16.....	100
EQUAÇÃO 3-17.....	101
EQUAÇÃO 3-18.....	101
EQUAÇÃO 4-1.....	122
EQUAÇÃO 4-2.....	123
EQUAÇÃO 4-3.....	128
EQUAÇÃO 4-4.....	128
EQUAÇÃO 4-5.....	132
EQUAÇÃO 4-6.....	135
EQUAÇÃO 4-7.....	135
EQUAÇÃO 4-8.....	147
EQUAÇÃO 4-9.....	151

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipótese	4
1.2 Objetivo Geral	4
1.3 Objetivos específicos	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Evapotranspiração (ET)	5
2.1.1 Evapotranspiração potencial (ET_p) ou de referência (ET_o)	7
2.1.2 Evapotranspiração de cultura (ET_c)	7
2.1.3 Evapotranspiração real (ETR)	8
2.2 Fatores que afetam a evapotranspiração	9
2.2.1 Fatores climáticos	10
2.2.2 Fatores da vegetação	10
2.2.3 Umidade do solo	11
2.2.4 Fatores de manejo da cultura e do solo	12
2.3 Medidas de evapotranspiração	12
2.3.1 Lisímetros	13
2.3.1.1 Lisímetro de drenagem	13
2.3.1.2 Lisímetros de sub-irrigação	14
2.3.1.3 Lisímetros de pesagem	14
2.3.2 Balanço de água no solo	14
2.4 Estimativa da evapotranspiração potencial ou de referência	15
2.5 Método de Thornthwaite (1948)	17
2.6 Método de Thornthwaite e Mather, 1955	19
2.7 Balanço hídrico	20
2.8 Anatomia foliar e estresse hídrico	21
2.9 Interação entre vegetação e radiação eletromagnética (REM)	25
2.9.1 Espectro do visível	26
2.9.2 Espectro do infravermelho próximo	27
2.9.3 Espectro do infravermelho médio	27
2.10 Interação entre solo e radiação eletromagnética	28
2.11 Características do satélite Aqua	30
2.11.1 Características do sensor MODIS	30
2.12 Características do Banco de Dados PostgreSQL / PostGIS Raster	35
2.12.1 Dados no SGBD PostgreSQL / PostGIS Raster	38
2.12.2 Vetor e imagem de satélite no SGBD PostgreSQL / PostGIS Raster	39

2.13	Análise estatística dos dados	41
2.13.1	Modelos Lineares Generalizados.....	41
2.13.2	Modelos de regressão linear simples e múltipla.....	41
2.13.3	Estimação em regressão Linear simples e múltipla.....	43
2.13.3.1	Análise de variância e coeficiente de determinação.....	44
2.13.3.2	Estimativa pontual e Intervalo de confiança para $E(Y)$	49
2.13.3.3	Intervalo de predição para uma nova observação	50
2.13.3.4	Diagnóstico	52
2.13.3.5	Medidas corretivas e transformações de variáveis	57
2.13.4	Validação em regressão linear simples e múltipla	59
2.13.5	Roteiro para Regressão Linear Simples e Múltipla.....	60
2.13.5.1	Regressão linear simples	60
2.13.5.2	Regressão Múltipla.....	62
2.14	Método não linear de Newton-Raphson	66
2.15	Método de Convergência por máxima verossimilhança.....	67
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	68
3.1	Fluxograma metodológico	68
3.2	Área de estudo.....	72
3.3	Caracterização do local	73
3.3.1	Tipos de solos	73
3.3.2	Tipo de vegetação	74
3.3.3	Relevo	75
3.3.4	Climatologia da região	78
3.4	Dados meteorológicos e imagens de satélite	83
3.4.1	Estimativa da radiação solar global em superfície (RG)	84
3.4.1.1	Ângulo zenital solar (Z).....	85
3.4.1.2	Declinação solar (δ)	86
3.4.1.3	Ângulo horário do nascer ou pôr do Sol	87
3.4.1.4	Fotoperíodo	87
3.4.1.5	Cálculo do Inverso do quadrado da Distância relativa Terra-Sol (d_r).....	88
3.4.1.6	Transmissividade atmosférica em dias de céu claro	90
3.5	Localização das estações meteorológicas automáticas de superfície ($EMAS$)	91
3.5.1	Características das estações meteorológicas automáticas de superfície ($EMAS$)	92
3.6	Aplicação do Método de Thornthwaite e Mather, 1955.....	93

3.7	Produtos e Imagens de satélite	97
3.7.1	Cálculo dos índices de vegetação (EVI e NDVI) a partir do produto MYD09GA versão 5	97
3.7.1.1	Índice de vegetação realçado (Enhanced Vegetation Index - EVI) ..	99
3.7.1.2	Índice de vegetação por diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI)	100
3.7.2	Temperatura da superfície (LST) com MYD11A1 versão 041	101
3.7.3	Tipo de cobertura do solo a partir do produto MCD12C1 versão 5.....	103
3.8	Passos para elaboração dos modelos de estimativa da evapotranspiração real instantânea e diária	104
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
4.1	Análise descritiva.....	107
4.2	Análise das correlações	111
4.3	Validação do modelo.....	113
4.4	Testes de modelos lineares com EVI*	114
4.4.1	Agrupamento dos dados	114
4.4.1.1	Método de ligação completa	116
4.4.1.2	Método da média das distâncias.....	117
4.5	Testes de modelos não lineares	122
4.5.1	Modelo não linear 1	122
4.5.2	Modelo não linear 2.....	128
4.5.3	Modelo não linear 3.....	132
4.5.4	Modelo não linear 4.....	135
4.5.5	Modelo não linear 5.....	135
4.6	Substituição de <i>EVI*</i> por <i>NDVI*</i>	140
4.6.1	Testes de modelos lineares com <i>NDVI*</i>	147
4.6.2	Modelo não linear 6.....	147
4.6.3	Modelo não linear 7.....	151
4.7	Estimativa da evapotranspiração diária	154
5	CONCLUSÕES.....	165
	REFERÊNCIAS	167

1. INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais precioso para a vida, da qual a sua gestão adequada é um grande desafio. Logo, o entendimento dos sistemas naturais e das leis físicas que regem cada componente do ciclo hidrológico é muito importante para a gestão dos recursos hídricos.

O uso da água pelas plantas se faz necessário para que estas por meio do processo metabólico, principalmente no processo de transpiração, reflitam em produção e que este processo envolve grandes quantidades de água, que deverão ser aportadas pelas chuvas ou pela irrigação.

Para a agricultura irrigada conhecida como consumidora de cerca de 70% da água potável no mundo, o manejo inadequado tem levado ao consumo demasiado desse recurso natural. No Brasil, a distribuição percentual do volume consumido entre os setores da sociedade são: agricultura irrigada em aproximadamente 46%, consumo urbano de 27% e 18% para a indústria segundo informações da Agência Nacional de Águas (ANA, 2007).

A elevada exigência de água é intrínseca da planta, que ao sofrer estresse hídrico tem o seu crescimento e produção afetados. O conhecimento disso é fundamental para se entender por que a agricultura irrigada, mesmo a mais racional e eficiente, é a grande demandadora de água, dentre os diferentes setores da sociedade PIRES *et al.* (2008).

Para que seja possível conciliar maior produção agrícola e economia dos recursos hídricos, é necessário que se tenha conhecimento da quantidade de água demandada pela planta para que haja um crescimento e produção satisfatórios consumindo o mínimo possível de água.

O conhecimento da evapotranspiração (*ET*) é útil para avaliação de seca agrícola e está intimamente ligada aos estudos de ecossistemas e produtividade agrícola, sendo, portanto, uma informação útil para o planejamento de irrigação e estudos hidrológicos de bacias hidrográficas.

A evapotranspiração compreende a perda conjunta da água para atmosfera pelos processos de transpiração e evaporação, sendo uma componente importante do ciclo hidrológico e essencial para o entendimento dos processos físicos que ocorrem na superfície (GAO *et al.*, 2005).

Experimentalmente, o cálculo da evapotranspiração pode ser feito com bastante precisão usando lisímetros de pesagem, técnicas de correlação de vórtices turbulentos e técnica da razão de Bowen (ALLEN *et al.*, 2002), além de outros métodos que utilizam diversos dados coletados localmente, como evapotranspiração potencial, umidade de solo, temperatura do ar entre outras variáveis.

No entanto, estes métodos são limitados porque fornecem valores pontuais de evapotranspiração para um local específico e não fornecem a *ET* em escala regional. Essa limitação tem motivado o desenvolvimento de estudos que usam dados de satélite para estimar a evapotranspiração sobre uma grande área (BASTIAANSSEN, 2000; NAGLER *et al.*, 2005; ALLEN, *et al.*, 2002). Porém nessas técnicas muitas vezes ainda se utilizam dados observados em superfície para calibração pontual das estimativas.

Oliveira e Baptista (2011) testaram o modelo proposto por Nagler *et al.* (2005) para os contextos climáticos do semiárido e do semiúmido brasileiro e chegaram a conclusão que havia alta correlação entre *ET* calculada pelo método de Thornthwaite (1948) com a obtida por sensoriamento remoto nos ambientes de Caatinga, mas para o Cerrado a correlação era muito baixa. Isso era de se esperar, pois o modelo de Nagler *et al.* (2005) foi desenvolvido de forma empírica para o ambiente desértico do Novo México e quando muda o balanço hídrico, mesmo em ambiente com sazonalidade bem marcada, o modelo não responde à expectativa (OLIVEIRA e BAPTISTA, 2011).

Diante do exposto, observa-se a necessidade de desenvolvimento de métodos que estimem a evapotranspiração para grandes áreas dentro do contexto climático do Cerrado e que preferencialmente não sejam dependentes de tantas informações coletadas pontualmente em superfície. Logo, o uso do sensoriamento remoto por imagens de satélites torna-se um recurso ideal para essa finalidade.

Os modelos de regressão vêm tendo aplicabilidade e desenvolvimento crescentes nas últimas décadas, tanto em função do avanço teórico científico, quanto em razão do rápido aumento da capacidade de processamento computacional, que permite o uso de complexos algoritmos numéricos que viabilizam muitas das estimativas necessárias a essa classe de modelos (CHARNET *et al.*, 1999).

Associado a isso, em anos mais recentes, o baixo custo do armazenamento de dados vem contribuindo para a construção de repositórios cada vez maiores, o que permite cruzar informações de diferentes fontes, procurando identificar padrões e associações relevantes e que, em última análise, transformam informação bruta em conhecimento aplicável ao processo decisório e gerencial das organizações.

Nesse contexto, os modelos de regressão tornam-se bastante interessantes pelos potenciais resultados em termos de estimação/previsão e também por se constituírem intrinsecamente em métodos de escopo interpretável por parte da análise de dados.

Visando simplificar a quantidade de parâmetros usados para a estimativa da evapotranspiração real, o presente estudo foi elaborado com a finalidade de utilizar parâmetros como, posição geográfica, elevação do terreno, hora do imageamento e época do ano para se estimar a radiação solar global em superfície (*RG*), a qual pode ser estimada independentemente de observações em superfície para dias de céu claro.

Utilizando imagens de satélite para obter índices de vegetação (*EVI* e *NDVI*) e temperatura da superfície (*LST*) e a partir desses parâmetros obterem modelos empíricos não lineares baseados nas condições normais do clima em cada estação para estimativa de evapotranspiração real (*ETR*) da superfície para o bioma do Cerrado brasileiro.

1.1 Hipótese

É possível estimar a Evapotranspiração para áreas heterogêneas em condições edafoclimáticas do Cerrado a partir de dados orbitais.

1.2 Objetivo Geral

Estimar a evapotranspiração real da superfície para áreas com características heterogêneas em condições climatológicas normais a partir de informações obtidas de imagens de satélite para dias de céu claro no bioma Cerrado partindo de uma observação instantânea para uma estimativa diária.

1.3 Objetivos específicos

- a. Verificar as relações existentes entre evapotranspiração real (*ETR*) estimada pelo método de Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955) com o Índice de Vegetação Realçado (*EVI*), temperatura de superfície (*LST*), radiação solar global (*RG*) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*NDVI*);
- b. Propor uma solução estatística que modele a evapotranspiração real em função das variáveis obtidas por sensoriamento remoto que tenham maior correlação com a variável dependente (*ETR*), utilizando análise de regressão multivariada a partir de dados experimentais;
- c. Extrapolar os valores de evapotranspiração observados no momento da passagem do satélite para obter a evapotranspiração total diária em mm/dia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentados alguns conceitos sobre evapotranspiração, fatores que afetam a evapotranspiração, fisiologia vegetal, características dos solos, metodologia dos cálculos do balanço hídrico, características do banco de dados PostGIS Raster/PostgreSQL, características do sensor MODIS e dos produtos gerados com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Realçado (EVI), Radiação Solar Global (RG) e Temperatura da Superfície (LST) e a análise estatística.

2.1 Evapotranspiração (ET)

A evapotranspiração (ET) é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor, tendo papel importante no ciclo hidrológico em termos globais. Esse processo envolve a evaporação da água de superfícies livres (rios, lagos, represas, oceano etc.), dos solos e da vegetação úmida (que foi interceptada durante uma chuva) e a transpiração dos vegetais (IFSC LCE BIOLOGIA, 2001).

A evapotranspiração é uma componente importante do ciclo hidrológico e é essencial para o entendimento dos processos físicos da superfície terrestre em climatologia (ALLEN, 1986).

Evaporação é o processo físico em que um líquido passa para o estado gasoso. O vapor de água presente na atmosfera é oriundo de lagos, rios, oceanos, do solo, vegetação, evaporação do orvalho e da chuva interceptada pela superfície.

Transpiração é a perda de água que ocorre nas plantas e animais por ocorrer em meio biológico, a evaporação nesse caso é denominada transpiração. Nos vegetais, a transpiração ocorre predominantemente nas folhas. Nas folhas, a transpiração ocorre a partir das paredes celulares em direção aos espaços intercelulares. Então, por difusão, o vapor d'água se transfere para atmosfera através dos estômatos. Os estômatos atuam como reguladores da taxa de transpiração. Na maioria dos vegetais, permanecem

abertos durante o dia e fechados durante a noite. Ficam também fechados em situações de elevado estresse hídricos (VIEIRA, 2009).

O estresse hídrico pode ocorrer em duas situações:

1- Quando o solo não contém água disponível às plantas;

2- Quando os solos contêm água disponível, mas a planta não é capaz de absorvê-la em velocidade e quantidade suficiente para suprir a demanda atmosférica.

A situação de elevada demanda é quando se tem uma baixa umidade relativa do ar atmosférico ou um elevado déficit psicrométrico.

O percurso que a água faz desde o solo até a atmosfera através da planta, mantendo a transpiração dos vegetais, ocorre pelo princípio físico das diferenças de potencial hídrico (Ψ_w) do solo à atmosfera. Quanto mais seco estiver o ar (potencial hídrico altamente negativo) maior será a demanda do ar em reter o vapor d'água, com tendência do aumento da taxa de transpiração.

A água, como qualquer corpo na natureza, tende para o seu estado de menor energia. Pode-se afirmar que a água sempre se movera espontaneamente de pontos de maior Ψ_w para pontos de menor Ψ_w . Em uma área cultivada com alguma espécie vegetal ocorrem simultaneamente os processos de evaporação (água do solo, orvalho, água depositada pelas chuvas) e a transpiração das plantas (VIEIRA, 2009).

O termo evapotranspiração associa esses dois processos. A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pela disponibilidade de água no solo às plantas.

Em uma escala intermediária, a *ET* assume papel fundamental no balanço hídrico de microbacias hidrográficas, juntamente com a precipitação (VIANELLO e ALVES, 1991).

Em uma escala local, a *ET* da cultura se restringe aos processos de evaporação da água do solo e da vegetação úmida e da transpiração das plantas. O balanço entre a água que entra na cultura pela chuva e a que sai por *ET*, irá resultar na variação do armazenamento de água no solo, que por sua vez condicionará o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento da cultura (VIANELLO e ALVES, 1991).

2.1.1 Evapotranspiração potencial (ET_p) ou de referência (ET_o)

Numa extensa superfície natural, totalmente coberta por vegetação baixa (a grama é a principal vegetação adotada, e, em alguns tipos de clima adota-se alfafa), em fase de crescimento ativo, com altura uniforme, e teor de água no solo próximo ou na capacidade de campo (CAD), a quantidade de água perdida para a atmosfera por unidade de área e tempo é conhecida como evapotranspiração potencial (ET_p) (PENMAN, 1948). Este conceito foi introduzido por THORNTHWAITE e WILM (1944) e aperfeiçoado por (PENMAN, 1956). Nestas condições, conceitualmente, a perda de água do sistema solo-planta para a atmosfera (evapotranspiração) ocorre como função única e exclusiva do balanço vertical de energia, ou seja, das condições atmosféricas sobre a vegetação sem interferências advectivas, podendo ser estimada por modelos matemáticos teóricos empíricos desenvolvidos e testados para várias condições climáticas.

A evapotranspiração de referência (ET_o) corresponde a evapotranspiração com enfoque ao estabelecimento de uma nova cultura de referência e o método para estimar a evapotranspiração para essa referência. Neste caso, a cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, cujas características de assemelham a evapotranspiração da grama, o que permite que tais características mantenham-se como parâmetros constantes adotados no cálculo da Et_o . Assim sendo, esses parâmetros para a cultura hipotética são, altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte do vapor d'água igual a 0,69 s.m⁻¹. Logo, a Et_o é um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado período (PENMAN, 1948).

2.1.2 Evapotranspiração de cultura (ET_c)

É a quantidade de água consumida por uma cultura sem restrição hídrica em qualquer fase de desenvolvimento. A cultura deve ser bem conduzida agronomicamente para que o consumo de água ocorra conforme o potencial evapotranspirativo de cada fase. Portanto, a ET_c pode ser entendida como sendo a evaporação potencial que ocorre em cada fase de desenvolvimento da cultura. O conhecimento da ET_c é fundamental para

projetos de irrigação, pois ela representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e desenvolvimento em condições ideais (PENMAN, 1948).

2.1.3 Evapotranspiração real (ETR)

É aquela que ocorre independente das condições de contorno pré-definidas para evapotranspiração de referência (ET_o) ou da cultura (ET_c). Portanto a ETR ocorre em qualquer circunstância, independente do tipo e das condições da cultura, da dimensão da área ou da umidade do solo. Podendo atingir valores menores, iguais ou superiores a ET_o (PENMAN, 1948).

Dentre os métodos que utilizam imagens de satélites, o SEBAL-Surface Energy Balance Algoritmo for Land, proposto por BASTIAANSSEN, (1995), tem sido aplicado com êxito em diversos ecossistemas do globo na obtenção da evapotranspiração em áreas agrícolas (HAFEEZ *et al.*, 2002), (BASTIAANSSEN *et al.*, 1998), (BASTIAANSSEN, 2000), (SILVA *et al.* 2005), (SILVA e BEZERRA, 2006) bem como, na estimativa do rendimento de culturas (BASTIAANSSEN e ALI, 2003).

Um modelo simplificado proposto por NAGLER *et al.* (2005) para estimar a evapotranspiração a partir de produtos de imagens de satélites como Índices de vegetação (NDVI e EVI) e temperatura da superfície (LST), com resolução espacial de 1 km e 5 km validado por meio de observações realizadas durante quatro anos em quatro torres meteorológicas posicionadas às margens do Rio Grande no Novo México, o qual é perene, onde obteve resultados satisfatórios, ocorrendo boa correlação com EVI ($r=0,76$), NDVI ($r=0,68$) e temperatura do ar (T_{ar}) (com $r=0,82$).

O modelo proposto por NAGLER *et al.* (2005), como visto, foi validado com dados coletados ao longo de um rio com característica perene, ou seja, com água disponível durante todo o período, em que a vegetação tendo acesso à água subsuperficial durante todo período e a evapotranspiração foi estimada pelo método de vórtices turbulentos (*Eddy covariance method*) (DAHMAN *et al.*, 2002).

2.2 Fatores que afetam a evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) depende de fatores climáticos como: temperatura do ar (T_{ar}), umidade relativa (UR), radiação solar global (RG), velocidade do vento (V_{vel}), chuva (PRP), pressão de vapor e nebulosidade, como principais variáveis (MEDEIROS, 2002).

Os principais parâmetros meteorológicos que proporcionam energia para vaporização e remoção do vapor de água, a partir de superfícies evaporantes são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, déficit de pressão de vapor e nebulosidade.

Com relação à cultura, depende de fatores como: área foliar, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar, resistência do dossel e outros que geralmente estão associados a um valor do coeficiente de cultura (K_c) e tipo de solo.

A irrigação é outro fator que interfere na evapotranspiração. Segundo ALLEN e PRUITT (1986) a irrigação modifica as condições ambientais locais, resfriando o ar local, tornando-o mais úmido, além de reduzir a turbulência nas massas de ar que avançam de áreas não irrigadas para as áreas irrigadas, o que reduz o potencial evaporativo e conseqüentemente a evapotranspiração.

O vento também é outro fator que influencia a advecção de temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor e outros difíceis de serem estimados (HARGREAVES, 1994).

Segundo MUKAMMAL e BRUCE (1960), a radiação solar global (RG) é o elemento climático mais importante na estimativa evapotranspiração. Entretanto, em regiões onde ocorrem advecções fortes, seja local ou regional, observada comumente quando uma área úmida é circundada por área seca, a importância relativa do saldo de radiação (R_n) decresce e a advecção ou transferência de calor sensível de calor das áreas secas circunvizinhas passa a contribuir significativamente no processo de evapotranspiração. Eventualmente, essa energia advectivas pode ser maior do que àquela disponível para área úmida.

2.2.1 Fatores climáticos

- a. Saldo de radiação (R_n) é a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração, depende da radiação solar incidente e do albedo da vegetação (AMATYA *et al.*, 1992). Em determinado local a disponibilidade de energia (radiação) é controlada pela reflexão da superfície. Vegetação mais clara reflete mais que as mais escuras e, portanto, tem menos energia disponível. Assim, sob as mesmas condições climáticas, uma floresta evapotranspira muito mais que uma superfície gramada (MOTA, 1986).
- b. Temperatura (T_a) provoca aumento no déficit de saturação de vapor d'água no decorrer do dia.
- c. Umidade relativa do ar (UR) atua juntamente com a temperatura, quanto maior for a temperatura e a disponibilidade hídrica maior será a evapotranspiração. O vapor de água transferido para atmosfera é controlado pelo poder evaporante do ar, quanto mais seco estiver o ar, maior será a demanda atmosférica. No entanto, existe uma inter-relação entre a disponibilidade de água pelo solo e a demanda atmosférica (OMETTO, 1981).
- d. O vento além de remover o vapor d'água do ar junto às plantas também é responsável pelo transporte horizontal de energia de uma área mais seca para outra úmida, contribuindo dessa forma para aumento da evapotranspiração.

2.2.2 Fatores da vegetação

- a. Espécie: Fatores associados aos aspectos morfológicos da planta, tais como, distribuição espacial da folhagem, resistência interna da planta ao transporte de água, número, tamanho e distribuição dos estômatos, exercendo influência direta na evapotranspiração.

- b. Albedo ou coeficiente de reflexão: influencia diretamente na disponibilidade de energia (R_n) para o processo de ET.
- c. Índice de área foliar (IAF): Acompanha o estágio de desenvolvimento e crescimento da cultura, aumentando a área foliar transpirante.
- d. Altura da vegetação: Quanto mais alta, maior é a interação com a atmosfera, extraído desta mais energia e a ação dos ventos é mais relevante, aumentando a ET.
- e. Profundidade das raízes: está diretamente relacionada ao volume de solo explorado, plantas com raízes superficiais, por explorar volume menor de solo, em períodos de estiagem não conseguem extrair água suficiente para atender sua demanda transpirativa.

2.2.3 Umidade do solo

- a. Capacidade de armazenamento de água (CAD): os solos mais argilosos possuem maior capacidade de armazenar água do que os solos arenosos, sendo capazes de manter a taxa de ET por período mais longo. No entanto, em solos mais arenosos as raízes tendem a ser mais profundas, compensando a menor retenção hídrica.
- b. Quando a umidade do solo está próxima da capacidade de campo, a evapotranspiração é mantida na razão potencial e determinada pelas condições climáticas predominantes. À medida que o solo perde a umidade, a evapotranspiração real (ETR) tomará valores abaixo do valor de evapotranspiração potencial a partir de determinado valor de umidade do solo.
- c. A relação entre umidade do solo e a razão ETR/ET_p depende das características físicas do solo, da cobertura vegetal e da demanda evaporativa da atmosfera.

2.2.4 Fatores de manejo da cultura e do solo

- a. Densidade de plantio: espaçamento menor resulta em maior exigência de água, causando aprofundamento das raízes para aumentar o volume de água disponível. Espaçamento maior permite que as raízes se desenvolvam mais superficialmente, porém, permite maior aquecimento do solo e das plantas e maior fluxo do ar pela ação do vento entra as plantas levando conseqüentemente a uma maior evapotranspiração.
- b. Impedimentos físico-químicos: quando ocorre limitação no crescimento de desenvolvimento das raízes, fazendo com que as plantas explorem menor volume de solo, resultando em efeitos negativos tanto no período chuvoso como no seco. No período chuvoso, o excesso de água pode causar asfixia das raízes, no período seco o volume de água fica reduzido, não permitindo que elas aprofundem em busca de água.

A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água no solo para as plantas. A radiação solar depende do local (*latitude e longitude*), topografia da região e época do ano, devido às diferentes posições do Sol. A disponibilidade de energia é controlada pelo albedo da superfície, onde a mais clara absorve menos energia. A demanda atmosférica é controlada pelo poder evaporante do ar (E_a) relacionado à velocidade do vento e ao déficit de pressão de vapor. Quanto maior o valor de E_a , maior será a evaporação (PEREIRA *et al.*, 1997).

Parte da energia disponível da radiação solar é usada na vaporização da água, para aquecer a atmosfera e o solo (ALLEN *et al.*, 1991).

2.3 Medidas de evapotranspiração

Os sistemas de medida de evapotranspiração servem para obter a ET_p ou ET_o assim como a ET_c , mudando apenas a vegetação a ser estudada.

2.3.1 Lisímetros

O lisímetro é um equipamento que consiste de uma caixa impermeável, contendo um volume de solo representativo da área a ser avaliada e coberta com a vegetação a ser estudada. O volume de solo é irrigado periodicamente sendo que a evapotranspiração será obtida pelo resíduo após efetuar o balanço hídrico neste volume de solo. Os lisímetros também são conhecidos como evapotranspirômetros, dentre os quais, os mais utilizados são os de drenagem, sub-irrigação e de pesagem.

2.3.1.1 Lisímetro de drenagem

São indicados apenas para período de observação acima de 10 dias. São também chamados de evapotranspirômetros de Thornthwaite, que podem ser construídos de cimento amianto comercial com pelo menos 0,54 m² de área por 0,60 m de profundidade (VAREJÃO-SILVA, 2006). Assim, para medir a ET, planta-se nas caixas e nas áreas circundante, um vegetal que dê uma cobertura do solo e que se mantenha em crescimento durante todo o ano, geralmente “grama batatais” (*PaspalumnotatumFlugge*), que reúne as condições do vegetal para ocorrência da evapotranspiração potencial ou de referência durante todo ano na maior parte deste. Então, irriga-se a caixa e a área adjacente até que se percole água no recipiente de coleta. Quando cessar a percolação, o lisímetro estará em condições de uso, sendo que o solo se apresenta com o teor de água na capacidade de campo. O valor da evapotranspiração é dado pela Equação 2-1.

$$ET = (I - D)/A$$

Equação 2-1

Em que ET é a evapotranspiração potencial ou de referência ou ainda de cultura (mm/período considerado);

I: Volume de água de irrigação (litros)

D: volume de água drenada (percolada) após a irrigação (litros)

A: área do lisímetros (m²)

2.3.1.2 Lisímetros de sub-irrigação

São conhecidos também como lisímetros de lençol freático a nível constante e são constituídos de um tanque enterrado no solo semelhante ao lisímetro de drenagem. O fornecimento de água é feito na parte inferior do lisímetro, podendo-se manter o lençol freático a diferentes profundidades para que seja possível variar as condições de umidade do solo.

A evapotranspiração é obtida pela quantidade de água que sai do sistema (que é a própria água fornecida ao sistema, desde que não haja acréscimo por chuvas) em um determinado período de tempo.

2.3.1.3 Lisímetros de pesagem

São evapotranspirômetros especiais, construídos de tal maneira que possibilitem sua pesagem. São aparelhos de precisão e custo elevado, requerendo cuidados especiais de manejo. Estes aparelhos permitem conhecer, dia a dia a variação no peso do solo que, desprezando-se o acréscimo diário de peso das plantas, será o valor da evapotranspiração.

2.3.2 Balanço de água no solo

Delimita-se sobre a área da cultura em estudo uma parcela e certa profundidade correspondente à profundidade do sistema radicular da cultura. Dentro deste volume de controle é efetuada a contabilização da entrada e saída de água deste volume. Na camada subsuperficial deste volume pode haver entrada (ascensão capilar da água=AC) ou saída (drenagem profunda =DP) de acordo com a variação do armazenamento de água no solo no limite inferior do volume de controle. Se a chuva (P) for excessiva, poderá haver encharcamento do solo ocorrendo escoamento superficial (ES). Em condições experimentais este sistema é sempre acompanhado de irrigações (I) frequentes procurando manter o solo sempre próximo ou na capacidade de campo. Com a entrada ou saída de água do sistema haverá uma variação do armazenamento de água ($\pm\Delta A$) neste volume de controle. Assim, num intervalo de tempo, pelo princípio da conservação de massa, a evapotranspiração será:

$$ET = P + I + AC - DP - ES \pm \Delta A$$

Equação 2-2

2.4 Estimativa da evapotranspiração potencial ou de referência

Existem diversos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, como Método do Tanque classe A, Penman-Monteith, Thornthwaite, Blaney-Cridle, Makkink, Budyko dentre outros.

Tendo em vista o objetivo do presente estudo, o qual busca relacionar a evapotranspiração real (ETR) com as demais variáveis obtidas por sensoriamento remoto e radiação solar global, apenas os métodos que foram utilizados em parte ou totalidade no desenvolvimento da pesquisa serão descritos, onde o método de Thornthwaite (1948) foi adotado para estimativa da evapotranspiração potencial (ET_p) para entrada no modelo do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) e será descrito no tópico do balanço hídrico.

O método do Tanque classe A ressalta que a quantidade de água perdida para atmosfera a partir de uma superfície de água em contato livre com a atmosfera é maior do que a perda de água de uma superfície vegetada (DOORENBOS e PRUIT, 1975).

O método de Penman-Monteith é um método apropriado para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), a qual considera uma cultura saudável sem limitação hídrica, e neste estudo contribuiu tanto para a estimativa da ET_o , para efeitos de comparação posterior com a ETR, assim como, contribuiu com as equações modificadas para estimativa de fotoperíodo (N), declinação solar (δ), distância relativa Terra-Sol (dr) e ângulo horário (H) do nascer e pôr do Sol, tendo em vista a maior simplicidade das equações apresentadas.

PENMAN (1948), em sua equação para estimativa da evapotranspiração potencial, não levou em consideração a resistência da superfície para a transferência de vapor d'água. Para aplicações práticas, foi proposta uma equação empírica em função do vento. Posteriormente, MONTEITH (1965) desenvolveu com base na equação de (PENMAN, 1948),

uma nova equação, incluindo a resistência aerodinâmica e a resistência do dossel ao fluxo de vapor de água passando a ser chamada de equação de Penman-Monteith. Assim, além de combinar aspectos radiativos e aerodinâmicos, concilia o fluxo de calor sensível e o fluxo de vapor de água (r_c). Esta equação, assim definida, tem por proposição a estimativa direta da evapotranspiração da cultura (ET_c) em estudo, eliminando a necessidade de coeficiente de cultura (k_c), desde que, sejam conhecidas as respectivas resistências aerodinâmicas e do dossel à difusão do vapor de água.

$$\lambda E = \frac{s(R_n - G) + \frac{M\rho C_p \Delta e}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

Equação 2-3

Em que,

λE é a densidade do fluxo de calor latente de evaporação (W/m^2);

s é a declividade da curva de saturação de vapor de água ($kPa\ ^\circ C^{-1}$);

R_n é a radiação líquida (W/m^2);

G é o fluxo de calor no solo (W/m^2);

M é o fator de escala de tempo. Se $M = 1$ o resultado é por segundo; $M = 60$, por minuto, $M = 3600$, por hora e $M = 86400$ o resultado será por dia;

ρ é a densidade do ar (kg/m^3);

C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($JKg/^\circ C$);

Δe é o déficit de pressão de vapor de água ($e_s - e_a$) dados (kPa);

r_a é a resistência aerodinâmica à difusão do vapor de água (s/m);

γ é o coeficiente psicrométrico ($kPa/^\circ C$) e

r_c é a resistência da cultura (dossel) à difusão do vapor de água (s/m).

O modelo de Penman-Monteith foi adotado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) como o mais adequado para estimar a ET_c na escala diária por eliminar o uso do K_c . Contudo, a operacionalidade deste modelo é deficiente por depender dos parâmetros r_a e r_c , que são de difícil mensuração. Sendo assim, o modelo acima foi parametrizado para a cultura hipotética, permitindo estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) na escala diária em

mm/dia, sendo nomeado como Penman-Monteith-Padrão FAO (ALLEN *et al.*, 1998) .

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{ar} + 273,15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Equação 2-4

Em que:

R_n é o saldo de radiação na superfície (MJ.m⁻²/dia),

G é o fluxo de calor no solo,

T_{ar} é a temperatura do ar a 2 metros da superfície (°C), u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura,

e_s é a pressão de saturação do vapor de água (kPa),

e_a é pressão de saturação atual (kPa),

$e_s - e_a$ é o déficit da pressão de saturação (kPa),

Δ é a curva de pressão do vapor de água (kPa.°C⁻¹) e

γ é a constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹).

2.5 Método de Thornthwaite (1948)

Thornthwaite (1948) correlacionou temperatura média mensal ET , como determinado pelo balanço hídrico para vales no leste dos Estados Unidos onde a umidade é disponível suficientemente para manter a transpiração ativa. A equação de Thornthwaite para a evapotranspiração de referência (ET_o) mensal (mm.d⁻¹) pode ser representada na forma das Equações 2-5 e 2-6.

$$ET_o = 1,6 \cdot (10 \cdot T/I)^a$$

Equação 2-5

ou

$$ET_o = \frac{ETp}{30} \cdot \frac{N}{12}$$

Equação 2-6

Onde T é a temperatura média para o mês ($^{\circ}\text{C}$), I é o índice térmico anual, sendo a soma dos índices i mensais e a são índices de calor obtidos a partir de dados normais da região, ET_p é a evapotranspiração padronizada para um mês de 30 dias; N é o fotoperíodo (horas de iluminação solar), o índice a é calculado pela Equação 2-7.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

Equação 2-7

Em que o índice térmico I é dado na forma da Equação 2-8.

$$I = \sum_{1}^{12} (0,2 \cdot T_i)^{1,514}$$

Equação 2-8

Para o cálculo de ET_p , utilizam-se as seguintes expressões:

Se $(0 < T_m < 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C})$

$$ET_p = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_m}{I}\right)^a$$

Equação 2-9

E se $(T_m \geq 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C})$

$$ET_p = -415,85 + 32,24 \cdot T_m - 0,43 \cdot T_m^2$$

Equação 2-10

Onde T_m é a temperatura média diária.

2.6 Método de Thornthwaite e Mather, 1955

O balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo. Através da contabilização do suprimento natural de água no solo, pela chuva (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ET_p), e com um nível máximo de armazenamento de água pelo solo ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão, o balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (CAMARGO, 1971); (PEREIRA *et al.*, 1997).

De acordo com DOOREMBOS e KASSAM (1994) o balanço hídrico de THORNTWHAITE e MATHER (1955), quando empregado de maneira sequencial, possibilita quantificar as necessidades de irrigação em uma cultura e relacionar o rendimento das culturas com o déficit hídrico (CAMARGO e PEREIRA, 1990).

Basicamente, a capacidade máxima de armazenamento de água pelo solo (CAD) e a taxa de utilização da umidade do solo para evapotranspiração passam a depender da profundidade, do tipo e da estrutura do solo neste método.

A profundidade do solo pode variar de poucos milímetros, em solos arenosos rasos a cerca de 300 mm em solos siltsos profundos. Mas, em solos arenosos, as plantas podem possuir raízes mais profundas que em solos argilosos e siltsos (VIANELLO e ALVES, 1991).

Assim sendo, existindo variações na capacidade de armazenamento de água pelos solos, definiu-se capacidade de água disponível, CAD, do perfil do solo em função da profundidade de exploração efetiva das raízes, P_e , e das características físicas do solo: capacidade de campo, CC, densidade aparente ou global, D_a , e ponto de murcha permanente, representado na forma da Equação 2-11.

$$CAD = \frac{(CC - PMP)}{100} \cdot D_a \cdot Pe$$

Equação 2-11

A CAD é obtida em mm, desde que CC e PMP sejam expressos em porcentagem, em peso, da água contida no solo, D_a em g.cm^{-3} e Pe em mm.

A proposta de Thornthwaite e Mather (1955) modificou também quanto ao comportamento da evapotranspiração real à proporção que o solo vai perdendo água, sendo sugerido um declínio linear da evapotranspiração com o aumento da tensão de água no solo, expressa na forma da Equação 2-12:

$$S = CAD \cdot e^{(A/F)}$$

Equação 2-12

Em que S é o armazenamento (ARM) ao longo do ano; A é a perda de água acumulada (negativo acumulado) e CAD é a capacidade de água disponível.

2.7 Balanço hídrico

O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água do solo e resulta da aplicação do princípio de conservação de massa para a água num volume de solo vegetado (<http://www.ciiagro.sp.gov.br/>).

O balanço hídrico climatológico, descrito por Thornthwaite e Mather (1955) é uma das diversas maneiras de se monitorar o armazenamento de água no solo. Partindo-se do suprimento natural de água para o solo, simbolizado pelas chuvas e da demanda atmosfera, simbolizada pela evapotranspiração potencial (ET_p), e com um armazenamento máximo apropriado para a planta cultivada, o balanço hídrico fornece estimativas do armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF) e do excedente hídrico (EXC) em diversas escalas de tempo (PEREIRA *et al.*, 1997).

O balanço hídrico pode ser classificado como o balanço hídrico normal e o balanço hídrico sequencial, dependendo da necessidade de tomada de decisão.

O balanço hídrico (BH) normal ou climatológico é frequentemente apresentado na escala mensal e para um “ano médio”, de maneira cíclica. O BH normal é importante ferramenta para o planejamento agrícola, caracterização climática de uma região, servindo de subsídio para a determinação da melhor época e tipo de manejo da exploração agrícola, (PEREIRA *et al.*, 1997).

O balanço hídrico sequencial permite acompanhar a disponibilidade de água no solo no momento de seu cálculo, podendo ser a escala de tempo compatível com as tomadas de decisões, ou seja, diária, semanal, decenal ou mensal (PEREIRA *et al.*, 1997).

2.8 Anatomia foliar e estresse hídrico

A água é um dos elementos do clima o que se apresenta como mais limitante às culturas de verão e que a disponibilidade hídrica durante a estação de crescimento é a principal limitação à expressão do potencial de rendimento das culturas, independente do ciclo da cultivar, do local e época da semeadura (FARIAS, 2005).

É fundamental na regulação térmica da planta, agindo tanto no resfriamento, como na manutenção e na distribuição do calor. O peso das plantas é constituído de aproximadamente 90% de água a qual atua em, praticamente, todos os processos bioquímicos e morfológicos, além de ser responsável pela manutenção da turgescência atua como reagente em várias importantes reações na planta, como a fotossíntese (FARIAS, 2005).

É limitante principalmente nos períodos de baixa pluviosidade, ocasionando efeitos deletérios que podem afetar a produtividade. Sendo necessário conhecer os mecanismos fisiológicos e bioquímicos de resposta de cada espécie a esse tipo de estresse e que todos os fatores ambientais que interferem no mecanismo de absorção e assimilação de água e nutrientes, tem influência negativa sobre o metabolismo das plantas, diminuindo o crescimento e produtividade das culturas (LECHINOSKI *et al.*, 2007).

Segundo SALAMONI (2008), estresse hídrico é qualquer fator externo que exerce influência desvantajosa sobre a planta, induzindo respostas em todos os níveis do organismo, podendo ser reversíveis ou permanentes. Também definido como uma pressão excessiva de algum fator adverso que apresenta a tendência de inibir o normal funcionamento dos sistemas (LECHINOSKI *et al.*, 2007).

Dentre os fatores que podem levar o vegetal ao estresse, a água pode alterar todo o funcionamento bioquímico e morfológico das plantas, uma vez sabendo que a água é um fator limitante para a planta em todas as fases de desenvolvimento da planta. A produtividade das plantas é limitada pela água e depende não só da quantidade de água disponível, mas também da eficiência de seu uso pelo organismo (SALAMONI, 2008).

A quantidade de água existente no solo está diretamente ligada com o estresse hídrico das plantas, sendo este o grande armazenador e fornecedor de água às plantas. Solos com textura mais finas (argiloso) retêm maior quantidade de água do que solos com partículas mais grossas (arenosos) (FARIAS, 2005), o que pode se dizer que em solos argilosos, as plantas tendem a sofrer menos com o estresse hídrico, como acontece em um período de estiagem.

O estresse de água ocorre quando a perda de água excede a absorção, e a maioria das plantas está sujeita a uma deficiência de água durante o dia seguida de uma recuperação à noite (SUTCLIFFE, 1980).

Segundo SANTOS e CARLESSO (1998), à medida que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorver água, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas concluindo que quanto maior a demanda evaporativa da atmosfera mais elevada será a necessidade de fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera.

A condição hídrica da planta depende da disponibilidade de água no solo, da demanda evaporativa da atmosfera e das características das plantas. A deficiência hídrica provoca reações fisiológicas e morfológicas da planta, como murchamento de folhas e redução da área foliar, menor estatura de planta, queda de flores e frutos, fechamento de estômatos e ajustamento osmótico, que reduzem a fotossíntese e afetam negativamente seu

crescimento, desenvolvimento e rendimento, que resultam de modo indireto, na conservação da água no solo (FARIAS, 2005).

Os efeitos causados pelo déficit hídrico nas plantas segundo SALAMONI (2008) são:

- a. Redução do turgor: o primeiro efeito biofísico do estresse hídrico é a diminuição do volume celular. As atividades que dependem do turgor são mais sensíveis ao déficit hídrico, principalmente a expansão celular, afetando em especial a expansão foliar e o alongamento das raízes.
- b. Área foliar diminuída: resposta precoce. Menor expansão celular, menor área foliar, diminuição da transpiração. Pode limitar o número de folhas porque diminui o número e a taxa de crescimento dos ramos.
- c. Abscisão foliar: se ocorrer estresse após um desenvolvimento substancial da área foliar, há senescência foliar e queda de folhas a fim de ajustar a área foliar.
- d. Acentua o aprofundamento das raízes: a razão da biomassa entre as raízes e parte aérea depende do balanço funcional entre absorção de água pelas raízes e a fotossíntese pela parte aérea.
- e. Estômatos fecham.
- f. Limita a fotossíntese nos cloroplastos: devido ao CO_2 . Além disso, o transporte no floema depende do turgor, a diminuição do potencial hídrico no floema durante o estresse pode inibir o movimento dos fotoassimilados.
- g. Aumento da resistência ao fluxo de água na fase líquida: quando as células secam, elas encolhem. As raízes encolhendo podem afastar sua superfície das partículas de solo que retém a água e seus pelos podem ser danificado.
- h. Aumento do depósito de cera sobre a superfície foliar: cutícula espessa reduz a perda de água pela epiderme.
- i. Altera a dissipação de energia das folhas: a perda de calor por evaporação diminui a temperatura foliar, se o estresse hídrico limitar a transpiração a folha esquenta, a menos que outro

processo compense a falta de esfriamento, como mudança na orientação das folhas, murchamento.

- j. Induz o metabolismo das crassuláceas: estômatos abrem à noite e fecham de dia a fim de reduzir a transpiração.
- k. Diminui a fertilidade do pólen.

De acordo com RITCHIE *et al.* (1972) a resposta fisiológica das plantas ao déficit hídrico deve ser avaliada em função da água disponível no solo. Esta proposta foi aprofundada por SINCLAIR e LUDLOW (1986) ao proporem o estudo de resposta da planta à fração de água evapotranspirada. Para a formação de grãos os autores apresentam o limite crítico da fração de água evapotranspirada entre 0,25 a 0,35. Resultados similares foram encontrados por GOLLAN *et al.* (1986).

A água evapotranspirável ou água disponível no solo é definida pela diferença entre o conteúdo de água no solo, explorado pelo sistema radicular das plantas, entre o limite superior e o limite inferior de água disponível no solo (CARLESSO, 1995). O limite superior de água disponível às plantas é definido como o determinado conteúdo de água no solo determinado 24 a 48 horas após a ocorrência da drenagem, a partir do umedecimento completo ou saturação do solo por irrigação ou precipitação. O limite inferior de água disponível às plantas é definido como o valor do conteúdo de água do solo depois que as plantas, desenvolvidas estejam completamente senescentes com conseqüente extração de toda a água disponível no perfil do solo.

A capacidade de armazenamento de água disponível às plantas (CAD) é determinada pela diferença de conteúdo volumétrico de água entre o limite superior e inferior de disponibilidade, considerando-se cada camada do perfil do solo explorado pelo sistema radicular das plantas. Desta forma, a água do solo disponível às plantas é definida para uma combinação particular solo-cultura. As características químicas, físicas e biológicas do solo têm influência direta na quantidade de água no solo disponível às plantas; assim, se houve qualquer restrição física, química ou biológica, em alguma camada do perfil do solo, que altere o desenvolvimento do sistema radicular, a disponibilidade será afetada porque essa água armazenada não pode ser extraída pelas plantas.

Por outro lado, na determinação tradicional somente as características físicas do solo são utilizadas na avaliação do armazenamento de água no solo, considerando-se que somente o potencial de água no solo influencie o desenvolvimento radicular e absorção de água, isto é, a quantidade de água armazenada no perfil do solo é conservadoramente a mesma, independente da cultura ou da existência de restrições ao desenvolvimento das plantas.

Diante dessa apresentação, o presente estudo buscou relacionar os efeitos sentidos na vegetação ao passar pelo período chuvoso ou de estiagem no bioma Cerrado com os Índices de Vegetação (EVI e NDVI) observados por sensoriamento remoto e a quantidade de água evapotranspirada (ETR) ligada à água disponível no solo.

Os modelos elaborados representam a evapotranspiração real (ETR), conforme THORNTHWAITE e MATHER (1955), aplicáveis à avaliação de quantidade de água disponível para vegetação, visto que foram calibrações em condições ambientais sem interferência antropogênica.

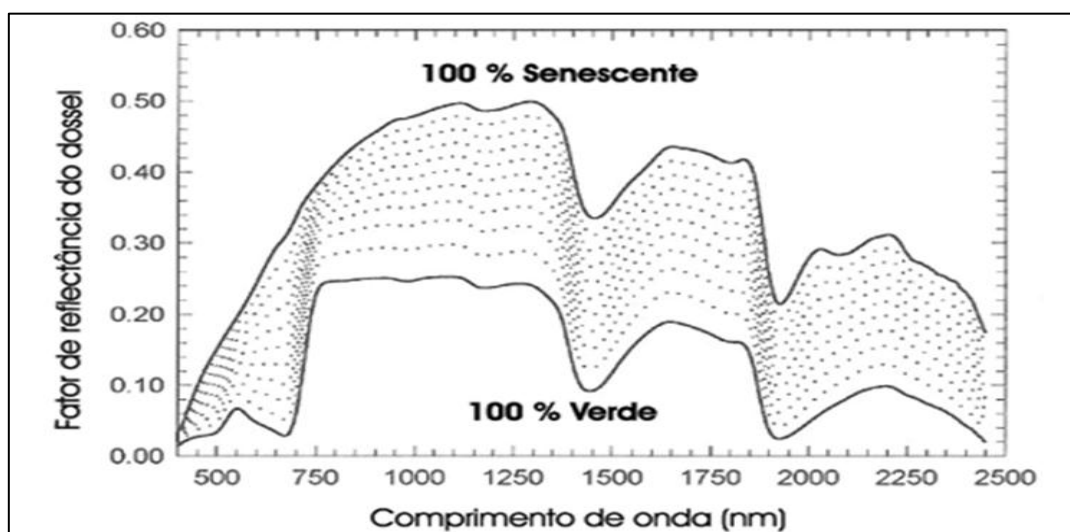
2.9 Interação entre vegetação e radiação eletromagnética (REM)

A fotossíntese é o processo de interação entre a radiação eletromagnética com a vegetação, processo este fundamentado na absorção da radiação eletromagnética por parte dos pigmentos fotossintetizantes como a clorofila, caroteno e o caroteno. Em que essa absorção ocorre na região do visível do espectro eletromagnético de 0,40 a 0,72 μm .

Os fatores que influenciam resposta espectral da vegetação podem ser divididos em dois grupos, em função do nível de abordagem, denominados de fatores endógenos e exógenos da vegetação. Os fatores endógenos relacionam-se aos aspectos morfológicos, anatômicos e estruturais das folhas; enquanto que os exógenos estão ligados aos aspectos quantitativos e qualitativos da REM incidente sobre a vegetação (PONZONI, 2001).

As folhas são os elementos que possuem o papel mais importante no comportamento espectral da maior parte das formações vegetais (COLWELL, 1974). O comportamento da reflectância ao longo do espectro eletromagnético para a vegetação, considerando-se o intervalo de 0,4 μm a 2,5 μm gera uma

curva (Figura 2-1), onde podem ser discriminadas três regiões espectrais: visível, infravermelho próximo e infravermelho médio.



Fonte: Adaptado de (Ferreira Jr. *et al.*, 2005)

Figura 2-1: Reflectância do dossel da vegetação em vários comprimentos de onda do ponto verde ao senescente.

Na região que vai de 0,4 a 0,7 µm, a reflectância é relativamente baixa decorrente da forte absorção da radiação pelos pigmentos do grupo da clorofila. A absorção da energia incidente por esses pigmentos relacionada ao processo de fotossíntese ocorre nas bandas centradas aproximadamente em 0,45 µm (azul) e 0,65 µm (vermelho), em oposição há um pico de reflectância em torno de 0,5 µm (verde). Por essa razão, a vegetação sadia para o olho humano aparece em tons de verde.

Em relação ao dossel, os parâmetros responsáveis pelo comportamento espectral incluem a natureza geométrica (ângulos de iluminação e visada), espectral (outros elementos da vegetação e solo) além de atributos biofísicos dos dosséis (IAF e distribuição angular foliar, DAF) (PONZONI, 2001).

2.9.1 Espectro do visível

Os pigmentos verdes denominados clorofilas são os mais importantes no processo fotossintético. No processo de interação da radiação eletromagnética com a vegetação, o máximo de atividade fotossintética ocorre

no mesmo comprimento de onda que a de máxima absorção por clorofila (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

2.9.2 Espectro do infravermelho próximo

Relacionada a estrutura interna celular da folha, ocorre um aumento significativo da reflectância para a faixa compreendida entre 0,7 a 1,3 μm , estando. No mesófilo foliar ocorrem múltiplas reflexões e refrações da radiação eletromagnética associada à descontinuidade entre os índices de refração (IR) dos espaços celulares preenchidos com ar (IR=1,0) e das paredes celulares hidratadas (IR=1,42). A alta reflectância observada nessa faixa é muito importante para que a folha mantenha o equilíbrio no balanço de energia e não se superaqueça, evitando assim, a destruição da clorofila (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

2.9.3 Espectro do infravermelho médio

Para a região que vai de 1,3 a 2,5 μm , o decréscimo dos valores de reflectância é devido principalmente ao conteúdo de água presente na folha. Nessa faixa encontram-se as bandas de absorção de água, marcadas em 1,4, 1,9 e 2,7 μm , sendo a última a mais intensa e referida como a banda de absorção de água vibracional fundamental (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

Foi observado em condições controladas, que folhas hidratadas quando comparadas com as desidratadas refletem menos e absorvem mais radiação na faixa de 0,5 a 2,5 μm . A taxa de energia incidente absorvida na faixa do infravermelho médio pela vegetação é função da soma total da água presente no mesófilo, a qual está relacionada à percentagem de umidade contida na folha e à espessura da mesma.

Existem ainda algumas características estruturais das folhas que podem afetar a reflectância da vegetação, tais como a presença de pilosidade (tricomias) e cera epicuticular, efeito da idade e iluminação na folha, e ocorrência de fototropismos. Percentualmente, a reflectância de uma cobertura vegetal é consideravelmente menor que a de uma folha verde isolada, devido a

diversos fatores como influência de superfícies desfolhadas, ângulos variados de iluminação e orientação das folhas, etc., além é claro do estado fenológico dos indivíduos que a compõem.

Segundo PONZONI e SHIMABUKURO (2007) em uma abordagem macroscópica vale ressaltar também a importância dos parâmetros biofísicos na resposta espectral de uma cobertura vegetal, entre os quais citam o Índice de Área Foliar (IAF), a Distribuição Angular de Folhas (DAF), o Índice de Cobertura Vegetal (ICV) e a Fitomassa.

2.10 Interação entre solo e radiação eletromagnética

Nos casos de baixas percentagens de cobertura vegetal, lavouras em fileiras, quando visadas verticalmente e ângulos altos de elevação solar, o solo é um fator importante na reflectância de dosséis.

As assinaturas espectrais dos solos podem variar devido à diferença de brilho associadas à magnitude da radiância refletida, assim como pela mudança da curva espectral atribuída as feições mineralógicas, orgânica e de absorção de água dos solos (VENTURIERI, 2007).

A reflectância observada em solos secos corresponde ao dobro do valor que teria se estivessem úmidos. Por essa razão os solos úmidos frequentemente aparecem mais escuros em relação aos secos. A absorção de água centradas em 1,45 e 1,95 μm caracterizam as curvas de reflectância de solos úmidos (DALMOLIN *et al.*, 2005).

A curva espectral não muda de formato quando se umedece o solo, sendo, entretanto, observada uma redução dos valores de reflectância, além de que, as bandas de absorção de água tornam-se mais incisivas (BOWERS e HANKS, 1965).

A matéria orgânica também é relevante no comportamento espectral dos solos, assim, à medida que o conteúdo de matéria orgânica aumenta, a reflectância do solo diminui no intervalo de 0,4 e 2,5 μm , promovendo principalmente uma redução da reflectância na região do visível (DALMOLIN *et al.*, 2005). Quando o conteúdo de matéria orgânica excede aos 2%, ela confere propriedades espectrais aos solos, enquanto que em concentrações inferiores

a 2%, torna-se menos efetiva no mascaramento dos efeitos dos outros constituintes do solo (VENTURIERI, 2007).

Quanto ao tamanho e a forma das partículas, bem como, o tamanho e a forma dos agregados do solo podem influir na reflectância do solo de várias maneiras. À medida que se diminui o tamanho das partículas há um aumento exponencial na reflectância em todos os comprimentos de onda entre 0,4 e 1,0 μm , principalmente para as partículas menores que 0,4 μm de diâmetro.

O efeito do tamanho das partículas constituintes do solo na reflectância é bastante variável, sendo em geral observado que o aumento da reflectância é proporcional ao aumento da concentração de areia no solo, isto é, os solos com características superficiais mais arenosas apresentam reflectância mais alta. Nos casos de solos com textura média a fina isto não é observado, pois tais parâmetros apresentam correlação direta. Isto se deve ao fato que nos solos de textura média a fina haver formação de agregados estáveis em água, o que cria uma superfície diferente daquela formada por grãos simples dos solos arenosos (DALMOLIN *et al.*, 2005).

As cores em solos vermelhos e amarelos são consequentes do tipo e da quantidade relativa de óxidos de ferro, os quais são ricos em argilas sesquioxídicas. Sendo, dessa forma, o conteúdo de óxidos de ferro livre no solo em termos de influência espectral, significativo tanto no visível quanto no infravermelho, porém a significância é maior com o aumento do comprimento de onda. A presença de compostos de ferro origina as bandas de absorção em 0,7, 0,9 e 1,0 μm , sendo a intensidade das mesmas proporcionais à concentração destes compostos (DALMOLIN *et al.*, 2005).

Nos espectros dos minerais de argila dos grupos da montmorillonita e caulinita, as principais feições devem-se a presença de água. As bandas de absorção muito fortes em 1,4 e 2,2 μm devem-se a água confinada típica das montmorillonita, enquanto a forte banda de hidroxila centrada em 1,4 μm é típica da reflectância da caulinita. Para ambos os grupos de argila ocorre uma redução geral na reflectância com a diminuição do comprimento de onda a partir de 0,7 μm .

2.11 Características do satélite Aqua

O Aqua é um satélite americano que como o próprio nome sugere, foi idealizado para monitorar vários tipos de fenômenos físicos referentes à circulação da energia e da água na Terra. Para isso, ele oferece uma série de dados sobre as interações que ocorrem entre a atmosfera, oceano e continente, como por exemplo, umidade e temperatura da atmosfera, evaporação, nuvens, precipitação, temperatura na superfície do oceano, umidade do solo, gelo, neve, entre outros (LPDAAC-TEAM, 2008).

Alguns parâmetros podem ser extraídos a partir dos dados do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua, incluindo fluxo de energia radiante, aerossóis, cobertura do solo, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida nos oceanos e temperatura da água. Com esses dados, espera-se promover o avanço científico na área de mudanças climáticas globais (LPDAAC-TEAM, 2008).

A missão Aqua faz parte do *Earth Observation System* (EOS), programa fundado pela NASA *Earth Enterprise* (ESE) e leva a bordo seis instrumentos sensores: *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS), *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU-A), *Humidity Sounder for Brazil* (HSB), *Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS* (AMSR-E), *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) e *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (LPDAAC-TEAM, 2008).

Dentre esses instrumentos, o MODIS tem uma importância singular para os trabalhos em agricultura devido à sua alta resolução temporal que permite o monitoramento sistemático de algumas culturas e de outras classes de uso.

2.11.1 Características do sensor MODIS

O MODIS é um instrumento desenvolvido pela *Goddard Space Flight Center* (GSFC) que opera em 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de 400 a 14.400 nm e três resoluções espaciais 250, 500e 1.000 metros (Tabela 2 1). Além do satélite Aqua, o MODIS também está a bordo do satélite Terra (lançado em 1999) e juntos, os dois instrumentos conseguem

adquirir imagens da Terra em intervalos de 1 a 2 dois dias (LPDAAC-TEAM, 2008).

Tabela 2-1: Características do sensor MODIS.

Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada			
1	620 - 670 nm	250 m	1 a 2 dias	2.330 x 5.000 km			
2	841 - 876 nm	500 m	1 a 2 dias	2.330 x 5.000 km			
3	459 - 479 nm						
4	545 - 565 nm						
5	1230 - 1250 nm						
6	1628 - 1652 nm						
7	2105 - 2155 nm						
8	405 - 420 nm				1.000m	1 a 2 dias	2.330 x 5.000 km
9	438 - 448 nm						
10	483 - 493 nm						
11	526 - 536 nm						
12	546 - 556 nm						
13	662 - 672 nm						
14	673 - 683 nm						
15	743 - 753 nm						
16	862 - 877 nm						
17	890 - 920 nm						
18	931 - 941 nm						
19	915 - 965 nm						
20	3.660 – 3.840 nm						
21	3.929 – 3.989 nm						
22	3.929 – 3.989 nm						
23	4.020 – 4.080 nm						
24	4.433 – 4.498 nm						
25	4.482 – 4.549 nm						
26	1.360 – 1.390 nm						
27	6.535 – 6.895 nm						
28	7.175 – 7.475 nm				1 a 2 dias	2.330 x 5.000 km	
29	8.400 – 8.700 nm						
30	9.580 – 9.880 nm						
31	10.780 – 11.280 nm						
32	11.770 – 12.270 nm						
33	13.185 – 13.485 nm						
34	13.485 -13.785 nm						
35	13.785 -14.085 nm						
36	14.085 -14.385 nm						

Fonte: (TEAM, 2008)

As imagens do MODIS oferecem uma base sistemática de dados na elaboração de produtos sobre as interações entre atmosfera, terra e oceano. Sua utilização encontra-se associada na medição de propriedades das nuvens, fluxo de energia radiante, propriedades dos aerossóis, mudanças no uso e cobertura das terras, queimadas e atividades vulcânicas, entre outras (SATÉLITE-EMBRAPA, 2007). O Quadro 2-1 apresenta os principais produtos disponíveis para pesquisa cedidos gratuitamente (LPDAAC-TEAM, 2011).

Quadro 2-1: Produtos MODIS disponíveis.

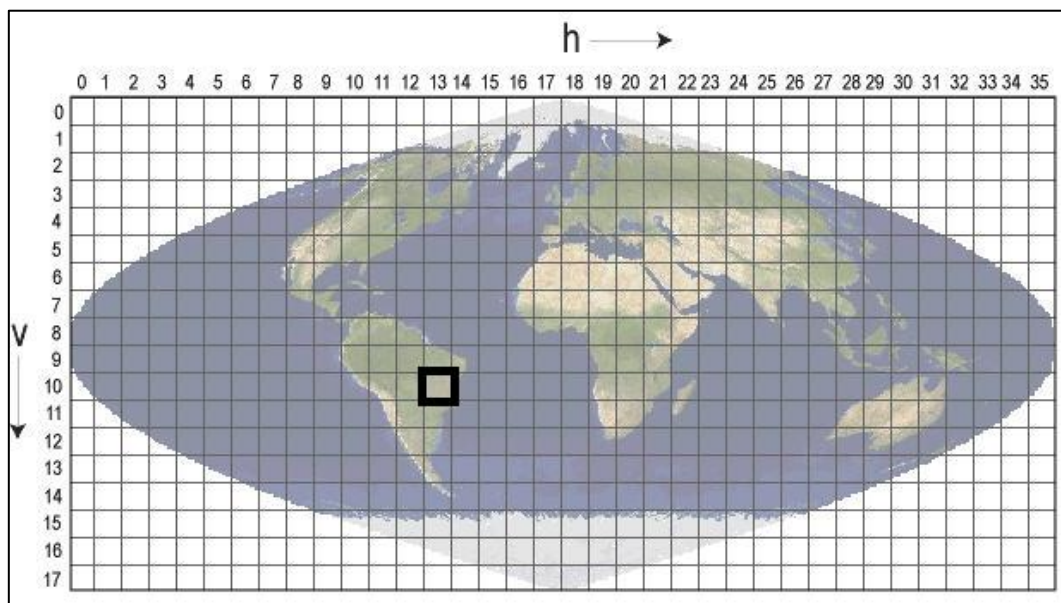
Nome	Satélite	Produto MODIS	Tipo	Resolução	Resolução temporal
MOD13Q1	Terra	Índices de vegetação	<i>Tile</i>	250m	16 dias
MYD14A1	Aqua	Anomalia termal e queimada	<i>Tile</i>	1000m	diário
MOD14A1	Terra	Anomalia termal e queimada	<i>Tile</i>	1000m	diário
MYD14A2	Aqua	Anomalia termal e queimada	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MOD14A2	Terra	Anomalia termal e queimada	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MYD14	Aqua	Anomalia termal e queimada	<i>Swath</i>	1000m	5 min
MYD09CMG	Aqua	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>CMG</i>	5600m	diário
MOD09CMG	Terra	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>CMG</i>	5600m	diário
MYD09GQ	Aqua	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>Tile</i>	250m	diário
MOD09GQ	Terra	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>Tile</i>	250m	diário
MYD09GA	Aqua	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>Tile</i>	500/1000m	diário
MYD09A1	Aqua	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>Tile</i>	500m	8 dias
MYD17A2	Aqua	Produção primária bruta	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MOD09A1	Terra	Reflectância da superfície Bandas 1–2	<i>Tile</i>	500m	8 dias
MYD09Q1	Aqua	Reflectância da superfície Bandas 1–2	<i>Tile</i>	250m	8 dias
MOD09Q1	Terra	Reflectância da superfície Bandas 1–2	<i>Tile</i>	250m	8 dias
MCD43B4	Terra/ Aqua	Nadir BRDF-Reflectância ajustada	<i>Tile</i>	1000m	16 dias
MCD43A4	Terra/ Aqua	Nadir BRDF-Reflectância ajustada	<i>CMG</i>	500m	16 dias
MCD43C4	Terra/ Aqua	Nadir BRDF-Reflectância ajustada	<i>CMG</i>	5600m	16 dias
MYD15A2	Aqua	Índice de área foliar- FPAR	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MOD15A2	Terra	Índice de área foliar- FPAR	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MCD15A3	Terra/ Aqua	Índice de área foliar- FPAR	<i>Tile</i>	1000m	4 dias
MOD44W	Terra	Máscara de água	<i>Tile</i>	250m	Nenhum
MYD11C3	Aqua	Temperatura superficial e	<i>CMG</i>	5600m	Mensal

		emissividade			
MOD11C3	Terra	Temperatura superficial e emissividade	CMG	5600m	Mensal
MYD11B1	Aqua	Temperatura superficial e emissividade	Tile	5600m	diário
MOD11B1	Terra	Temperatura superficial e emissividade	Tile	5600m	diário
MYD11A1	Aqua	Temperatura superficial e emissividade	Tile	1000m	diário
MYD11C1	Aqua	Temperatura superficial e emissividade	CMG	5600m	diário
MOD11C1	Terra	Temperatura superficial e emissividade	CMG	5600m	diário
MOD11A2	Terra	Temperatura superficial e emissividade	Tile	1000m	8 dias
MYD11C2	Aqua	Temperatura superficial e emissividade	CMG	5600m	8 dias
MOD11C2	Terra	Temperatura superficial e emissividade	CMG	5600m	8 dias
MYD11_L2	Aqua	Temperatura superficial e emissividade	Swath	1000m	5 min
MCD12Q1	Terra/ Aqua	Tipo de cobertura de solo	Tile	500m	Anual
MCD12C1	Terra/ Aqua	Tipo de cobertura de solo	CMG	5600m	Anual
MCD12Q2	Terra/ Aqua	Cobertura de solo dinâmica	Tile	500m	Anual
MOD12Q2	Terra	Cobertura de solo dinâmica	Tile	1000m	Anual
MOD17A2	Terra	Produção primária bruta	Tile	1000m	8 dias
MCD43C2	Terra/ Aqua	BRDF-Albedo neve- Qualidade	CMG	5600m	16 dias
MCD43A2	Terra/ Aqua	BRDF-Albedo Qualidade	Tile	500m	16 dias
MCD43A1	Terra/ Aqua	BRDF-Albedoparâmetros de modelo	Tile	500m	16 dias
MCD43B1	Terra/ Aqua	BRDF-Albedoparâmetros de modelo	Tile	1000m	16 dias
MCD43C1	Terra/ Aqua	BRDF-Albedoparâmetros de modelo	CMG	5600m	16 dias
MCD43B3	Terra/ Aqua	Albedo	Tile	1000m	16 dias
MCD43C3	Terra/ Aqua	Albedo	CMG	5600m	16 dias
MYD13C2	Aqua	Índices de vegetação	CMG	5600m	Mensal
MOD13C2	Terra	Índices de vegetação	CMG	5600m	Mensal
MYD13C1	Aqua	Índices de vegetação	CMG	5600m	16 dias
MOD13C1	Terra	Índices de vegetação	CMG	5600m	16 dias
MYD13A3	Aqua	Índices de vegetação	Tile	1000m	Mensal
MOD13A3	Terra	Índices de vegetação	Tile	1000m	Mensal
MYD13Q1	Aqua	Índices de vegetação	Tile	250m	16 dias
MYD13A2	Aqua	Índices de vegetação	Tile	1000m	16 dias
MOD13A2	Terra	Índices de vegetação	Tile	1000m	16 dias
MYD13A1	Aqua	Índices de vegetação	Tile	500m	16 dias
MCD43B2	Terra/ Aqua	BRDF-Albedo Qualidade	Tile	1000m	16 dias

MYD11A2	Aqua	Temperatura superficial e emissividade	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MCD45A1	Terra/ Aqua	Área queimada	<i>Tile</i>	500m	Mensal
MOD11A1	Terra	Temperatura superficial e emissividade	<i>Tile</i>	1000m	diário
MOD44B	Terra	Campo de vegetação contínua	<i>Tile</i>	250m	Anual
MOD12Q1	Terra	Tipo de cobertura de solo	<i>Tile</i>	1000m	Anual
MOD14	Terra	Anomalia termal e queimada	<i>Swath</i>	1000m	5 min
MOD17A3	Terra	Produção primária bruta	<i>Tile</i>	1000m	Anual
MCD15A2	Terra/ Aqua	IAF - FPAR	<i>Tile</i>	1000m	8 dias
MOD13A1	Terra	Índices de vegetação	<i>Tile</i>	500m	16 dias
MCD43A3	Terra/ Aqua	Albedo	<i>Tile</i>	500m	16 dias
MOD11_L2	Terra	Temperatura superficial e emissividade	<i>Swath</i>	1000m	5 min
MOD09GA	Terra	Reflectância da superfície Bandas 1–7	<i>Tile</i>	500/1000m	diário

Fonte: (LPDAAC-TEAM, 2011)

Os produtos apresentados no Quadro 2-1 estão disponíveis para todo globo e são distribuídos em formato de grade de modelo climático (*CMG*), varredura de satélite (*Swath*) ou em *Tiles* conforme apresenta a Figura 2-2.



Fonte: (LPDAAC-TEAM, 2008)

Figura 2-2: esquema de organização das imagens MODIS para download (*Tiles*).

2.12 Características do Banco de Dados PostgreSQL / PostGIS Raster

Para a seleção dos dados utilizados na elaboração e validação dos modelos, teve-se que organizá-los de forma que houvesse o mínimo de erro possível ocasionado na manipulação dos mesmos. Sendo assim optou-se por utilizar um banco de dados que suportasse o volume e o tipo dos dados e a complexidade de consultas geoespaciais.

O banco de dados PostgreSQL foi habilitado com extensão PostGIS Raster conforme descrito em ATAÍDE e BAPTISTA (2011) e AREVALO (2011), o qual apresentou os requisitos necessários para instalação das bibliotecas capazes de possibilitar o PostgreSQL armazenar vetores e imagens georreferenciados com valores de até 16 bits e realizar consultas topológicas cruzando esses tipos de dados geoespaciais.

Os dados das estações meteorológicas foram inseridos como dados pontuais no banco de dados com suas respectivas informações geográficas em WGS84, código da estação e datas de aquisição dos dados, como *ANO*, *MÊS*, *DIA*, *HORA* e *DOA* (*Dia em Ordem do Ano*) para que houvesse controle dessas variáveis em consultas posteriores.

As imagens de satélites após serem empilhadas em formato *GEOTIFF* por produto como, MYD11A1, MYD09GA e MCD12C1 foram armazenadas no banco de dados com seus respectivos valores originais com informação geográfica em WGS84, assim como, suas informações de *ANO*, *MÊS*, *DIA*, *HORA* e *DOA*.

Para o armazenamento adequado da imagem no banco de dados são necessários alguns procedimentos para que a mesma fique ativa para o tipo de consulta topológica necessária OSGEO (2011).

O PostgreSQL é um sistema gerenciador de banco de dados objeto-relacional código aberto e de grande porte que oferece suporte a dados espaciais por meio de sua extensão PostGIS para vetores e Raster para dados matriciais, como as imagens de satélite, segundo as especificações do OpenGis (*Simple Features Specification for SQL*) (POSTGIS, 2012), permitindo uso de linguagem SQL, procedimentos, funções e consultas complexas entre

tabelas e outras características, tornando possível o relacionamento entre tabelas com dados espaciais como vetores e matrizes.

O PostGIS adiciona suporte a objetos geográficos para o PostgreSQL, permitindo que haja acesso indiretamente através de aplicações externas (*Back-end*) como php, java, Net, C# e outras ferramentas que possam gerenciar uma interface de comunicação entre o usuário e o banco de dados, muito parecido com SDE da ESRI ou a extensão Spatial da Oracle.

O PostGIS segue o OpenGIS sendo certificado como compatível com os "Tipos e funções" e foi iniciado pela *Refractions Reserach* como um projeto em banco de dados espacial com tecnologia de código aberto e liberado sob a licença da *GNU Public License*.

O PostGIS foi desenvolvido pela *Refractions Research* (RESEARCH, 2008), como um projeto em tecnologia de banco de dados espaciais de código aberto e liberado sob a licença da GNU (*General Public License*) (GNU, 2007) e continua em desenvolvimento onde tem sido acrescentado ferramentas de interface para usuário, suporte a topologia básica, validação de dados, transformação de coordenadas, APIs de programação entre outros, há também, suporte à topologia completa, suporte de varredura, redes e roteamento, superfície tridimensional, curvas, *splines* e outras características (POSTGIS, 2012).

Para instalação da biblioteca com suporte a raster é necessário ter instalado o PostgreSQL e a extensão espacial PostGIS, conforme descrito por (ATAIDE e BEZERRA, 2010).

O PostGIS Raster insere o tipo RASTER como tipo *GEOMETRY* implementado no PostGIS e oferece um conjunto de funções SQL (como *intersects*) que operam de forma integrada em vetores e raster, onde *RASTER* é um novo tipo de coluna, assim como o tipo *GEOMETRY* do PostGIS, para uma camada de raster, do mesmo modo como uma camada de vetor no PostGIS, uma linha da tabela com uma coluna do tipo raster contendo um *tile* assim como uma linha de características do vetor no PostGIS (OBE e HSU, 2011).

Os vetores de municípios, regiões, bacias hidrográficas, etc. e as imagens são inseridas nesse banco de dados com suas características originais para consulta, mantendo a resolução espacial, valores dos pixels de

cada banda, quantidade de bandas múltiplas, resolução de até 16 bits, informações geográficas, atribuição de valores nulos para pixels indesejados entre outras permitindo interagir valores de pixel da imagem com determinada área de interesse do usuário inserida em formato de vetor nesse banco de dados, além de suas operações matemáticas.

Cada *tile* raster tem especificações de tamanho do pixel, largura e altura, georreferenciamento, número de bandas, tipo de pixel por banda e valor de pixels *no data* por banda, as quais são essenciais para realizar operações básicas de GIS raster. Para inserir uma imagem nesse banco de dados é utilizado um programa em python, que é semelhante ao shp2pgsql.exe chamado raster2pgsql.py. Isso possibilita a conversão de raster para geometria, introduz raster como construtor de geometria, onde não há necessidade de se preocupar se está trabalhando com raster ou vetor em funções de análise, operações geométricas, armazenamento de raster dentro do banco de dados como WKB, para operações de análise eficiente entre camadas vetor e raster, ou fora do banco de dados, para desktop e aplicações web que podem ser acessados rapidamente e carregar tiles, beneficiando os índices espaciais GIST do PostGIS.

Conforme OBE e HSU (2011) os tipos de dados geográficos do PostGIS são textuais no formato WKT (*Well-KnowText*).

- a. *Point*: (0 0 0),
- b. *LineString*: (0 0, 1 1, 2 2);
- c. *Polygon*: ((0 0 0, 4 0 0, 4 4 0, 0 4 0, 0 0 0), (1 0 0, ...), ...)
- d. *MultPoint*: (0 0 0, 4 4 0)
- e. *MultLineString*: ((0 0 0, 1 1 0, 2 2 0), (4 4 0, 5 5 0, 6 6 0))
- f. *MultiPolygon*: (((0 0 0, 4 0 0, 4 4 0, 0 4 0, 0 0 0), (...),...), ...)
- g. *GeometryCollection*: (POINT(2 2 0) e
- h. *Linestring*((4 4 0, 9 9 0))

Cada função SQL PostGIS Raster permite que um raster dentro do banco de dados trabalhe perfeitamente com raster armazenado fora do banco de dados. Introduz o conceito de objetos raster com características geográficas armazenadas com *tiles* de tamanhos variados ao invés de polígonos e conversão de vetor para raster sem perda de informação. O PostGIS Raster é

muito mais simples que PGRaster e Oracle GeoRaster, pois suporta apenas um tipo, onde não existe diferença entre raster e *tiles*. Um tile é um raster e vice-versa, por exemplo, uma linha é um tile que por sua vez é um raster; uma tabela é uma camada raster; sem metadados; sem máscara, sem múltiplas dimensões, apenas x e y, mas sem confundir com bandas, pois o PostGIS Raster suporta multibandas raster sem pirâmides (OBE e HSU, 2011).

Devido a essas características utilizaram-se as funções do PostgreSQL com extensão PostGIS Raster para inserção e manipulação dos dados coletados durante o período de quatro anos das várias imagens de satélites e das diversas estações meteorológicas distribuídas no bioma do Cerrado brasileiro, o que propiciou bastante agilidade na consulta dos dados cruzados de estações com imagens de satélite.

2.12.1 Dados no SGBD PostgreSQL / PostGIS Raster

Para consulta espacial dos dados foi necessária a inserção de cada estação meteorológica e suas respectivas referências geográficas para que fosse possível elaborar consultas usando funções inerentes ao PostGIS.

As funções *st_contain*, *st_intersection*, *st_intersects*, *st_convexhull*, *st_distance*, *st_buffer*, *st_asbinary* entre outras, são exemplos de funções dentro do PostGIS que foram muito úteis para selecionar as estações que estavam posicionadas dentro de área do bioma Cerrado com vegetação do tipo Savana que por vez se encontrava localizado dentro da área delimitada pelo *tile* h13v10 dos produtos MODIS, que abrange grande parte do Centro-Oeste do Brasil.

Para que esse tipo de consulta seja possível é necessário que a entrada da posição geográfica de cada estação seja do tipo pontual (*POINT*) dentro de um campo espacial do tipo geométrico ou geográfico (*GEOMETRY* ou *GEOGRAPHY*).

Para elaboração da tabela contendo a informação geográfica de cada estação meteorológica adotaram-se os passos descritos conforme RACINE (2011).

2.12.2 Vetor e imagem de satélite no SGBD PostgreSQL / PostGIS

Raster

Para inserção de uma imagem no banco de dados, é necessário inicialmente que a mesma esteja no formato SQL, sendo assim, para a conversão de uma imagem de satélite para um arquivo com extensão SQL utiliza-se o programa *raster2pgsql.py*, o qual possui sub comandos que podem ser listados com o comando *raster2pgsql.py -help* no *prompt* de comando.

A opção *-r* indica a série de raster que será carregada para o banco de dados. Pode-se usar **,?*, e o conjunto de caracteres expressados com *[]* como em sistema UNIX.

A opção *-t* especifica o nome da tabela que será carregada para o banco de dados.

A opção *-s*, idêntica ao *shp2pgsql.exe*, é requerida para especificar o ID do sistema de referência espacial (EPSG). Neste caso, o raster está em "WGS84" tendo o número do SRID igual a 4326.

A opção *-k* especifica o tamanho dos blocos(tiles) que serão carregados para o PostGIS. Para melhor desempenho, o tamanho dos blocos deve ser divisor do tamanho do raster. Nesse caso, o raster original possui X = 2.920 colunas e Y = 2.320 linhas que são também múltiplos de 40.

Sendo assim, é possível criar *tiles* com dimensão resultante da divisão do raster original por 40, ficando cada *tile* com dimensão de X = 73 colunas e Y = 58 linhas, permitindo uma varredura mais eficiente, ou seja, agora temos 40x40 tiles, onde cada um contém uma parte da imagem original com 73 colunas por 58 linhas.

A opção *-I* diz ao sistema gerenciador do banco de dados para criar um índice espacial sobre a varredura. O índice é muito importante, pois permite PostGIS Raster restringir seus esforços de computação apenas para as peças envolvidas em uma operação espacial. Neste estudo, por exemplo, as operações de intersecção foram feitas somente sobre os pixels que realmente se cruzam com os pontos de estações meteorológicas, sendo mais rápido para procurar os blocos espacialmente indexados do que experimentá-los um após o outro em sequência na tabela de varredura.

Para a consulta das estações que estavam em área do Bioma Cerrado, utilizaram-se os mapas temáticos elaborados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE disponíveis para download em IBGE-MAPAS (2010) no formato vetorial *shapefile* da *ESRI* com extensão *SHP*.

Foram adicionados ao banco de dados: os mapas de vegetação, tipo de solo, clima, relevo, biomas, *tile* da área de estudo, estações meteorológicas e as imagens de satélites.

Devido à necessidade de se obter informações pontuais mais precisas que representasse com maior fidelidade as características do ambiente de cada estação, elaborou-se a consulta pontual do pixel onde a estação foi posicionada (Figura 2-3).

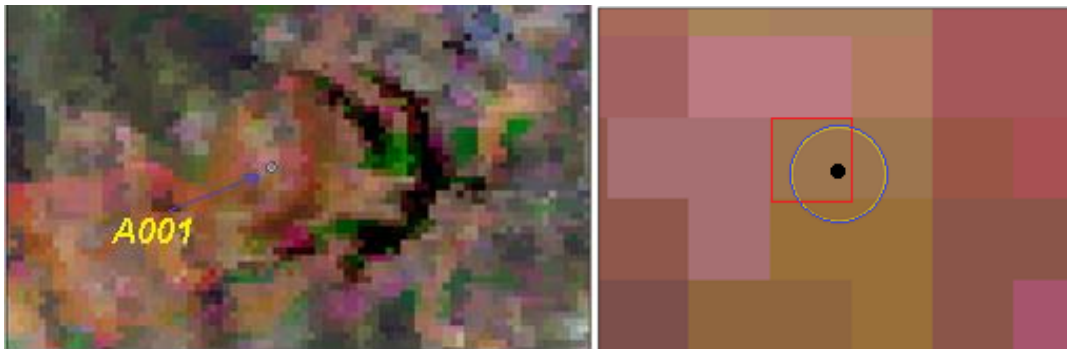


Figura 2-3: Buffer com raio de 0,5 km na estação A001 sobreposto a uma imagem com resolução espacial de aproximação 1 km.

2.13 Análise estatística dos dados

Para a elaboração dos modelos de regressão para evapotranspiração real relacionada com *RG*, *LST* e com índices de vegetação (*EVI* e *NDVI*), a análise estatística dos dados foi baseada na formalização de diversos modelos de regressão lineares e não lineares unificados no Método dos Modelos Lineares Generalizados (*MLG*), o qual está vinculado a ideia de uma família exponencial de distribuições de probabilidades associadas a variáveis aleatórias (DOBSON, 2002).

2.13.1 Modelos Lineares Generalizados

A grande potencialidade obtida com o advento do *MLG* é denotar diversos modelos de regressão sob uma estrutura matemática unificada, que mantém a parte estrutural linear do modelo de regressão mesmo quando a função de resposta do modelo é essencialmente não linear,

No contexto dos Modelos Lineares Generalizado, a escolha da função de ligação depende da natureza da variável aleatória resposta a ser considerada no modelo (DOBSON, 2002).

Tendo em vista que o presente estudo visa identificar a relação existente entre a evapotranspiração real e outras variáveis, como *LST*, índices de vegetação como *NDVI*, *EVI* e *RG* que representam o ambiente em torno de cada estação meteorológica, lança-se mão de casos particulares dos Modelos Lineares Generalizados, como os métodos estatísticos de Regressão Linear Simples e Múltipla.

2.13.2 Modelos de regressão linear simples e múltipla

Segundo CHATTERJEE e PRICE (1991), a análise de regressão visa modelar matematicamente o relacionamento entre uma variável resposta e uma ou mais variáveis explicativas (também chamadas variáveis preditoras).

No que concerne ao relacionamento entre as variáveis, o modelo matemático a ser desenvolvido depende diretamente do fenômeno estudado. Assim, pode-se dizer que este relacionamento funcional é um relacionamento

determinístico, exato, uma vez definido o valor preditor, univocamente a variável dependente pode ser determinada (CHATTERJEE e PRICE, 1991).

Em presença de incerteza, um modelo matemático $Y=f(x)$ exprimindo o relacionamento entre as variáveis X e Y corresponde, a uma aproximação para esse relacionamento, ou seja, existe um padrão sistemático identificável que rege a variação de Y em função de X, mas não é exato, pois há a presença de incerteza em relação aos valores para Y em função de X (DOBSON, 2002).

Os modelos de regressão são formulados como possuindo essas características. O mais simples e imediato dos submodelos dos Modelos Lineares Generalizados é o modelo de regressão linear simples, que é funcionalmente linear na única variável explicativa e nos parâmetros, e pode ser formalizado conforme segue (NETER *et al.*, 1996).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i$$

Equação 2-13

Onde Y_i : valor da variável resposta para a i-ésima observação, X_i : valor da variável explicativa para a i-ésima observação, β_0 e β_1 : parâmetros (coeficientes de regressão), ϵ_i : termo de erro aleatório associado à i-ésima observação. Nesse modelo assumem-se ϵ_i 's independentes e $\epsilon_i \sim N(0, \delta^2)$. Os pressupostos do modelo anterior são:

- a. Que os termos de erros (ϵ_i) são variáveis aleatórias independentes entre si, e que se distribuem identicamente, sob a distribuição Normal, com média zero e variância (δ^2), para quaisquer níveis de X (BARRETO, 2011).
- b. Que para a faixa de valores de X e Y abrangida pelos dados observados, que representa o escopo da regressão, a equação linear provê uma aproximação para o relacionamento entre X e Y, sendo que o termo do erro aleatório ϵ_i responde justamente pelo desvio inerente a esta aproximação, mesmo com o ajuste funcional proporcionado pelo modelo matemático, há incerteza em relação aos valores exatos de Y em função dos valores para X (BARRETO, 2011).

Segundo BARRETO (2011) cada Y_i corresponde a uma variável aleatória que segue uma distribuição de probabilidade com média (valor esperado) variando em função de X , $[E(Y_i)=\beta_0 +\beta_1X_i]$, e variância constante, (δ^2) , para quaisquer valores de X . Como o termo de erro ϵ_i é normalmente distribuído, Y_i também segue uma distribuição Normal, pois β_0 e β_1 são parâmetros e X_i é uma constante. Dessa forma, assume-se que os valores para a variável explicativa são constantes conhecidas, ou seja, X não representa uma variável aleatória, embora haja modelos de regressão mais sofisticados que incorporem esta possibilidade.

Em regressão a variável Y também é comumente referida como variável dependente, ou seja, a evapotranspiração real (ETR) e X como variável independente (*EVI, NDVI, LST e RG*).

Uma regressão múltipla de primeira ordem, linear na parte estrutural das variáveis explicativas, apresenta-se uma formulação similar à da Equação 2-13 anterior, porém com mais de uma variável explicativa na equação de regressão. Um modelo contando com $p-1$ variáveis explicativas (preditoras) e p parâmetros é formalizado conforme segue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \epsilon_i$$

Equação 2-14

Onde Y_i : valor da variável resposta para a i -ésima observação, X_i : valor da variável explicativa para a i -ésima observação, β_k ($k=0, 1, \dots, p-1$): parâmetros (coeficientes) de regressão), ϵ_i : termo de erro aleatório associado à i -ésima observação. Nesse modo assumem-se ϵ_i 's independentes e $\epsilon_i \sim N(0, \delta^2)$.

2.13.3 Estimação em regressão Linear simples e múltipla

A ideia em análise de regressão linear simples é, então, estimar os parâmetros da equação de regressão (β_0 e β_1) por meio de algum processo de estimação e, obviamente, dos dados de trabalho. A estimação por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) vem a ser a de utilização mais imediata em estatística, sendo aplicável para os modelos de regressão simples e múltipla.

A partir das estimativas para os coeficientes, outras inferências em Regressão Linear Simples e Múltipla possuem destaque em análise de regressão, encontrando-se ampla gama de possibilidades em termos de inferências (NETER *et al.*, 1996).

Apresentam a seguir uma seleção e síntese das inferências mais importantes, que foram consideradas e suficientes para atender as necessidades da pesquisa.

2.13.3.1 Análise de variância e coeficiente de determinação

A análise de variância permite que sejam apartadas as variâncias explicadas e não explicada por meio da reta de regressão. A variância em questão refere-se à variabilidade para as observações Y. Quanto maior a variância explicada pelo ajuste, melhor será a estimativa de Y com base X. Para que esta análise se cumpra, é necessário que sejam calculadas somas de quadrados de especial interesse, os quais sejam, Soma de Quadrados Total (SQT), Equação 2-15, Soma de Quadrados da Regressão (SQR), Equação 2-16 e Soma de Quadrados dos Erros (SQE), Equação 2-17, formalizadas com base nos valores observados (Y_i), valores ajustados (\hat{Y}_i) e média estimada para Y (\bar{Y}) conforme segue:

$$SQT = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

Equação 2-15

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

Equação 2-16

$$SQE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Equação 2-17

A soma dos quadrados total, SQT, representa a variabilidade total observada para os valores de Y. SQR totaliza a parcela desta variabilidade que foi explicada pela regressão, pois toma por base os afastamentos dos valores ajustados, \hat{Y}_i , em relação ao referencial, a média \bar{Y} . SQE responde pela variabilidade não explicada, pois envolve os desvios das observações Y_i em relação aos valores ajustados \hat{Y}_i , é a parcela que contabiliza a incerteza do modelo matemático de regressão. Estes valores respeitam o seguinte balanço: $SQT = SQR + SQE$, sendo que SQT é uma constante, dada uma determinada amostra de dados.

O fracionamento da variância em termos de SQT, SQR e SQE possui sua correspondência em termos dos graus de liberdade (*gl*) associados a cada uma dessas parcelas. O conceito de graus de liberdade em estatística repousa em fontes de variabilidade, portanto, tem-se de ponderar quantos pontos independentes é fonte de variabilidade e quantos parâmetros estimados intermediários estão envolvidos nos cálculos de cada uma das variâncias acima. Nesse contexto, SQT está associado a $(n-1)gl$, um grau de liberdade em relação ao número total de observações disponíveis é perdido, haja vista que para o seu cálculo é necessário estimar o valor para a média \bar{Y} . SQR associa-se a $1gl$ apenas, pois embora existam n desvios de valores ajustados em relação à média, todos eles baseiam-se na reta de regressão e seus dois graus de liberdade (correspondentes ao intercepto e à inclinação estimados que definem a reta de regressão), e um grau de liberdade é perdido pela necessidade de se subtrair \bar{Y} do cálculo de SQR. Finalmente, SQE está associado a $n-2 gl$, pois embora haja n desvios de valores ajustados em relação aos valores observados, dois graus de liberdade são perdidos em função das estimativas para o intercepto e a inclinação da reta de regressão. Com os respectivos graus de liberdade, podem-se obter as somas de quadrados médios (BARRETO, 2011):

$$QMT = \frac{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}$$

Equação 2-18

$$QMR = \frac{SQR}{1}$$

Equação 2-19

$$EQM = \frac{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 2}$$

Equação 2-20

É desejável que SQR seja o maior possível, pois significa formalmente a redução ao máximo de incerteza em relação aos valores de Y, com base no modelo de regressão compondendo a variável X. Com o ímpeto de avaliar a magnitude de SQR em relação a SQT, é de especial interesse calcular o coeficiente de determinação (R^2), Equação 2-21, que mede a proporção da variabilidade total observada para Y que é explicada pela reta de regressão de Y sobre X (KELLEY e MAXWELL, 2003), (DAVDSON e MACKINNON, 1993):

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT}$$

Equação 2-21

O coeficiente de determinação varia entre 0 e 1. Se $R^2=1$, o ajuste linear aos dados é perfeito, há uma regressão perfeita, e toda variabilidade de Y pode ser explicada pela reta de regressão em função de X, sendo que $\hat{Y}_i = Y_i$; se $R^2=0$, a regressão não consegue explicar qualquer parcela da variabilidade de Y (CHATTERJEE e PRICE, 1991).

No caso de regressão linear simples, a raiz quadrada do coeficiente de determinação resulta no coeficiente de correlação, r, entre Y e X, que assume valores entre -1 e 1, sendo que o sinal do coeficiente é atribuído em função da inclinação da reta de regressão (b_1) (Equação 2-22) for negativo ou positivo (CHATTERJEE e PRICE, 1991):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Equação 2-22

O coeficiente de correlação mede o grau de associação linear entre as duas variáveis. Valores elevados para r são desejáveis em análise de regressão, na medida em que isso indica formalmente que há um alto grau de linearidade entre X e Y , o que, pode favorecer a estimação de modelos lineares de regressão bem ajustados. Além disso, em regressão linear simples o coeficiente de correlação (r) representa uma medida do grau de ajustamento linear da reta de regressão.

Cabe observar que, um valor elevado para r ou R^2 não significa estritamente que as estimativas proporcionadas pelo modelo de regressão sejam satisfatórias, considerando sua aplicabilidade prática. Deve-se considerar que o modelo matemático de regressão é probabilístico, e que ao estimar valores pontuais para resposta Y assume-se que há um grau de incerteza envolvendo este resultado, e que deve ser mensurado de algum modo. Assim, quanto à avaliação da precisão das estimativas, devem-se analisar outras inferências obtidas a partir do modelo de regressão, especialmente intervalos de confiança.

Quando se trata de análise de variância em regressão múltipla, os valores das somas de quadrados, SQT, SQR e SQE possuem o mesmo significado já apresentado em relação à regressão linear simples, porém há diferenças em relação aos graus de liberdade: SQT associa-se a $(n-1)$ gl, como em regressão simples; SQR a $(p-1)$ gl e SQE a $(n-p)$ gl, sendo p o número de parâmetros do modelo de regressão múltipla (BARRETO, 2011).

Assim, SQT mantém a mesma notação da equação da SQT (Equação 2-15), mas QMR e EQM exprimem-se, respectivamente, por:

$$QMR = \frac{SQR}{p - 1}$$

Equação 2-23

e

$$EQM = \frac{SQR}{n - p}$$

Equação 2-24

Em regressão com mais de uma variável explicativa, o coeficiente de determinação R^2 , exprime o quanto da variabilidade total para as observações

Y é reduzida com advento do modelo de regressão contando com p-1 variáveis explicativas. Em regressão múltipla, o coeficiente de determinação também varia entre 0 e 1, sendo que, valores próximos de 1 sugerem o bom ajuste da superfície de regressão aos dados observado, deve-se considerar que agora a referência é em relação a uma superfície de regressão, a três ou mais dimensões, e não mais a uma reta a duas dimensões.

São necessárias análises adicionais, principalmente fundadas em intervalos de confiança e na avaliação dos erros de predição / estimativa mesmo havendo um valor elevado para R², que não significa estritamente que as estimativas proporcionadas pelo modelo de regressão múltipla sejam satisfatórias em termos de aplicabilidade prática, no caso de regressão múltipla, a quantidade de variáveis mascara em certo sentido a interpretação tomada a partir de um coeficiente de determinação calculado nos moldes de R². De fato, um valor mais elevado para R² deve-se a inclusão de mais variáveis preditoras no modelo de regressão. No entanto, não significa necessariamente um melhor ajuste de regressão aos dados nem maior precisão. Além disso, a inclusão de mais uma variável no modelo pode acarretar problemas de multicolinearidade e especificação que impactem justamente no ajuste e na precisão do modelo.

E ainda, em última análise, a qualidade de um modelo de regressão não é medida de forma alguma pelo número de variáveis nele incorporadas. Por estes fatores, uma medida do grau de ajustamento que leve em consideração o número de variáveis incluídas no modelo deve ser considerada, no mínimo por questões de parcimônia, e também para fins de comparação entre modelos com números distintos de parâmetros (p) incorporados ao modelo de regressão.

Esta medida é o coeficiente de determinação ajustado, que é obtido pela divisão das somas de quadrados por seus respectivos graus de liberdade, conforme segue:

$$R_a^2 = 1 - \frac{\frac{SQE}{n-p}}{\frac{SQT}{n-1}}$$

Equação 2-25

O detalhe importante é que a inclusão de uma variável adicional no modelo de regressão pode fazer o valor para R_a^2 diminuir, ao invés de aumentar.

Deve-se frisar que embora o coeficiente de correlação (r) e os coeficientes de determinação (R^2) para regressão linear simples e múltipla se constituam em medidas quantitativas do grau de ajustamento do modelo linear aos dados de estimação, em análise de regressão estes valores devem ser considerados com certa cautela, e a título de indicação, pois valores elevados calculados para estas medidas não necessariamente, e ato contínuo, significam que os dados se ajustam bem ao modelo estimado.

Análises adicionais realizadas na fase de diagnóstico que se encarregam de detalhadamente avaliar a qualidade e adequação do ajustamento do modelo estimado.

2.13.3.2 Estimativa pontual e Intervalo de confiança para E(Y)

Pelo modelo $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i$ supõe-se que cada Y_i se distribua sob a distribuição Normal de probabilidades, com média $E(Y_i)$ e variância σ^2 . Assim, tanto em regressão linear simples quanto em regressão múltipla um dos interesses finalísticos é estimar a resposta esperada para a regressão, $E(Y)$, dado(s) determinado(s) valor(es) para a(s) preditor(a)s.

No caso do presente estudo, pretende-se encontrar valores de evapotranspiração para qualquer ponto específico dentro da área com característica do bioma Cerrado podendo ainda residir em estabelecer um intervalo de 95% de confiança para $E(Y)$.

Generalizando para quaisquer valores de X , a reta de regressão para o modelo $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i$ é, por consequência $Y = \beta_0 + \beta_1 X$. Assim, a resposta esperada para a função de regressão dado um determinado nível X_h é:

$$E(Y_h) = \beta_0 + \beta_1 X_h$$

Equação 2-26

Para a regressão múltipla, tem-se que a resposta média equivale a:

$$E(Y_h) = X_h^T \beta$$

Equação 2-27

Onde $X_h^T = [1, X_{h1}, \dots, X_{(h, p-1)}]$, e a estimativa não viesada para $E(Y_h)$ é, então:

$$(\hat{Y}_h) = X_h^T b$$

Equação 2-28

Cuja variância é obtida em função da matriz de variância-covariância do vetor b , em $\sigma^2(b) = \sigma^2(X^T X)^{-1}$ para:

$$\sigma^2(\hat{Y}_h) = X_h^T \sigma^2(b) X_h$$

Equação 2-29

E a estimativa para a variância em $\sigma^2(\hat{Y}_h) = X_h^T \sigma^2(b) X_h$ é obtida da seguinte forma:

$$\hat{\sigma}^2(\hat{Y}_h) = X_h^T \hat{\sigma}^2(b) X_h$$

Equação 2-30

De posse do valor $\hat{\sigma}^2(\hat{Y}_h) = X_h^T \hat{\sigma}^2(b) X_h$, o IC de 95% para $E(Y_h)$ é obtido, como segue:

$$\hat{Y}_h - t(0, 975; n - p) \hat{\sigma}(\hat{Y}_h) \leq E(Y_h) \leq \hat{Y}_h + t(0, 975; n - p) \hat{\sigma}(\hat{Y}_h)$$

Equação 2-31

Onde p é o número de parâmetros incorporados ao modelo de regressão.

2.13.3.3 Intervalo de predição para uma nova observação

O fato de se considerar uma nova observação independente dos dados de estimação implica que, ao se estabelecer um intervalo de predição para

$Y_{h(\text{novo})}$, deve ser considerada uma incerteza adicional em relação ao IC estabelecido para $E(Y_h)$, pois em

$$\hat{Y}_h - t(0,975; n - 2)\hat{\sigma}(\hat{Y}_h) \leq E(Y_h) \leq \hat{Y}_h + t(0,975; n - 2)\hat{\sigma}(\hat{Y}_h)$$

Equação 2-32

Tem o intervalo de confiança para a locação da média da distribuição de Y , e agora se deve estabelecer um intervalo de predição para um resultado específico (novo) realizado a partir desta distribuição e sua variância associada, o que resulta em um intervalo mais amplo do que o exposto acima.

Para o modelo de regressão múltipla tem-se que:

$$\hat{\sigma}^2(\text{pred}) = EQM + \hat{\sigma}^2(\hat{Y}_h) = EQM[1 + X_h^T(X^T X)^{-1}X_h]$$

Equação 2-33

Onde

$$\hat{\sigma}(\text{pred}) = \sigma^2 + \sigma^2(\hat{Y}_h)$$

Equação 2-34

Sendo assim, o intervalo de predição de 95% para $Y_{h(\text{novo})}$, no caso de regressão múltipla, pode ser estabelecido como:

$$\hat{Y}_h - t(0,975; n - p)\hat{\sigma}(\text{pred}) \leq Y_{h(\text{novo})} \leq \hat{Y}_h + t(0,975; n - p)\hat{\sigma}(\text{pred})$$

Equação 2-35

O intervalo de predição (IP) de 95% para um novo valor $Y_{h(\text{novo})}$, reconhece-se que 95% das realizações individuais para Y são abrangidas pelos limites do intervalo de predição estabelecido e, portanto, considera-se (com 95% de confiança) que a predição para a nova observação $Y_{h(\text{novo})}$ localizar-se-á nesta faixa.

2.13.3.4 Diagnóstico

Diagnóstico em análise de regressão refere-se a avaliar se o modelo de regressão formulado para uma determinada análise ou estudo está adequado aos dados levados em consideração. Uma vez obtidas as estimativas para os coeficientes, pode-se verificar se os pressupostos de regressão-linearidade da função de regressão; normalidade, independência e homocedasticidade dos termos de erro se sustentam.

Esse aspecto é muito importante, pois, para um modelo inadequado, certas estimativas são viesadas, suscitando inferências que não são estritamente válidas. Assim, antes que sejam tomadas inferências gerais a partir do modelo estimado, é importante que o diagnóstico seja devidamente evidenciado.

A suposição em relação aos termos de erro é que se distribuam sob a distribuição Normal com média zero e variância constante (σ^2), e também que sejam independentes entre si. Para que estes pressupostos do modelo possam ser avaliados, deve-se introduzir o conceito de resíduo, ou seja, diferença entre o valor observado e o estimado.

O resíduo é, portanto, o erro observável para o ajuste realizado pela função de regressão. Análises de resíduos visam, principalmente, verificar se os resíduos observados e_i seguem os pressupostos formulados previamente, em teoria, para os termos de erro (ε_i) do modelo de regressão em $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$, mas essas análises possuem um escopo mais amplo.

Com base nos resíduos, estudam-se os seguintes pressupostos para o modelo de regressão:

- a. Linearidade da função de regressão;
- b. Homocedasticidade (homogeneidade de variância dos erros);
- c. Independência dos erros;
- d. Normalidade dos erros.

Caso esses pressupostos do modelo de regressão acima não se sustentem, há importantes implicações em termos das inferências proporcionadas pelas estimativas do modelo, onde a não adequação da função linear de regressões aos dados provavelmente implicará em estimativas / previsões de pouca acurácia.

Já os pressupostos para o modelo de regressão, uma vez afastados pelas evidências do diagnóstico, tornam problemática a parte de inferência, pois os testes estatísticos e intervalos de confiança não são mais estritamente válidos.

Quanto à questão da melhoria da qualidade do modelo de regressão ajustado e suas potenciais estimativas e previsões, as análises de resíduos em fase de diagnóstico auxiliam também a aferir se há omissão de variáveis importantes para a explicação da variabilidade da resposta e se há observações *outliers*. Portanto deve-se analisar se:

e. há omissão no modelo de uma ou mais variáveis importantes para a explicação da variabilidade da resposta;

f. há presença de observações *outliers* nos dados de trabalho.

O gráfico de resíduos versus valores ajustados provê basicamente a mesma informação que o gráfico de resíduos versus variável preditora, já que como os valores ajustados são uma função linear dos valores para única preditora, a disposição espacial dos resíduos nos dois gráficos é idêntica, o que muda é apenas a escala para o eixo referente à preditora ou valor ajustado. Tais tipos de gráficos possibilitam estudar se os resíduos formam padrões, curvilíneos, crescente ou decrescente, por exemplo, ou, por outro lado, uma locação aleatória centrada em torno da média, que é zero, tal qual indica a adequação do modelo linear estimado, conforme se apresenta na figura de exemplo, abaixo, para se avaliar a homogeneidade de variância dos termos de erro, os mesmos tipos de gráficos são úteis, pois, havendo distribuição dos resíduos, no gráfico, em termos de uma faixa aproximadamente retangular horizontal centrada no eixo zero, há indicação de homocedasticidade dos termos erro, confirmando ou pelo menos não afastando, essa suposição.

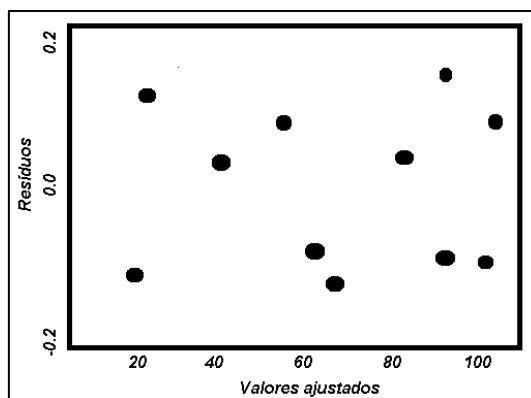


Figura 2-4: Exemplo idealizado para o gráfico de Resíduos versus Valores ajustados.

Para se avaliar a homogeneidade de variância dos termos de erro, os mesmos tipos de gráficos (resíduos versus valores ajustados ou resíduos versus valores para a preditora) são úteis. A distribuição dos resíduos, no gráfico, em termos de uma faixa aproximadamente retangular horizontal centrada no eixo zero indica homocedasticidade dos termos erro, confirmando, essa suposição.

Para padrões como os resíduos alocados em formato geral de megafone ou taça indicam variância crescente ou decrescente à medida que se elevam os valores ajustados ou para a variável preditora, uma variabilidade crescente à medida que se elevam os níveis para X, indicando heterocedasticidade dos resíduos, sugerindo a invalidade da suposição de homocedasticidade envolvendo os termos de erro.

No caso de independência, o gráfico apresentará dispersão aparentemente aleatória da sequência de resíduos em torno do eixo zero.

Quando se apresentam padrões tais como valores crescentes para a sequência de resíduos ou aspectos cíclicos ou curvilíneos, há forte indicação de que erros adjacentes não são independentes entre si, afastando a suposição original do modelo de regressão.

A Figura 2-5 abaixo mostra um padrão na sequência de resíduos que sugere correlação dos erros, haja vista o aspecto curvilíneo geral originado por um forte decréscimo inicial nos valores para os resíduos adjacentes seguido de súbita elevação.

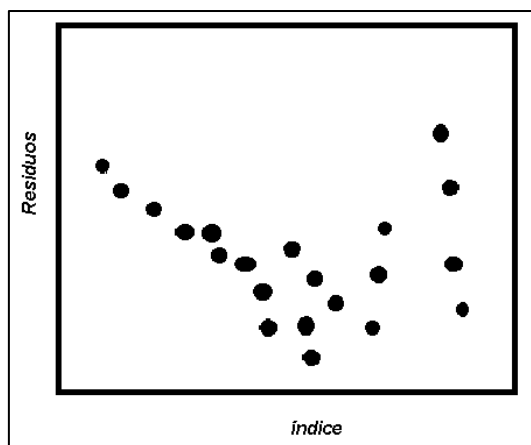


Figura 2-5: Exemplo de um padrão na sequência de resíduos que sugere correlação dos erros, não desejável.

Quanto à suposição de normalidade dos erros, uma maneira mais usual de analisá-la se dá por meio de um gráfico de normalidade de resíduos relacionando os quantis calculados a partir da distribuição dos resíduos observados aos respectivos quantis teóricos associados à distribuição Normal.

Para composição dos gráficos de normalidade a partir das amostras empíricas de dados, utiliza-se a função quantil: $Q(p) = \min\{z \mid \text{proporção } p \text{ dos dados } \leq z\}$. Assim, um gráfico de normalidade de resíduos apresentando aspecto aproximadamente linear e com inclinação de 45 graus indica a sustentação da hipótese de normalidade dos erros de regressão, vale ressaltar, que a amostra de resíduos adere em certo grau à distribuição Normal teórica. Outros padrões degenerativos, que não o linear, sugerem a não normalidade de distribuição para os resíduos.

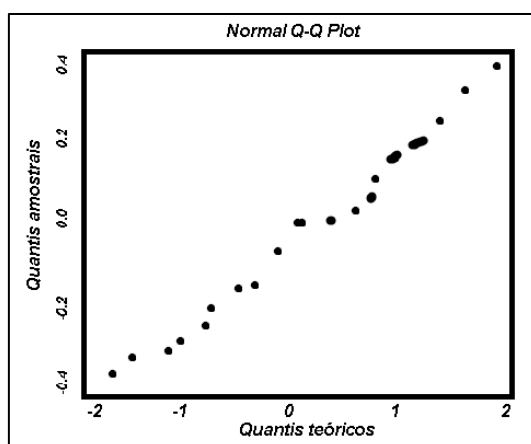


Figura 2-6: Gráfico de Normalidade de resíduos.

Quando a não normalidade dos erros não é severa, não há maiores problemas quanto à confiabilidade e robustez da regressão estimada e suas potenciais inferências, mas à medida que a distribuição dos erros se afasta da distribuição Normal, principalmente quando há fortes assimetrias, mais a regressão e seus resultados inspiram cautela.

Por isso, em associação com os gráficos de normalidade, histogramas de resíduos auxiliam para avaliação específica da simetria em relação à distribuição dos erros de regressão. Outra opção válida é partir para um teste de hipótese de normalidade formal para os resíduos.

Na teoria há diversos testes deste escopo disponíveis, como kolmogorov-smirnov, anderson-darling, cramer–von mises e o teste de normalidade Shapiro-Wilk que não rejeita a hipótese de normalidade para os resíduos plotados na Figura 2-6 (Q-Qplot).

Quanto à avaliação sobre a ausência de variáveis preditoras importantes no modelo, é indicado que se disponha em gráficos os resíduos versus outras possíveis variáveis que sejam suspeitas de ter relação com a resposta. Um padrão de gráfico distinto do apresentado na figura abaixo, que mostra uma nuvem de resíduos dispostos de maneira aproximadamente aleatória em torno do eixo zero, indica que a variável sob avaliação pode e deve ser testada no modelo de regressão.

Em relação à presença de *outliers*, deve-se demarcar que se consideram *outliers* as observações apresentando valores elevados para seus respectivos resíduos. Preliminarmente, quanto à potencial ocorrência de *outliers* em relação ao ajuste da reta de regressão, podem ser avaliados gráficos do tipo box-plot individuais envolvendo as variáveis resposta e explicativas, e também diagramas de dispersão entre a resposta e cada uma das variáveis explicativas, isso em busca de valores extremos tanto para Y quanto para X. Mas para detecção formal de observações *outliers*, são indicados gráficos de resíduos versus valores ajustados ou versus variável explicativa. A ideia é analisar o gráfico procurando identificar resíduos que se situem distantes da média, que é zero no caso dos resíduos, pois $\sum_{i=1}^n e_i = 0$.

É recomendável, que observações *outliers* ou valores discrepantes (extremos) sejam descartados para fins da estimação da regressão somente se

houver evidencias fundamentadas de que se trata de um erro de medição/observação ou envolvam valores considerados muito improváveis.

2.13.3.5 Medidas corretivas e transformações de variáveis

A análise de resíduos é a principal forma de avaliar se os pressupostos de regressão se sustentam, mais especificamente, linearidade da regressão, normalidade, homocedasticidade e independência dos erros, que, em se confirmando, demonstram a adequação do modelo de regressão aos dados de estimação. Porém, caso, um modelo de regressão se demonstre inadequado, recomenda-se a adoção de medidas corretivas visando a uma melhor adequação do modelo.

Nesse caso, são realizadas algumas transformações matemáticas envolvendo as variáveis presentes no modelo.

As transformações de variáveis em regressão múltipla aproveitam-se de muitos dos processos que servem para regressão linear simples, como: transformação envolvendo a variável resposta e a preditora, transformações logaritmo na base 10, logaritmo neperiano, exponencial, elevadas ao quadrado, elevadas ao cubo, raiz quadrada. Caso bem sucedidas as transformações, confere-se maior fidedignidade às estimativas e inferências obtidas.

É indicada uma transformação envolvendo a variável preditora (X) para remediar o caso de não linearidade da relação de regressão, ou seja, há falta de ajuste do modelo estimado aos dados observados, nos casos em que há sustentação para os pressupostos de normalidade e homocedasticidade dos erros.

A transformação da variável resposta (Y) é recomendável nos seguintes casos:

- a. Não linearidade da relação de regressão, em associação com heterocedasticidade ou não normalidade dos erros;
- b. Presença de heterocedasticidade dos erros;
- c. Não normalidade dos erros, pois esta ação pode estabilizar a variância dos resíduos e, colateralmente, conferir maior simetria à distribuição dos mesmos (aproximando a distribuição empírica à distribuição Normal).

Recomenda-se a transformação de ambas variáveis, (X) e (Y) quando:

- a. Transformações efetuadas na variável resposta (Y) ocasionem colateralmente a perda de linearidade da relação de regressão;
- b. Há heterocedasticidade dos erros em presença de distribuições fortemente assimétricas tanto para (X) quanto para (Y).
- c. De maneira geral, observações apresentando valores extremos para (X) ou (Y) sugerem uma transformação logarítmica nestas variáveis, de forma a minimizar o impacto de observações discrepantes no processo de estimação. Deve-se mencionar que variáveis em, modelos de regressão não devem possuir distribuições fortemente assimétricas ou variarem em uma faixa excessivamente ampla, como por exemplo, X_1 variando de 0 a 1 e X_2 variando entre 0 e 5.000, como no caso dos Índices de vegetação e a radiação solar global (MJ.m^{-2}).

A opção pelo logaritmo neperiano homogeneíza em certo grau a escala da variável, reduzindo o impacto de valores extremos nas estimativas dos coeficientes, e torna distribuições assimétricas em distribuições aproximadamente simétricas.

Nos casos de presença de valor zero para a variável a ser transformada, pode-se adicionar a unidade a todos os valores da variável $Y^*=Y+1$, de forma que a transformação logaritmo natural possa ser viabilizada.

Por vezes é necessária a adição de uma constante à variável a ser transformada, antes da aplicação das transformações logarítmica, nos casos em que ela assuma valores negativos.

Neste estudo, a variável resposta, evapotranspiração, pode assumir valores zero em sua observação, porém com intuito de se viabilizar o encontro de relações exponenciais ou logarítmicas com as variáveis preditoras, assumiu-se o valor de 0,0001 para todos os valores de evapotranspiração igual a zero. Transformações na variável resposta Y são úteis nos casos de não-normalidade e heterocedasticidade dos erros. Transformações de variáveis preditoras (X's) auxiliam em casos de heterocedasticidade dos erros frente às

variações em determinada preditora X ou de não-linearidade no relacionamento entre determinada variável preditora X e a resposta Y.

É recomendável que haja transformações tanto na variável resposta Y quanto na(s) preditora(s) X para a redução do impacto de valores extremos e de assimetrias de distribuições. Em regressão múltipla vale também a diretriz geral de que as variáveis envolvidas não devem possuir distribuições apresentando forte assimetria ou variarem em uma faixa excessivamente ampla, daí também a utilidade de transformações para amenizar essas características.

2.13.4 Validação em regressão linear simples e múltipla

Durante o processo de elaboração do modelo foi utilizada a metade de observações e a outra metade foi usada para validação.

A validação em análise de regressão refere-se à avaliação da capacidade preditiva do modelo de regressão estimado frente a novos registros de dados ou observações.

A avaliação deve-se dar à luz de um ou mais critérios quantitativos de avaliação, sendo muito utilizado em regressão simples e múltipla o erro quadrático médio preditivo (EQMP) ou MSE denotado por:

$$EQMP = \frac{\sum_i^{n_v} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n_v - 2}$$

Equação 2-36

$i = 1, 2, \dots, n_v$; onde Y_i : valor da variável resposta para o i-ésimo registro da amostra de validação, \hat{Y}_i : valor da resposta predito pelo modelo estimado para o i-ésimo registro de validação, n_v é o número de registros de dados presentes na amostra de validação.

O ideal é dividir aleatoriamente os registros de dados de trabalho entre amostras de estimação e de validação de mesmo tamanho. Isso, contudo, desde que garantida uma quantidade mínima de registros que varia em função do número de variáveis predictoras constantes no modelo.

Salienta-se que o tamanho da amostra de estimação é fundamental para que seja estimada uma regressão confiável e robusta frente a novas observações.

Os graus de liberdade, em regressão múltipla, a soma de quadrados SQE está associada a $(n-p)$ gl, ou seja, número de observações menos o número de parâmetros do modelo. Assim, se não houver uma amostra de tamanho n suficiente, principalmente no caso de muitas variáveis preditoras, até mesmo a estimação da regressão pode ser inviabilizada (KELLEY e MAXWELL, 2003).

Tendo em vista as inúmeras abordagens a respeito do número mínimo de amostras, uma regra de segurança é que, para variáveis contínuas, como evapotranspiração, a amostra de estimação contenha pelo menos 10 vezes, em termos de observações, o número de variáveis preditoras, assim como amostras muito grandes devem ser evitadas, pois os testes estatísticos para os coeficientes tem propensão a rejeitas a hipótese nula, pois à medida que o tamanho de amostra aumenta, diminui a variabilidade da distribuição amostral para os coeficientes estimados, elevando o valor de suas estatísticas teste.

Sendo assim, o presente estudo atendeu as exigências mínimas, pois foram coletadas 3.361 observações, testando-se modelos com 3 e com 2 variáveis explicativas.

2.13.5 Roteiro para Regressão Linear Simples e Múltipla

Em síntese serão descritas as etapas requisitadas para a análise de regressão linear simples e múltipla adotadas na elaboração do presente estudo.

2.13.5.1 Regressão linear simples

- a. Análise exploratória de variáveis e do relacionamento entre variável explicativa e variável resposta.**

Envolve basicamente o cálculo de estatísticas descritivas individuais e histogramas para as variáveis envolvidas e a análise do relacionamento entre

variável resposta e explicativa, por meio de um diagrama de dispersão. Importantes para pressupor certas medidas necessárias adiante para corrigir eventuais violações aos pressupostos do modelo de regressão.

Assim histogramas que indiquem forte assimetria de distribuição para as variáveis e o diagrama de dispersão podem indicar pela necessidade de transformações.

b. Estimação de um modelo contando com as variáveis em escala original.

c. Diagnóstico da regressão e adoção de possíveis medidas corretivas.

Tendo-se estimado um modelo no passo anterior, procede-se a avaliação dos pressupostos do modelo de regressão pela análise dos resíduos e a adoção de medidas corretivas consideradas adequadas, caso necessário.

Pela análise de resíduos também se pode avaliar se há presença de observações *outliers*. Após cada intervenção corretiva, é necessário reestimar o modelo revisado e efetuar nova fase de diagnóstico, até que seja encontrado um modelo de regressão considerado válido.

d. Obtenção de inferências e interpretações a partir do modelo final.

Extraem-se as principais inferências a partir do modelo de regressão e perfaz a interpretação de seus coeficientes.

e. Validação do modelo final.

Para avaliar quantitativamente a capacidade preditiva do modelo frente a novas observações.

2.13.5.2 Regressão Múltipla

Em regressão múltipla, escolhem-se as variáveis a comporem o modelo levando em consideração, simultaneamente, a opção pela forma funcional de ingresso das variáveis. A forma funcional refere-se especificamente à definição sobre se determinada variável ingressará no modelo em sua forma original ou, por outro lado, transformada, ou sob a forma quadrática, ou ainda se haverá termos de interação entre as variáveis, por exemplo, ingressa-se a variável X como X^2 , $\ln(X)$, $\exp(X)$ etc.

Quando se trata de um número muito elevado de potenciais variáveis preditoras, e devido à forte necessidade de intervenção humana na fase de análise da regressão, uma abordagem circular e iterativa, para a solução da questão sobre quais variáveis efetivamente ingressam no modelo e as respectivas formas funcionais recomendáveis, torna-se impraticável em grande parte das análises, seja por questões de custo quanto de processamento. Por exemplo, 50 variáveis candidatas possibilitam a estimação de 250 modelos de regressão distintos e a estimação e avaliação de toda essa gama de possibilidades está fora do escopo da maior parte das pesquisas. Isso, sem mencionar que para cada modelo possível existem outras diversas possibilidades de formas funcionais a serem avaliadas.

Ademais, existem duas situações cuja presença é fortemente desejável em análise de regressão múltipla: alta correlação entre as preditoras e a variável explicada; e baixa correlação entre as preditoras.

Quando ocorre a multicolinearidade de baixa magnitude, ou não severa, entre as variáveis preditoras, não ocorre maiores distúrbios na regressão. Contudo, uma multicolinearidade severa não é desejável. Primeiramente porque para o modelo de regressão linear simples viu-se que a interpretação para o coeficiente β_1 relativo à variável X é a de que ele corresponde à variação esperada em Y dado um acréscimo unitário em X .

Em regressão múltipla essa interpretação ganha novo aspecto na medida em que o coeficiente para, por exemplo, X_1 corresponde à variação esperada em Y , dado um acréscimo unitário em X_1 , mantidas constantes as demais variáveis preditoras.

No caso das variáveis preditoras serem fortemente correlacionadas entre si, fica difícil sustentar tal interpretação na prática, haja vista que uma alteração unitária em uma determinada variável dificilmente deixaria de estar associada a mudanças nas demais variáveis, perdendo-se assim um dos maiores atributos em análise de regressão, a interpretação dos coeficientes.

Além disso, a multicolinearidade severa ocasiona distúrbios no processo de seleção de variáveis e na estimação dos coeficientes, turbando a formação e avaliação dos possíveis modelos de regressão múltipla. Devem-se mencionar, principalmente, os seguintes distúrbios:

- a. No caso de colinearidade perfeita (uma ou mais das variáveis explicativas exprime-se por uma combinação linear envolvendo alguma(s) das demais variáveis), não se podem obter as estimativas de MQO, pois isso requer a inversão de $X^T X$, e nesta situação essa matriz é mal condicionada ou singular;
- b. Instabilidade nas estimativas para os coeficientes, por exemplo, o coeficiente estimado para uma determinada variável muda de sinal, ou altera sensivelmente de magnitude, com a inclusão ou exclusão de outra(s) variável(is) preditoras no modelo de regressão;
- c. Elevação dos erros padrões para as estimativas dos coeficientes, fazendo com que as variáveis potencialmente significativas para a explicação da resposta apresentem teste t individual não significativo, confundindo o processo de análise e seleção de variáveis por parte do analista. O porquê da elevação dos erros padrões fica claro ao se considerar que, em um modelo contando com duas variáveis preditoras, X_1 e X_2 , as estimativas para as variâncias dos estimadores de β_1 e β_2 são dadas por:

$$\hat{\sigma}_{(b1)} = \frac{EQM}{\sum_i^n (X_{i1} - \bar{X}_1)^2 (1 - r^2)}$$

Equação 2-37

e

$$\hat{\sigma}_{(b2)} = \frac{EQM}{\sum_i^n (X_{i2} - \bar{X}_2)^2 (1 - r^2)}$$

Equação 2-38

Onde r representa o coeficiente de correlação entre X_1 e X_2 ; então claramente quanto maior o r , maior será o erro padrão dos estimadores.

- d. Ademais, como a variabilidade amostral é elevada, os coeficientes estimados tendem a variar substancialmente de amostra para amostra, o que também turba a utilização plena dos intervalos de confiança.

A multicolinearidade severa não é desejável, porém não é totalmente evitada devido à disponibilidade de vários dados para a pesquisa, contudo, correlações acima de 0,8 entre duas variáveis candidatas a preditoras requerem atenção quanto às suas potenciais implicações em termos do processo de ajuste inferências do modelo de regressão.

Os passos adotados para análise de regressão múltipla foram:

- a. **Análise exploratória de variáveis e do relacionamento entre variáveis preditoras e variável resposta.**

Esta etapa envolve basicamente o cálculo de estatísticas descritivas individuais e histogramas para todas as variáveis disponíveis, análise do relacionamento entre preditoras e variável resposta e análise de presença de multicolinearidade entre as preditoras. Neste ponto, podem-se adiantar mentalmente certas medidas necessárias mais a frente para corrigir eventuais violações aos pressupostos do modelo de regressão.

Assim, histogramas que indiquem forte assimetria de distribuição para as variáveis e diagramas de dispersão entre variáveis preditoras e variável resposta podem indicar pela necessidade de transformações. Uma matriz de correlação abrangendo todas variáveis disponíveis auxilia a elucidar se há forte multicolinearidade, alertando o analista sobre eventuais problemas ulteriores de estimação, interpretação e instabilidade dos coeficientes. Ademais, a análise

de multicolinearidade permite que variáveis redundantes sejam eliminadas da análise.

Caso esse número de variáveis preditoras seja elevado, o mais prático e indicado é adotar imediatamente medidas corretivas previamente identificadas na fase exploratória, para redução de fortes assimetrias e minimização do impacto de valores extremos.

Caso seja mais reduzido, até 10 variáveis, o melhor é partir para a estimação de um modelo completo contando com todas as variáveis disponíveis em escala original, já que se torna bastante factível perfazer uma avaliação sobre o efeito individual de cada variável original no modelo de regressão, ao mesmo tempo em que considerando e controlando a presença e a variação das demais variáveis preditoras, incluindo-se aí possíveis efeitos de interação.

O número de variáveis candidatas é determinante em análise de regressão, por exemplo, ao considerar um modelo completo contando com 50 variáveis e querer avaliar o efeito de todas as interações possíveis entre elas ter-se-iam 1.225 possibilidades diferentes a serem testadas, o que se configuraria em um trabalho extremamente laborioso e de factibilidade duvidosa.

- b. Estimação de um modelo completo contando com todas as variáveis em sua escala original.**
- c. Diagnostico da regressão e adoção de possíveis medidas corretivas.**

Deve-se proceder à avaliação dos pressupostos de regressão pela análise dos resíduos e a adoção das medidas corretivas consideradas adequadas (transformações), caso necessário. Pela análise de resíduos também se pode avaliar se há presença de observações *outliers*. Após a adoção de medidas corretivas, variáveis que não se demonstrem significativamente importantes para a explicação da variabilidade da resposta devem ser retiradas do modelo. Após cada intervenção, é sempre necessário

reestimar o modelo revisado e efetuar nova fase de diagnóstico, até que seja encontrado um modelo de regressão considerado válido.

d. Análise sobre o possível efeito de interações.

Com base no modelo obtido ao final da etapa anterior, deve-se proceder à avaliação sobre o efeito de incorporação de termos de interação. Após a implementação de intervenções é sempre necessário reestimar o modelo revisado e efetuar nova fase de diagnóstico, até que seja encontrado um modelo considerado final.

e. Obtenção de inferências e interpretações a partir do modelo final.

Nesta fase, extraem-se as principais inferências a partir do modelo de regressão e perfaz a interpretação de seus coeficientes.

f. Validação do modelo final.

Esta etapa visa avaliar quantitativamente a capacidade preditiva do modelo frente a novas observações.

2.14 Método não linear de Newton-Raphson

No método de Newton-Raphson, a convergência é não linear, também, conhecido como Método das Tangentes. É um método em que sua convergência global não está garantida e a forma de conseguir a convergência é atribuindo um valor inicial próximo ao da raiz a ser encontrada. Dessa forma inicia-se o processo iterativo com um valor razoavelmente próximo ao verdadeiro. Essa primeira aproximação depende muito da natureza da função que está sendo utilizada, se apresenta múltiplos pontos de inflexão ou variam próximo da raiz, aumentando a probabilidade de haver convergência do algoritmo (KELLEY, 2003).

É empregado para encontrar o zero de funções. Em problemas de otimização, é empregado para encontrar o zero da função derivada $f'(x)$ da função objetivo $f(x)$. O procedimento se baseia na aproximação em série de Taylor de primeira ordem ao redor de um valor arbitrário x_0 . Considerando que se deseja obter o zero de uma função $f(x)$, tem-se a expansão ao redor de x_0 .

O método utiliza uma reta tangente à curva da função passando pelo primeiro valor suposto, assim, a abscissa na origem da linha que será uma melhor aproximação à raiz do que o valor anterior. Haverá iterações sucessivas até que o método tenha convergido suficientemente (KELLEY, 2003).

Seja a função $f(x) = 0$, uma função derivável definida no intervalo real $[a, b]$. Atribui-se um valor inicial x_0 , e define-se y para cada número natural n conforme se apresenta na Equação 2-39, em que $f'(x)$ é a derivada da função $f(x)$ (KELLEY, 2003).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Equação 2-39

2.15 Método de Convergência por máxima verossimilhança

Este método permitiu a estimação dos parâmetros de modelos estatísticos. Assim, a partir de um conjunto de dados, dado um modelo estatístico, a estimativa por máxima verossimilhança estima valores para os diferentes parâmetros do modelo e a realização de testes de hipóteses relativos a restrições lineares e não lineares ao vetor de parâmetros (FISHER, 1921).

Uma das principais vantagens do emprego desse método consiste das propriedades assintóticas dos estimadores, que são consistentes e assintoticamente eficientes (PORTUGAL, 2009).

Esse método, de forma geral, estima os valores dos diferentes parâmetros do modelo estatístico de maneira a maximizar a probabilidade dos dados e apresenta-se como um método geral para estimação de parâmetros, principalmente no caso de distribuições normais (FISHER, 1921).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Fluxograma metodológico

A Figura 3-1 apresenta o fluxograma da metodologia com as principais etapas para geração dos modelos e da carta de ETR diária.

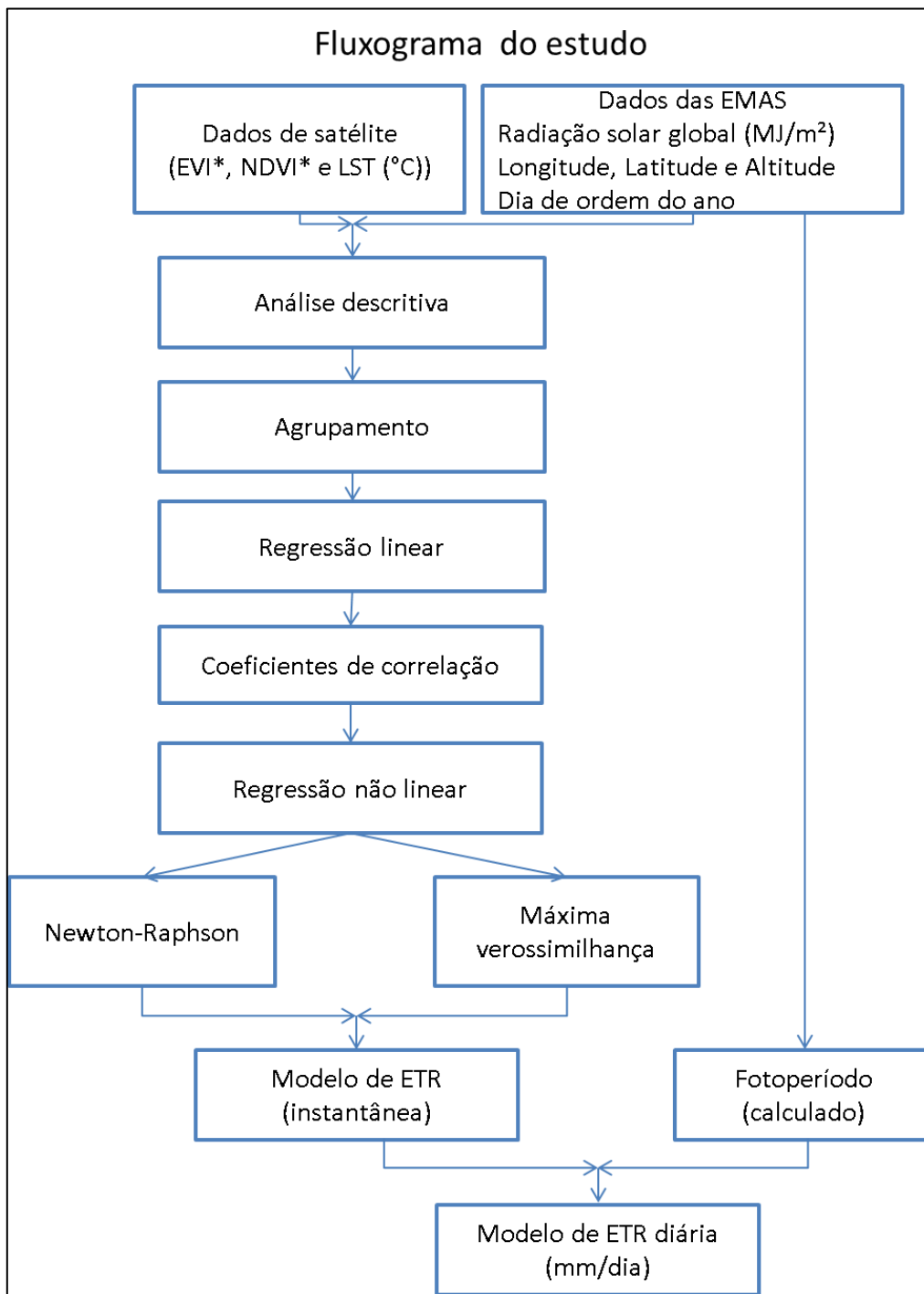


Figura 3-1: Fluxograma metodológico.

Foram selecionadas 32 estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET localizadas em área classificada como bioma Cerrado na região central do Brasil inserida na área delimitada pelo *tile* h13v10 dos produtos MODIS.

Foram coletados dados horários no período de 2007 a 2010, devido à disponibilidade de dados em todas as estações, o que possibilitou a determinação do balanço hídrico sequencial horário de cada estação.

O balanço hídrico sequencial foi calculado em planilha EXCEL na versão 6.3 de 2002 (ESALQ-LCE, 2002) elaborada por ROLIM *et al.* (1998), adotando-se o método de THORNTHWAITE e MATHER (1955) com capacidade de água disponível (CAD) para cada tipo de solo específico de cada estação meteorológica até profundidade de 50 cm (CNPTIA-EMBRAPA, 2005), com a evapotranspiração potencial (ET_p) sendo estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948).

A estimativa do balanço hídrico foi elaborada de forma horária para que se obtivessem valores de evapotranspiração real (ETR) e evapotranspiração potencial (ET_p) para o horário próximo ao qual o satélite obtém imagem da superfície. Possibilitando a análise quase simultânea, havendo uma diferença de 20 a 30 minutos para medições dos parâmetros ambientais.

Para o mesmo período foram selecionados produtos de reflectância e temperatura de superfície obtidas do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua para os dias do ano com menor nebulosidade a fim de se coletar informações de superfície, como índices de vegetação e temperatura de superfície, para cada estação meteorológica.

Foi utilizado o banco de dados PostgreSQL (MILANI, 2008) com extensão espacial PostGIS Raster 2.0 (POSTGIS, 2012) para organização e consulta dos dados espaciais, tais como, estação meteorológica, tipo de vegetação, tipo de solo (SIBCS, 2005),(CNPTIA-EMBRAPA, 2005) e capacidade de armazenamento de água para cada tipo de solo (Tabela 3-1), os dados meteorológicos e as várias bandas das imagens de satélite.

Foram utilizados os produtos diários MYD09GA (LP DAAC-TEAM, 2008) e MYD11A1 (LP DAAC-TEAM, 2008) obtidos pelo sensor MODIS a bordo do satélite Aqua devido o mesmo coletar imagens próximo às 13h 30

local, horário em que ocorrem as maiores valores de radiação solar global e ângulo zenital solar máximo local (LP DAAC-TEAM, 2008).

Tabela 3-1: Estações meteorológicas automáticas de superfície.

Nº	CODEST	MUNICÍPIO	UF	LONGITUDE	LATITUDE	ALTITUDE
1	A001	BRASILIA	DF	-47,92	-15,78	1159,54
2	A003	MORRINHOS	GO	-49,1	-17,72	771,42
3	A008	FAC.DA TERRA .BSB	DF	-48,12	-15,9	1152
4	A009	PALMAS	TO	-48,3	-10,18	280
5	A010	PARANÃ	TO	-47,87	-12,6	280
6	A012	LUZIANIA	GO	-47,95	-16,27	958
7	A017	POSSE	GO	-46,35	-14,08	834
8	A018	PEIXE	TO	-48,55	-12,02	242
9	A019	GURUPI	TO	-49,03	-11,73	287
10	A022	GOIANESIA	GO	-48,98	-15,22	667
11	A023	CAIAPÔNIA	GO	-51,82	-16,97	737
12	A032	MONTE ALEGRE GOIAS	GO	-46,88	-13,23	1253
13	A034	CATALÃO	GO	-47,92	-18,15	890
14	A036	CRISTALINA	GO	-47,6	-16,78	1202
15	A038	DIANOPOLIS	TO	-46,83	-11,58	732
16	A039	FORMOSO	TO	-49,6	-11,98	220
17	A045	AGUAS EMENDADAS	DF	-47,62	-15,58	1200
18	A505	ARAXÁ	MG	-46,93	-19,6	1020
19	A507	UBERLÂNDIA	MG	-48,25	-18,92	869
20	A519	CAMPINA VERDE	MG	-49,53	-19,53	555,2
21	A520	CONC. DAS ALAGOAS	MG	-48,15	-19,98	568
22	A528	TRÊS MARIAS	MG	-45,47	-18,2	921
23	A536	DORES DO INDAIÁ	MG	-45,58	-19,47	722
24	A537	DIAMANTINA	MG	-43,63	-18,22	1356
25	A538	CURVELO	MG	-44,45	-18,73	670
26	A542	UNAI	MG	-46,87	-16,55	631
27	A543	ESPINOSA	MG	-42,83	-14,9	570
28	A544	BURITIS	MG	-46,43	-15,52	894
29	A545	PIRAPORA	MG	-44,93	-17,33	506
30	A547	SÃO ROMÃO	MG	-45,07	-16,37	460
31	A553	JOÃO PINHEIRO	MG	-45,82	-17,32	878
32	A730	CHAPADÃO DO SUL	MS	-52,6	-18,8	818

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia

Algumas estações não coletaram todos os dados. Sendo assim, para validação desse estudo foram utilizados apenas os dados e as estações disponíveis para os anos completos ou no máximo 5 % de falta de dados, conforme apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2:Dados disponíveis por estação anualmente.

N° estações	Código estação	ANOS			
		2007	2008	2009	2010
1	A001	<>	X	X	X
2	A003	X	X		
3	A008	X	X	X	X
4	A009	X	X	X	X
5	A010	X	X	X	X
6	A012	X	X	X	X
7	A017	X	X	X	X
8	A018	X	X	X	X
9	A019		X	X	<>
10	A022			X	X
11	A023		X	X	X
12	A032		X	X	X
13	A034		<>	X	X
14	A036		X	X	X
15	A038			X	
16	A039			X	[]
17	A045			X	X
18	A505	X		X	X
19	A507	X	[]	X	
20	A519		X	X	X
21	A520	X	X	X	X
22	A528	X	X	X	X
23	A536		X	[]	[]
24	A537		X	X	[]
25	A538		X	X	X
26	A542		X	X	X
27	A543		X	X	X
28	A544		X	X	X
29	A545		X	X	<>
30	A547		X	X	X
31	A553		X	X	<>
32	A730	X	X	[]	[]

Legenda: x – dados completos com máximo de 5% de falta de dados; [] – dados com 10% de falta dos dados e <> - até 20% de falta de dados.

As colunas representadas com a simbologia **X** indicam que os dados estão completos ou pelo menos acima de 95 % do total de dados possíveis para cada estação. As colunas representadas por <> indicam que constavam 90% ou mais dos dados e as colunas representadas por [] indicam que constavam 80% ou mais dos totais de dados possíveis para cada estação. Por exemplo, 5% de falta de dados representa 18 dias, 10% representa 36 dias e

20% da falta de dados representa 73 dias, havendo diferença apenas de horas quando comparado com o ano bissexto de 2008.

Embora o método proposto para o balanço hídrico sequencial de Thornthwaite e Mather, 1955 sugira que não haja falhas na série de dados, o presente estudo não foi prejudicado ao adotar a margem de falta de dados até 5% apresentada na Tabela 3-2, pois os dados faltantes não foram por dias sequenciais, mas sim, intercalados entre os meses durante o ano, não havendo alterações imediatas no armazenamento de água no solo e na temperatura média do ar.

3.2 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em área do bioma Cerrado brasileira com vegetação predominante do tipo savana localizada dentro da área correspondente ao *tile* h13v10 dos produtos MODIS.

Essa área é delimitada ao norte pela latitude de aproximadamente -10 graus e ao sul, por volta de -19 graus; a oeste, pela longitude de aproximadamente -53 graus e ao leste em torno de -40 graus, o que abrange grande parte do Centro-Oeste do Brasil.

As estações utilizadas estão contidas nos estados de Goiás-GO, Tocantins-TO, Minas Gerais-MG, Mato Grosso-MT, Mato Grosso do Sul-MS e no Distrito Federal-DF.

A Figura 3-2 apresenta a área de estudo com a distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas contidas no Bioma Cerrado.

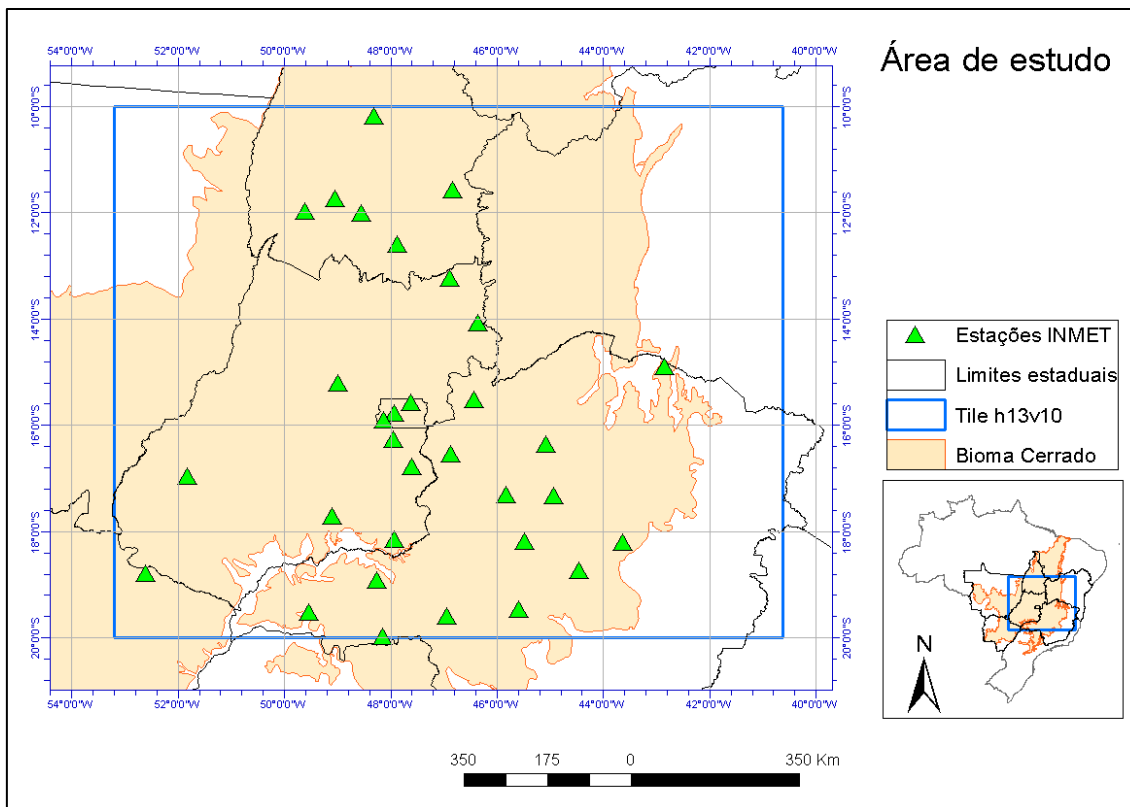


Figura 3-2: Localização da área de estudo no bioma Cerrado.

3.3 Caracterização do local

3.3.1 Tipos de solos

Os solos predominantes no Cerrado são: Latossolos e suas associações, quais sejam, Nitossolos, Neossolos Quartzarênicos, Podzólicos e Gleissolos (WAGNER, 1986). Os solos apresentam-se intemperizados, devido à alta lixiviação e possuem baixa fertilidade natural. Apresentam pH ácido, variando de 4,3 a 6,2. Possui elevado conteúdo de alumínio, baixa disponibilidade de nutrientes, como fósforo, cálcio, magnésio, potássio, matéria orgânica, zinco, argila, compondo-se de caulinita, goetita e gibsita. O solo é bem drenado, profundo e com camadas de húmus (CNPTIA-EMBRAPA, 2005).

Na região dos Cerrados apresenta predominância de Latossolo, cobrindo 46% da área. Este solo apresenta uma coloração variando do vermelho para o amarelo, são profundos, bem drenados na maior parte do ano, apresentam acidez, toxidez de alumínio e são pobres em nutrientes essenciais (como cálcio, magnésio, potássio e alguns micronutrientes) para a maioria das

plantas. Além desses, existem nessa região os solos pedregosos e rasos (Neossolos Litólicos), geralmente de encostas, os arenosos (Neossolos Quartzarênicos), os orgânicos (Organossolos) e outros de menor expressão (CNPTIA-EMBRAPA, 2005).

Neossolos Quartzarênicos são constituídos essencialmente de grãos de quartzo, tendo, por conseguinte, praticamente ausência de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo com coloração amarela ou vermelha e abrange areias quartzosas não-hidromórficas descoloridas em geral. São solos originados de depósitos arenosos, apresentando textura areia ou areia franca ao longo de pelo menos 2 m de profundidade (CNPTIA-EMBRAPA, 2005).

Também de acordo com CNPTIA-EMBRAPA (2005), o tipo de solo Gleissolo Haplíco são solos minerais, hidromórficos, apresentando horizontes A (mineral) ou H (orgânico), seguido de um horizonte de cor cinzento-olivácea, esverdeado ou azulado, chamado horizonte glei, resultado de modificações sofridas pelos óxidos de ferro existentes no solo (redução) em condições de encharcamento durante o ano todo ou parte dele.

Em síntese, para aplicação direta no processo de balanço hídrico, a capacidade de armazenamento água no solo varia entre 31 e 84 mm nas áreas de instalação das *EMAS*.

3.3.2 Tipo de vegetação

O bioma Cerrado é a segunda maior formação vegetal brasileira depois da Amazônia e também a savana tropical mais rica do mundo em biodiversidade. Concentra nada menos que um terço da biodiversidade nacional e 5% da flora e da fauna mundiais (FALEIRO *et al.*, 2008).

O bioma Cerrado ocupa cerca de 2.045.000 km² na América do sul sendo a maior formação brasileira depois da Amazônia, onde, segundo EITEN (1990) sua fisionomia depende de fatores edáficos (substrato) e naturais, em que os edáficos dependem da fertilidade, da profundidade e do grau de saturação da camada superficial ou subsuperficial do solo. Já, os fatores naturais estão condicionados a ocorrência do fogo, provocado por atividades antrópicas ou por descargas elétricas da atmosfera. Apresenta-se semi

decíduo, sendo raro o fato de achar-se uma área completamente perenifólia ou completamente decídua.

Foram identificados três grupos que representam a vegetação do cerrado segundo FERRI (1955): o das plantas permanentes de raízes profundas, das espécies efêmeras de raízes superficiais e o das gramíneas que podem ser permanentes ou efêmeras vegetando em ambos os casos apenas no verão. Porém, posteriormente, GOODLAND e FERRI (1979) identificam quatro categorias de cerrado em relação ao gradiente fisionômico: campo sujo (com árvores de até 3 metros), campo cerrado (com árvores atingindo até 4 metros, mais numerosas), cerrado (com árvores até 6 metros) e cerradão (com árvores de até 9 metros, ainda muito mais numerosas). A descrição mais usual e aceita nos meios acadêmicos classifica fisionomicamente o cerrado como: 1) cerradão; 2) cerrado (sentido restrito); 3) campo cerrado; 4) campo sujo de cerrado; 5) campo limpo de cerrado.

Segundo SHIKI *et al.* (1997), as culturas temporárias ocupam principalmente sobre os Latossolos Vermelho-Escuros e Latossolos Roxos, e as culturas permanentes distribuem-se sobre os Nitossolos e Podzólicos. Em um estudo realizado em Brasília por DIAS (1992) sugeriu a existências de seis estações ecológicas no ano, como: 1) início das chuvas (outubro); 2) chuvas de primavera (novembro e dezembro); 3) veranicos (janeiro); 4) chuvas de verão (fevereiro a abril); 5) inverno seco (maio a agosto) e 6) final de seca (setembro).

3.3.3 Relevo

Segundo COUTINHO (2000) o Cerrado apresenta em sua maior parte, áreas de relevo plano e suavemente ondulado com altitudes que variam de 300 a 600 metros acima do nível médio do mar, com presença de alguns picos estendendo-se até 2.070 m (Pico do Sol), porém em sua maioria não ultrapassa os 1.200 metros.

A altitude medida para as estações meteorológicas desse estudo apresenta-se entre 220 e 1356 metros, informação essa utilizada principalmente no processo de cômputo de radiação solar global (*RG*) em superfície.

Estações meteorológicas automáticas, vegetação e clima

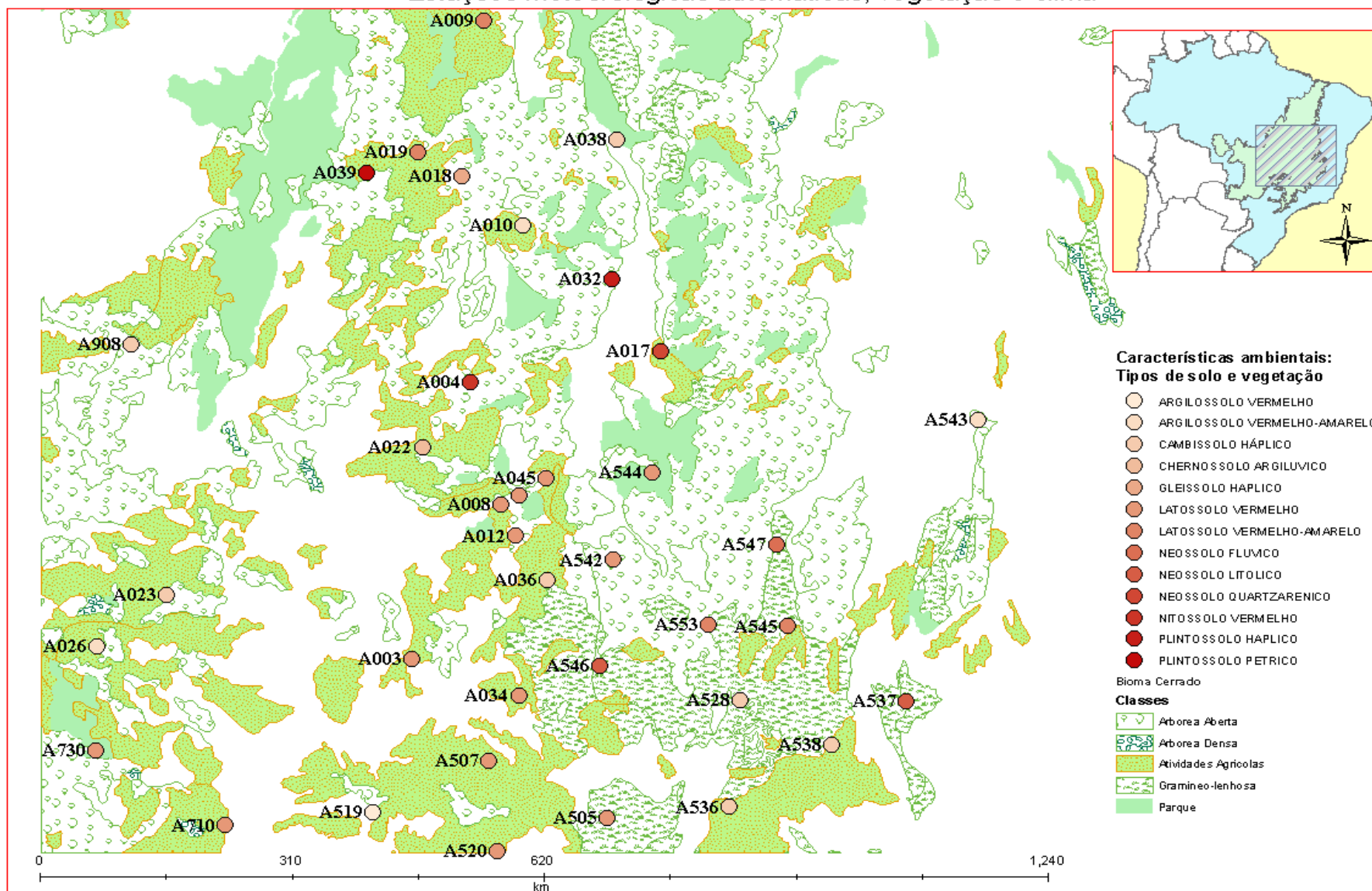


Figura 3-3: Características do ambiente de instalação das estações meteorológicas automáticas.

Tabela 3-3: Características do ambiente de instalação das estações meteorológicas automáticas.

N°	Estação	Tipo de solo	Vegetação-classes	CAD	I	a
1	A001	LATOSSOLO VERMELHO	Arbórea Aberta	84	107,6	2,4
2	A003	LATOSSOLO VERMELHO	Atividades Agrícolas	84	114,1	2,5
3	A008	LATOSSOLO VERMELHO	Arbórea Aberta	84	111,8	2,5
4	A009	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Atividades Agrícolas	84	157,7	4,1
5	A010	ARGILOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Atividades Agrícolas	52	144,7	3,5
6	A012	LATOSSOLO VERMELHO	Arbórea Aberta	84	116,1	2,6
7	A017	NEOSSOLO QUARTZARENICO	Atividades Agrícolas	31	129,2	3
8	A018	GLEISSOLO HAPLICO	Arbórea Aberta	84	149,4	3,7
9	A019	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Atividades Agrícolas	84	139,6	3,3
10	A022	CHERNOSSOLO ARGILUVICO	Atividades Agrícolas	84	127,8	2,9
11	A023	CAMBISSOLO HÁPLICO	Atividades Agrícolas	52	123,1	2,8
12	A032	PLINTOSSOLO HAPLICO	Arbórea Aberta	52	138,1	3,3
13	A034	LATOSSOLO VERMELHO	Atividades Agrícolas	84	117,9	2,6
14	A036	CAMBISSOLO HÁPLICO	Atividades Agrícolas	52	103,6	2,3
15	A038	CAMBISSOLO HÁPLICO	Parque	52	130,9	3
16	A039	PLINTOSSOLO PETRICO	Atividade Agrícola	52	153,1	3,9
17	A045	LATOSSOLO VERMELHO	Arbórea Aberta	84	105,2	2,3
18	A505	LATOSSOLO VERMELHO	Gramíneo-lenhosa	84	110,9	2,5
19	A507	LATOSSOLO VERMELHO	Atividades Agrícolas	84	120,4	2,7
20	A519	ARGILOSSOLO VERMELHO	Atividades Agrícolas	52	128,3	3
21	A520	LATOSSOLO VERMELHO	Atividades Agrícolas	84	122,6	2,8
22	A528	CAMBISSOLO HÁPLICO	Gramíneo-lenhosa	52	113,2	2,5
23	A536	CAMBISSOLO HÁPLICO	Atividades Agrícolas	52	113,2	2,5
24	A537	NEOSSOLO LITOLICO	Gramíneo-lenhosa	52	85,5	1,9
25	A538	CAMBISSOLO HÁPLICO	Atividades Agrícolas	52	117,2	2,6
26	A542	LATOSSOLO VERMELHO	Arbórea Aberta	84	125	2,9
27	A543	ARGILOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Arbórea Aberta	52	134,6	3,2
28	A544	LATOSSOLO VERMELHO	Parque	84	116,2	2,6
29	A545	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Gramíneo-lenhosa	84	126,8	2,9
30	A547	NEOSSOLO FLUVICO	Gramíneo-lenhosa	52	126,5	2,9
31	A553	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Gramíneo-lenhosa	84	116,5	2,6
32	A730	LATOSSOLO VERMELHO	Parque	84	120,8	2,7

Legenda: CAD – Capacidade de água disponível; I e a – Índice térmico do Método de Thornthwaite, 1948

A Figura 3-4 apresenta algumas das *EMAS* e seus ambientes de instalação, para coleta dos dados e validação do estudo.

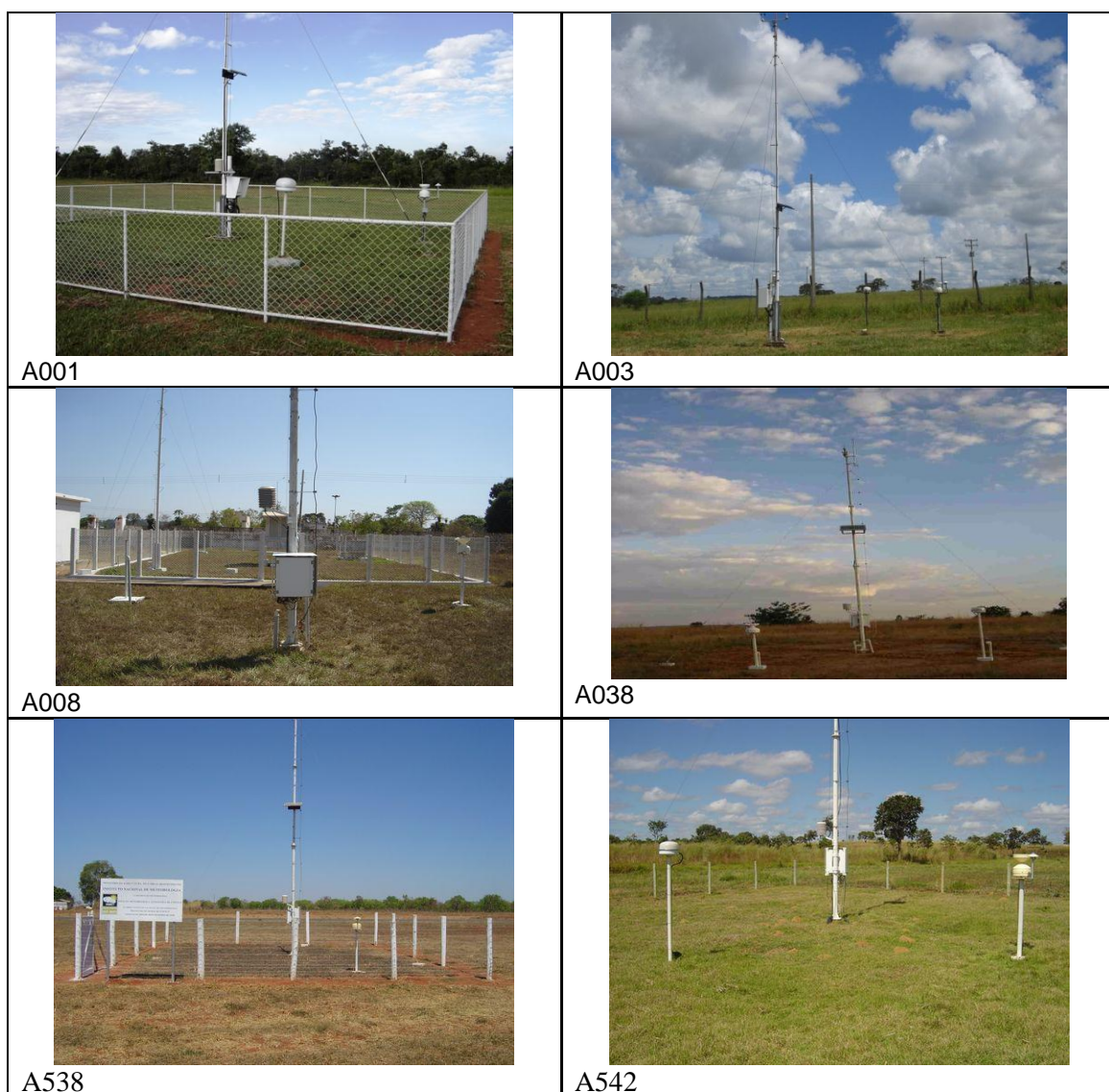


Figura 3-4: Exemplo dos Sítios das estações meteorológicas descritas na Tabela 3-3.

3.3.4 Climatologia da região

A área de estudo está situada na região central do Brasil classificada, segundo a classificação de Köppen, como clima tropical alternadamente úmido e seco, apresentando 4 a 5 meses secos, quente com temperatura média acima de 18°C em todos os meses, em que algumas estações estão situadas em área subquente, em que a temperatura média ocorre entre 15°C e 18°C pelo menos um mês, conforme ilustrado na Figura 3-9.

Segundo VIANELLO e ALVES (1991) a região do Cerrado encontra-se sob efeitos das depressões da zona do Chaco e Amazônia e anticiclones do Atlântico Sul, conhecido também como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sendo um dos principais fenômenos que determinam o regime pluviométrico em toda região.

O Cerrado é caracterizado pela presença de invernos com temperaturas amenas, em virtude da frequente invasão das massas de ar frias oriundas das áreas extratropicais, caracteristicamente secas e verões quentes e chuvosos, com clima do tipo *Aw* segundo a classificação de Köppen. A média anual da precipitação é da ordem de 1.500 mm, variando de 750 a 2.000 mm, praticamente concentrada na estação chuvosa (outubro a março) (ADÂMOLI *et al.*, 1987).

A precipitação média anual varia entre 1.200 e 1.900 mm ocorrendo a estação chuvosa nos meses de primavera e verão (outubro a março), podendo ocorrer curtos períodos de seca, chamados de veranicos, o que podem ocasionar transtornos para agricultura (Figura 3 5). As linhas de instabilidade, associadas à convergência em baixos níveis, ocorrem no verão e no inverno quando se antecipa às penetrações frontais.

Nos meses de maio a setembro a precipitação mensal reduz bastante, chegando muitas vezes à zero, resultando em uma estação seca de 3 a 5 meses de duração. Nesse período a umidade relativa do ar acompanha esse decaimento podendo baixar a valores próximos a 15%.

A Figura 3-5 contém o gráfico do comportamento da umidade relativa e da precipitação observadas durante um período de 30 anos para estação meteorológica de Brasília, representando, nesse caso, as características de comportamento dessas variáveis para o bioma Cerrado.

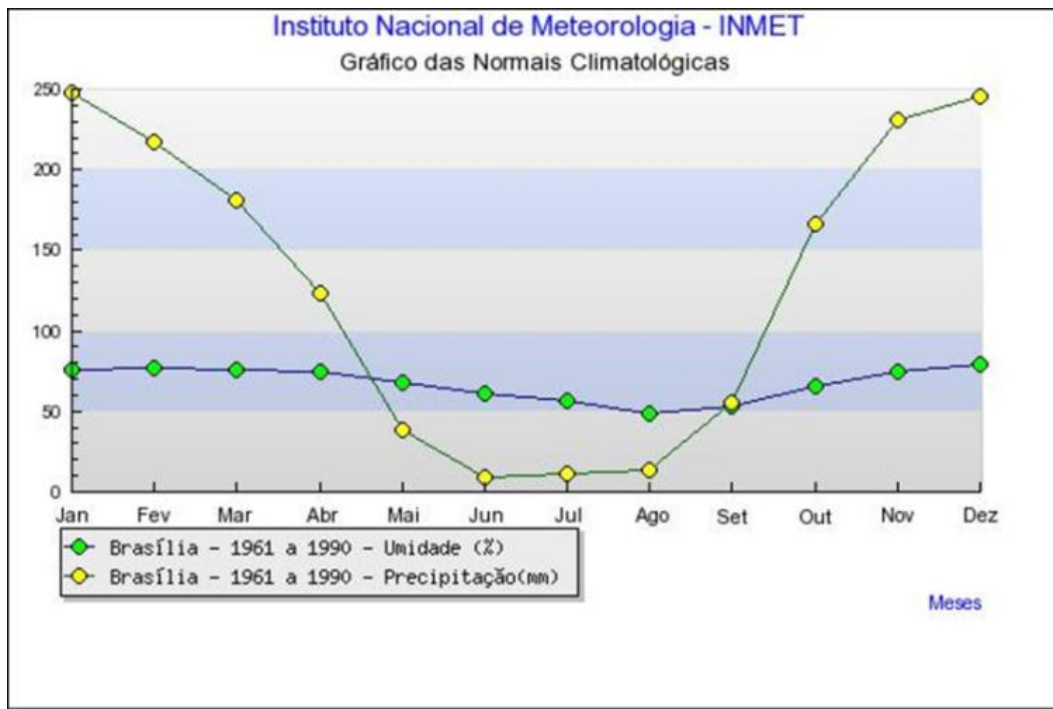


Figura 3-5: Gráfico de Umidade Relativa e Precipitação para Brasília no período de 30 anos. Fonte: INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2012).

A temperatura média anual varia em torno de 22 a 23 °C (Figura 3-6) podendo a máxima absoluta chegar a 40°C e a mínima absoluta a zero (Figura 3-7) podendo ocorrer geadas, o retângulo demarca a área de estudo.

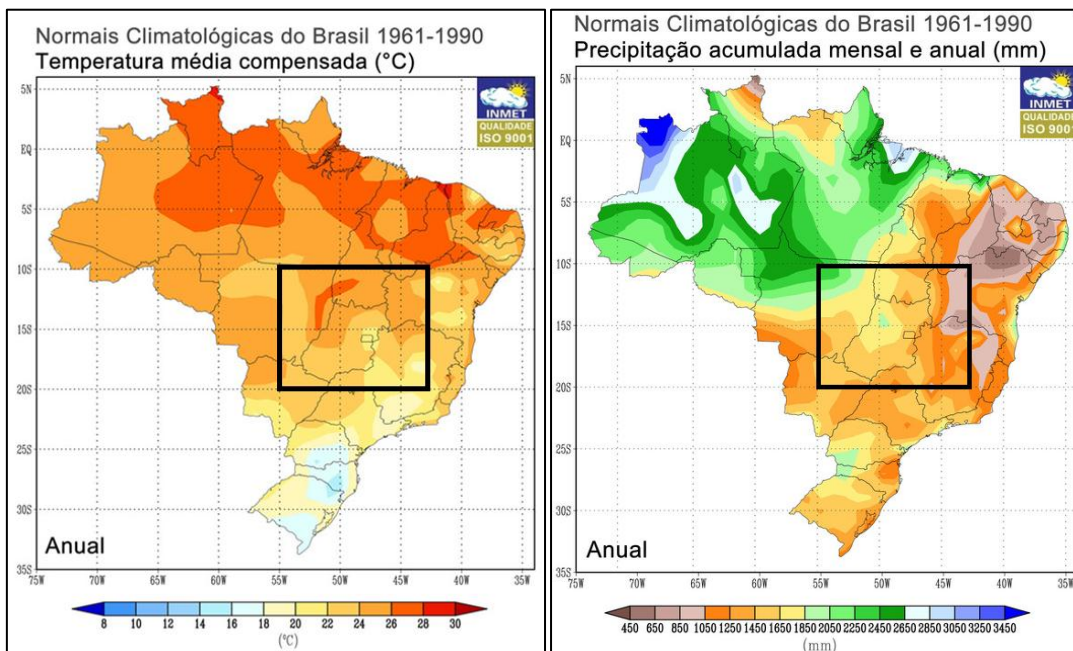


Figura 3-6: Temperatura média compensada (°C) e Precipitação anual na área de estudo, Fonte: INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2012).

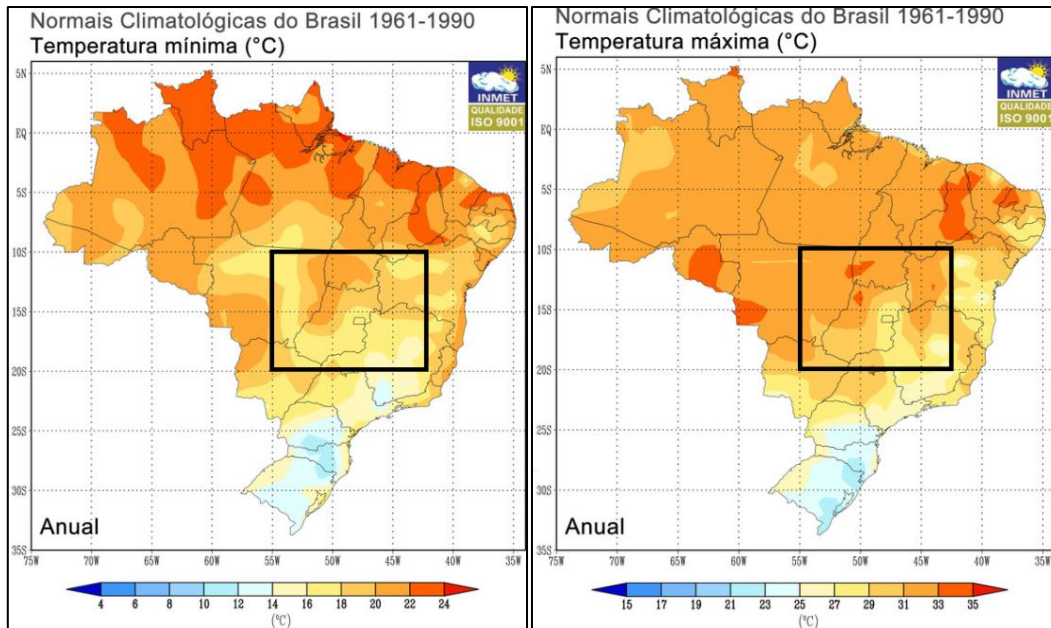


Figura 3-7: Temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C).
Fonte: INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2012).

A demanda atmosférica, medido através do parâmetro de evaporação, em resposta às condições ambientais, aumenta no período seco, podendo chegar próximo a 200 mm no mês mais seco, conforme apresentado na Figura 3-8.

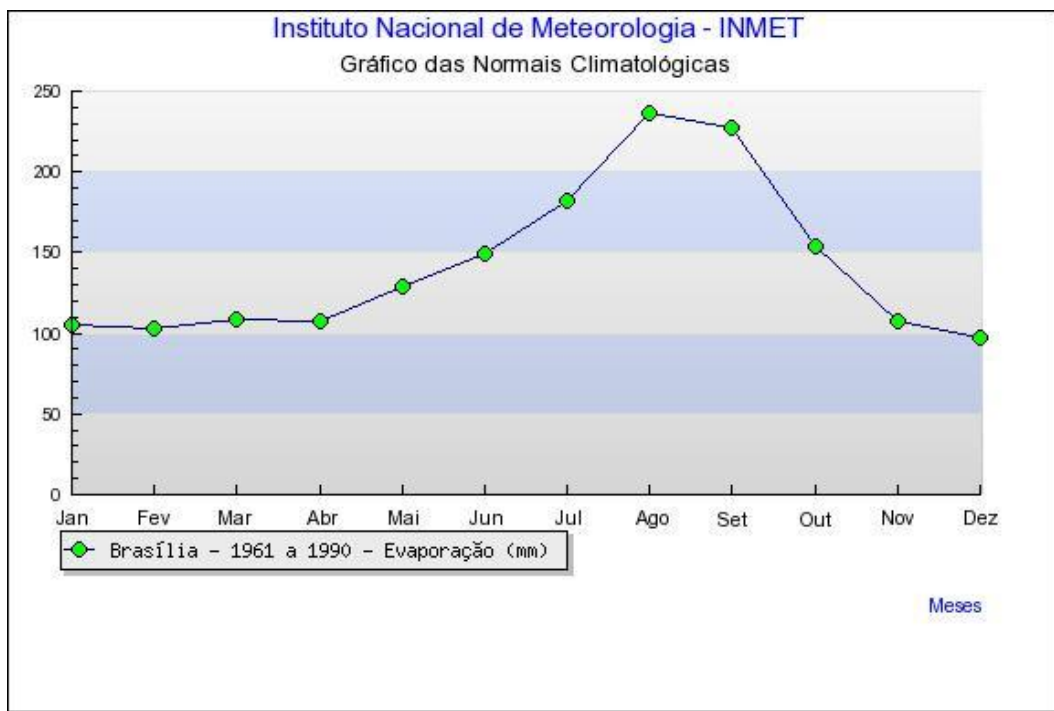


Figura 3-8: Gráfico de evaporação para Brasília no período de 30 anos.
Fonte: INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2012).

Estações meteorológicas automáticas, vegetação e clima

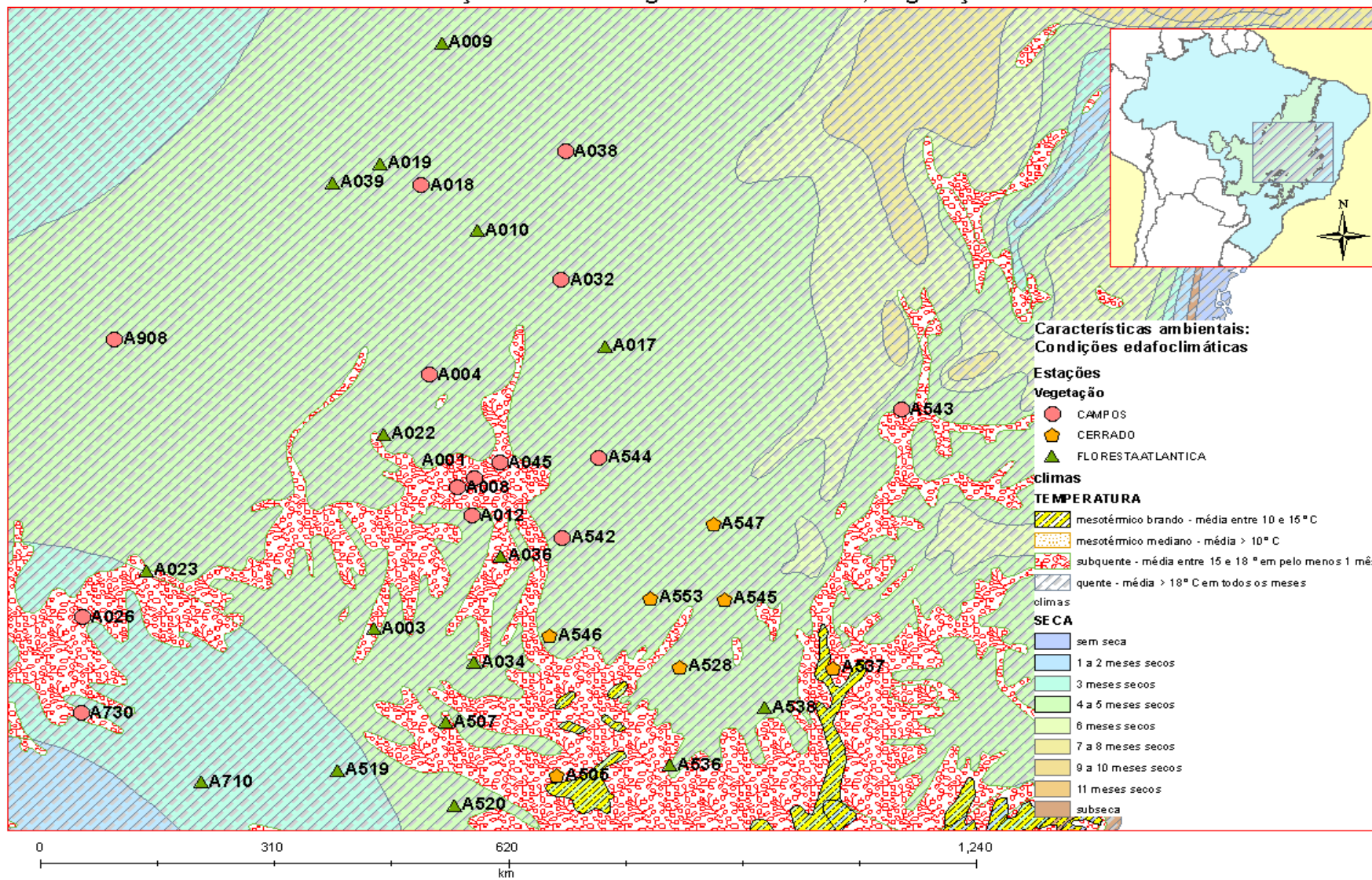


Figura 3-9: Características do edafoclimáticas do ambiente de instalação das estações meteorológicas automáticas, (IBGE-MAPAS, 2010) e INMET.

3.4 Dados meteorológicos e imagens de satélite

A observação meteorológica de superfície consistiu de procedimentos sistemáticos e padronizados, visando à obtenção de informações qualitativas e quantitativas referentes aos parâmetros meteorológicos capazes de caracterizar plenamente o estado instantâneo da atmosfera.

A padronização, fielmente seguida, foi determinada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) (OMM., 1966), tendo em vista o caráter global dos estudos atmosféricos (VIANELLO e ALVES, 1991).

Uma estação meteorológica automática de superfície (*EMAS*) coleta, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar) representativas da área em que está localizada.

A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados.

Além disto, os dados são disponibilizados gratuitamente, em tempo real, no site http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php para a elaboração de previsão do tempo e dos produtos meteorológicos diversos de interesse de usuários setoriais e do público em geral e para uma vasta gama de aplicações em pesquisa em meteorologia, hidrologia e oceanografia.

Os dados de precipitação e temperatura do ar foram utilizados para cálculo do balanço hídrico sequencial para cada uma das estações compreendidas pela área de estudo.

Os dados de radiação solar global (*RG*) foram coletados pelo piranômetro de modelo CM6B da Vaisala, definido pela OMM como sendo de primeira classe e que está instalado nas *EMAS* (VAISALA, 2001).

Para calibração dos modelos, foram utilizados os dados de radiação solar global (*RG*) em MJ.m⁻² coletados em cada estação meteorológica às 17h UTC (*Universal Time Coordinate*) nos dias que apresentaram céu sem cobertura de nuvens.

A *RG* para dias de céu claro também pode ser estimada a partir de relações entre parâmetros como posição geográfica, dia do ano, hora e altitude

do lugar, apresentando-se muito similar à RG observada, como mostra a Figura 3-10.

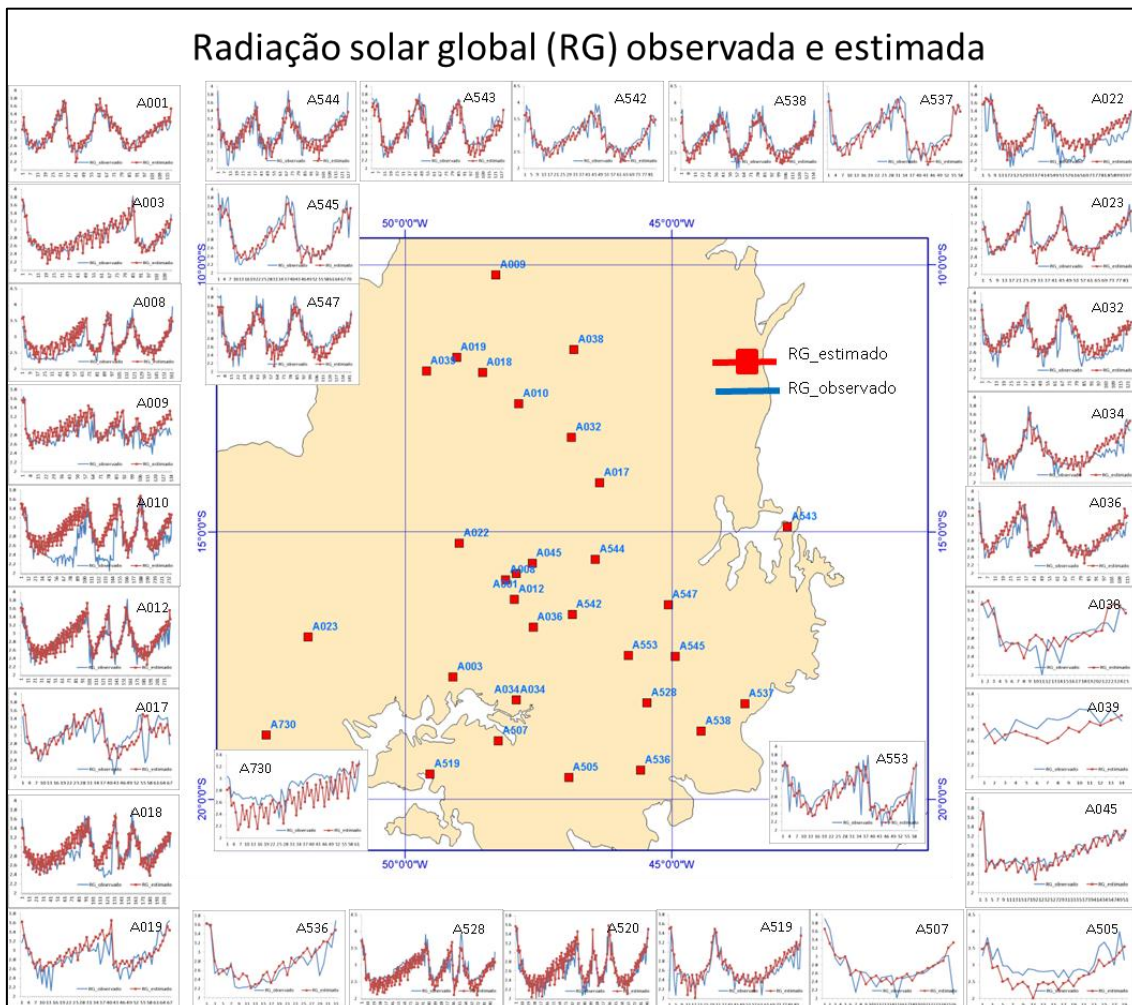


Figura 3-10: Radiação Solar Global em superfície observada versus estimada (MJ.m^{-2}).

3.4.1 Estimativa da radiação solar global em superfície (RG)

A maior parte da radiação solar que atinge o “topo da atmosfera” chega à superfície em dias com pouca nebulosidade. Porém, a intensidade de radiação que a alcança varia de acordo com o ângulo de elevação do Sol e consequentemente com as partículas em suspensão, gases e aerossóis constituintes da camada e da presença de nuvens.

Os dados de *RG* além de serem medidos através de instrumentos instalados em cada estação meteorológica, também podem ser estimados por

parâmetros como posição geográfica, altitude e época do ano apenas para dias de céu claro (SOBRINHO *et al.*, 2007).

Esses parâmetros são representados pela latitude (Φ) e longitude (λ) em graus decimais, altitude (z) em metros e época do ano (dia de ordem do ano - *DOA*).

Segundo ALLEN *et al.* (2002), para o cálculo da radiação solar global em superfície, considera-se o inverso do quadrado da distancia relativa Terra-Sol (d_r), o ângulo zenital solar (Z), a constante solar (S) e a transmissividade atmosférica (τ_{sw}) para um dia de céu claro, a qual é parametrizada em função da altitude do local.

$$RG = S \cos Z d_r \tau_{sw}$$

Equação 3-1

Em que a constante solar (S) é o total de energia que atinge o limite superior da atmosfera na área de 1m^2 , perpendicularmente aos raios solares em unidade de tempo (hora).

É assumida na Equação 3-1 com o valor de $S=1.367,5 \text{ W.m}^{-2}$.

Para conversão de W.m^{-2} para MJ.m^{-2} multiplica-se pelo fator de conversão $3,6 \times 10^{-3}$.

3.4.1.1 Ângulo zenital solar (Z)

É o ângulo compreendido entre o vetor posição do Sol e a vertical local, em um dado instante, o qual pode ser medido com auxílio de um teodolito, de um clinômetro, de um telescópio, entre outros.

Porém, pode ser calculado em função de variáveis conhecidas como latitude local (Φ), declinação (δ) e ângulo horário (h) do Sol.

$$\cos Z = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos h$$

Equação 3-2

Quando a área de estudo tem pequena, ou mesmo, declividade nula, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol (E).

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) = \text{sen}(E)$$

Equação 3-3

3.4.1.2 Declinação solar (δ)

Uma equação bastante usada para o cálculo da declinação do sol proposta por COOPER (1969) descrita em VIANELLO e ALVES (1991), dada da seguinte forma (em graus):

$$\delta = 23,45 * \text{sen}\left[\left(\frac{360}{365}\right) (284 + DOA)\right]$$

Equação 3-4

Apresentada da seguinte forma, a qual não altera os resultados obtidos em graus (ROLIM *et al.*, 1998).

$$\delta = 23,45 * \text{sen}\left[\left(\frac{360}{365}\right) (DOA - 81)\right]$$

Equação 3-5

Em que δ é dado em graus, DOA é o dia em ordem do ano, variando de 1 a 365 para o período de 1° de janeiro a 31 de dezembro.

Também na forma da Equação 3-6 de PENMAN (1956), dada em radianos.

$$\delta = 0,409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} * DOA - 1.405\right)$$

Equação 3-6

3.4.1.3 Ângulo horário do nascer ou pôr do Sol

É o ângulo formado no plano equatorial terrestre, pela projeção do segmento de reta do centro da Terra a um ponto no plano dos meridianos e a projeção da linha que liga o Sol ao centro da Terra. Como a Terra dá um giro completo em torno do seu próprio eixo em aproximadamente 24 horas, esse ângulo apresenta uma variação de aproximadamente 15° por hora (VAREJÃO-SILVA, 2006). Por convenção, o ângulo horário é normalmente considerado igual à zero, ao meio dia solar, negativo no período da manhã e positivo no período da tarde. De acordo com essa convenção de sinais, adotada para o ângulo horário por meio da seguinte Equação 3-7.

$$H = \text{arc. cos}(-\text{tg}\Phi * \text{tg}\delta)$$

Equação 3-7

3.4.1.4 Fotoperíodo

Em atividades agrícolas, o fotoperíodo pode ser decisivo, já que interfere na fisiologia de muitas espécies vegetais, por exemplo, a cana de açúcar floresce com fotoperíodo maior que 10h, a cebola (*Alium cepa*) cujas cultivares podem ser divididas em três grupos: as que exigem fotoperíodo de 10 a 11 horas, as que precisam de 12 a 13 horas durante o ciclo vegetativo e ainda as que precisam de mais de 13 horas.

Admitindo uma aproximação do cálculo do fotoperíodo através dos conceitos geométricos, tem-se que, no instante do nascimento do Sol, o centro do disco solar situa-se no plano do horizonte do observador e, assim, o ângulo zenital é de 90°(cos Z=0). O mesmo se verifica ao pôr do Sol e nesses casos tem-se:

$$\cos\Phi\cos\delta\cos H = -\text{sen}\Phi * \text{sen}\delta$$

Equação 3-8

Em que, H é o valor assumido pelo ângulo horário(h) para representar o ângulo que a Terra deve girar, a partir do instante do nascimento até a

culminação do Sol, e da culminação do Sol até seu ocaso, mais um giro de H graus, logo, do nascer ao ocaso do Sol o ângulo horário total será de $2H$.

Tendo-se então que para uma dada latitude (Φ) e data, o ângulo horário (H) pode ser calculado na forma da Equação 3-7.

Por outro lado, o fotoperíodo (N) representa o intervalo de tempo que transcorre entre o nascimento e o ocaso do Sol, ou seja, o tempo necessário para a Terra efetuar um arco de $2H$ (graus), conforme Equação 3-9.

$$N = \frac{2}{15} * \text{arc. cos}(-\text{tg}\Phi . \text{tg}\delta) \quad (\text{horas})$$

Equação 3-9

Essas definições foram feitas à luz da definição geométrica no nascimento e ocaso do sol. Quando se assume que o nascimento e o ocaso ocorrem quando a borda superior do disco solar aparentemente tangencia o plano horizontal local, a Equação 3-9 precisa ser ajustada.

Como o raio do disco solar subentende um ângulo de $16'$ e a refração atmosférica torna o bordo desse disco visível quando ainda se encontra $34'$ abaixo do plano do horizonte (LIST, 1971). Assim, a correção a ser aplicada é de $50'$ pela manhã e pela tarde.

A Equação 3-9 passa a ser expressa na forma da Equação 3-10, visto que $50'$ equivalem a $0,83^\circ$:

$$N = \frac{2}{15} * [0,83^\circ + \text{arc. cos}(-\text{tg}\Phi . \text{tg}\delta)]$$

Equação 3-10

3.4.1.5 Cálculo do Inverso do quadrado da Distância relativa Terra-Sol (d)

Para os estudos de energia radiante na Terra, o Sol pode ser considerado uma fonte pontual de energia, que emite radiação igualmente em todas as 4π direções. Portanto, se a intensidade luminosa em um determinado instante for igual a I , o total de energia emitida será $4\pi * I$.

Nesse mesmo instante, a Terra se situa numa esfera hipotética de raio igual à distância Terra-Sol (D), a qual estará interceptando a energia emitida

$(4\pi R^2)$. Analogamente a área de uma esfera igual à $4\pi R^2$ que intercepta a energia emitida pelo Sol ($4\pi I$), substituindo-se o Raio R pela distancia Terra-Sol (D) se tem a densidade de fluxo de radiação solar (irradiância solar) na superfície esférica igual a relação de energia por área, tempo.

$$\frac{4\pi I}{4\pi D^2} = I/D^2$$

Equação 3-11

Essa lei da radiação demonstra que a energia solar que chega à Terra está associada à distancia Terra-Sol, havendo a variação dessa distância a irradiância também varia.

Isso define a Lei do inverso do quadrado da distância, ou seja, a energia recebida em uma superfície é inversamente proporcional ao quadrado da distancia entre a fonte emissora e a superfície receptora.

Considerando que a distância Terra-Sol varia continuamente ao longo do ano, a irradiância solar também irá variar.

Em geral, a distância (D) Terra-Sol é expressa em termos da distância média (D_m) através da relação:

$$r_0 = \frac{D}{D_m}$$

Equação 3-12

Em que, d_r é definido como $1/(r_0)^2$, ou seja, é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) em dado dia do ano (DOA), e é apresentado de acordo com ALLEN *et al.* (2002) da seguinte forma:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(DOA \frac{2\pi}{365})$$

Equação 3-13

Onde DOA representa o dia de ordem do ano e o argumento da função cosseno está em radianos. O valor médio anual de $\cos(\text{DOA})$ é igual a 1,00 e o mesmo varia aproximadamente entre 0,97 e 1,03 (SENTELHAS e ANGELOCCI, 2009).

3.4.1.6 Transmissividade atmosférica em dias de céu claro

A transmissividade atmosférica (τ_{sw}) é a relação entre a radiação solar global incidente em superfície (RG) e aquela no topo da atmosfera (I_o). Em dias de céu encoberto os valores de (τ_{sw}) tendem a valores próximos de zero e em dias de céu limpo tendem à unidade. A τ_{sw} expressa, portanto, as condições atmosféricas em termos de cobertura de nuvens e presença de material particulado, vapor d'água e aerossóis de um modo geral. Em regiões tropicais mesmo em dias com elevada nebulosidade a τ_{sw} nunca é inferior a 0,2 (20%) e em dias de céu limpo nunca superior a 0,8 (80%).

Isso se deve ao fato de que mesmo em dias nublados a atmosfera ainda ser *transparente* a radiação solar difusa e em dias de céu limpo, com predomínio de radiação solar direta, parte dessa radiação é absorvida pelos constituintes da atmosfera em especial o ozônio e o vapor d'água (IQBAL, 1980).

Tem-se que a transmissividade atmosférica para condições de céu claro, pode ser obtida por ALLEN *et al.* (2002) sem necessidades de dados meteorológicos complementares.

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z$$

Equação 3-14

Onde z é a altitude de cada pixel (m), o qual pode ser extraído de um modelo de elevação digital (DEM), o mesmo poderá calcular a transmissividade de cada pixel, o que é recomendado para áreas com topografia muito acentuada. Nesse estudo efetuaram-se os cálculos de transmissividade utilizando os valores de altitude (z) de cada estação.

3.5 Localização das estações meteorológicas automáticas de superfície (*EMAS*)

A localização das estações meteorológicas automáticas segue os padrões estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) (SEGER/LAIME/CSC-INMET, 2011).

Cada estação está instalada numa base física, numa área de no mínimo 50 m² livre de efeitos obstruções naturais e prediais, situada em área gramada mínima de 14 m por 18 m, cercada por tela metálica (para evitar entrada de animais).



Figura 3-11: Estação Meteorológica Automática – *EMAS*, sensores, mastro com caixa data-logger, painel solar, cercado.

Os sensores e demais instrumentos são fixados em um mastro metálico de 10 metros de altura, aterrado eletricamente (malha de cobre) e protegido por para-raios. Os aparelhos para as medições de chuva (pluviômetros) e de radiação solar, bem como a antena para a comunicação, ficam situados fora do mastro, mas dentro do cercado (SEGER/LAIME/CSC-INMET, 2011).



Figura 3-12: Detalhe de uma Estação Meteorológica Automática de superfície (*EMAS*), mostrando à esquerda o pluviômetro, ao centro a antena de comunicação via satélite e à direita o “datalogger” com sensor de temperatura, fixados ao mastro.

3.5.1 Características das estações meteorológicas automáticas de superfície (*EMAS*)

As estações meteorológicas automáticas (*EMAS*) adquiridas são importadas, de fabricação finlandesa, marca Vaisala, modelo MAWS 301, (VAISALA, 2001), usadas como padrão para a rede de estações automáticas de superfície do INMET.

A estação meteorológica automática de superfície (*EMAS*) é um instrumento de coleta automática de informações ambientais locais (meteorológicas, hidrológicas ou oceânicas), e inclui os elementos:

- a. Sub-sistema de coleta de dados;
- b. Sub-sistema de controle e armazenamento;
- c. Sub-sistema de energia (painel solar e bateria);
- d. Sub-sistema de comunicação.

A coleta dos dados foi feita através de sensores instalados na rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, em intervalos de minuto a minuto e integralizados para, no período de uma hora, serem transmitidas.

Os parâmetros coletados para este estudo foram: temperatura instantânea do ar, radiação solar global e precipitação, outros parâmetros podem ser medidos, porém não foram necessários.

O sub-sistema de armazenamento é composto por um processador central de baixo consumo de energia (datalogger), que faz o registro dos valores observados em uma unidade de memória que contém as instruções programadas para aquela unidade. Os dados são armazenados em uma memória não volátil que mantém os dados medidos por um período especificado.

A *EMAS* é autônoma, não depende de energia elétrica externa e não requer nenhum equipamento ou sala adicional para sua operação diária. Os dados coletados pelas *EMAS* são enviados automaticamente para o INMET, sede em Brasília, de hora em hora, onde são efetuadas as validações e disponibilizados em tempo real de forma aberta e gratuita para toda sociedade no portal do INMET (<http://www.inmet.gov.br>).

O sub-sistema de comunicação faz a transmissão dos dados coletados que estão armazenados na memória. O INMET utiliza, atualmente, o sistema Autotrac, baseado no satélite BrasilSat, em órbita geossíncrona, que permite comunicação bidirecional, ou seja, o satélite identifica sempre a *EMAS* e a estação receptora em Brasília, em tempo real, provendo comunicação interativa entre a *EMAS* e o INMET. Alternativamente, nos locais onde a comunicação por telefonia celular é confiável e regular, pode-se usá-la para a transmissão, em horários previamente programados.

3.6 Aplicação do Método de Thornthwaite e Mather, 1955

Um passo anterior ao procedimento do cálculo do balanço hídrico sequencial foi o cálculo do balanço hídrico normal mensal, utilizando as médias mensais dos valores de temperatura e precipitação para obtenção dos valores de armazenamento de água no solo e os índices térmicos (I) e (a) para entrada no modelo do balanço hídrico sequencial para cada estação meteorológica.

Utilizou-se a capacidade de campo específico de cada tipo de solo de cada estação meteorológica, aproximando assim, os resultados para condição real de cada estação, mostrando que o período de maior déficit hídrico ocorre

em média nos meses de maio a setembro e o período de excedente hídrico ocorre em média nos meses de outubro a abril acompanhando os períodos seco e chuvoso do Cerrado brasileiro, percebendo-se esse efeito na evapotranspiração real (ETR) que é maior no período chuvoso e menor no período seco, conforme apresentado na Figura 3-14.

O método de THORNTHWAITE e MATHER (1955) foi aplicado para a estimativa da ETR horária fazendo o balanço hídrico de forma mensal e depois sequencial horário por meio de dados de precipitação e temperatura do ar (T_{ar}) instantânea de cada hora observada em cada uma das 32 estações meteorológicas para os anos em que o número de observações foi superior a 95% de presença de dados, ou seja, no máximo com 5% de falha de dados, por meio da planilha no programa excel de ROLIM *et al.* (1998) gerando valores horários de armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração potencial (ET_p) calculada pelo método de THORNTHWAITE (1948), excedente hídrico (EXC), déficit de água no solo (DEF) e a ETR, utilizada para calibrar os modelos.

De forma que o armazenamento de água no solo do ano anterior preenchesse o valor de armazenamento do ano posterior de forma horária.

Obteve-se o perfil da ETR para cada hora, ou seja, cada variação instantânea em cada uma das variáveis refletiu em um valor de ETR específico.

A planilha excel "BHseq63" teve a fórmula da escala de tempo alterada para escala horária atribuindo-se 1 hora = 0,04166667 do dia, ou seja 1 hora correspondente a 1/24 dia e assim o cálculo de armazenamento de água no solo também variou para cada situação.

A Figura 3-15 apresenta o perfil da ETR horária estimada pelo balanço hídrico sequencial para algumas EMAS em estudo (A001, A008, A019, A032, A034, A045, A519 e A536) onde se observa a variação da evapotranspiração durante as horas do dia nos períodos seco e chuvoso, junho e fevereiro, respectivamente, sendo mais elevada no período próximo às 17 h UTC (hora aproximada de passagem do satélite Aqua).

Tal comportamento realça o fato de que a ETR varia durante o dia acompanhando a quantidade de energia disponível para o processo de evapotranspiração, como radiação solar e temperatura do ar (Figura 3-13).

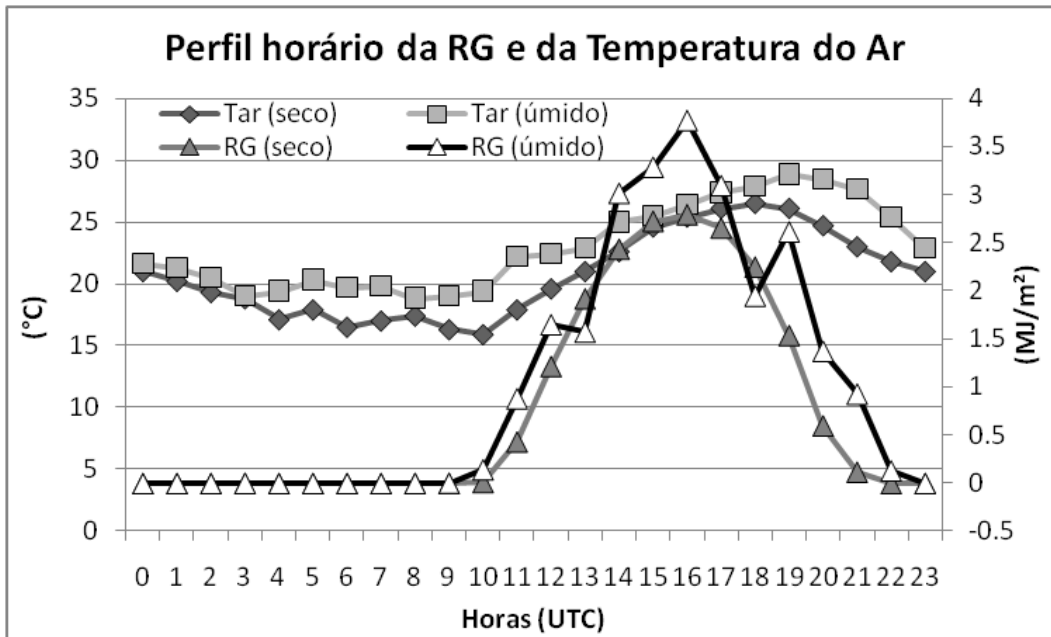


Figura 3-13: Perfil horário da Tar (°C) e da RG (MJ/m²).

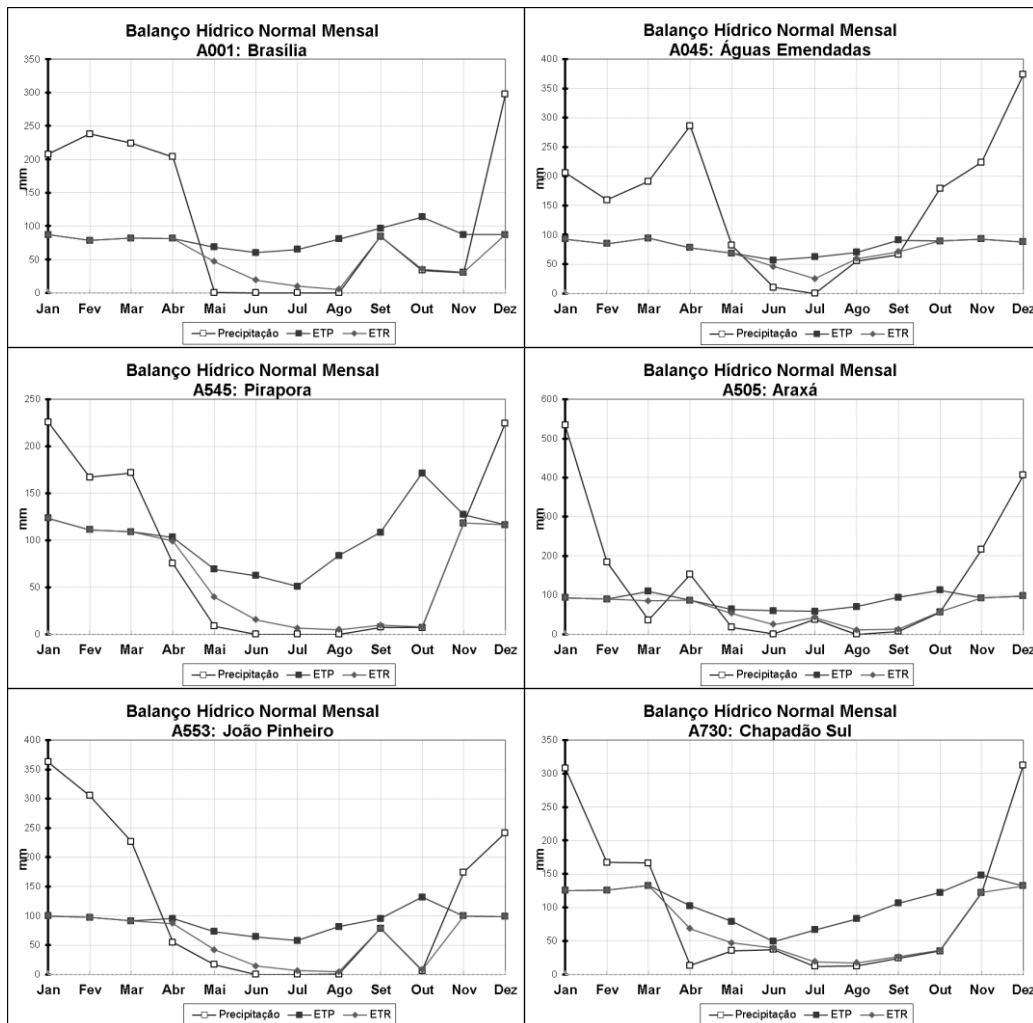


Figura 3-14: Balanço hídrico Normal para as estações A001, A045, A545, A505, A553 e A730.

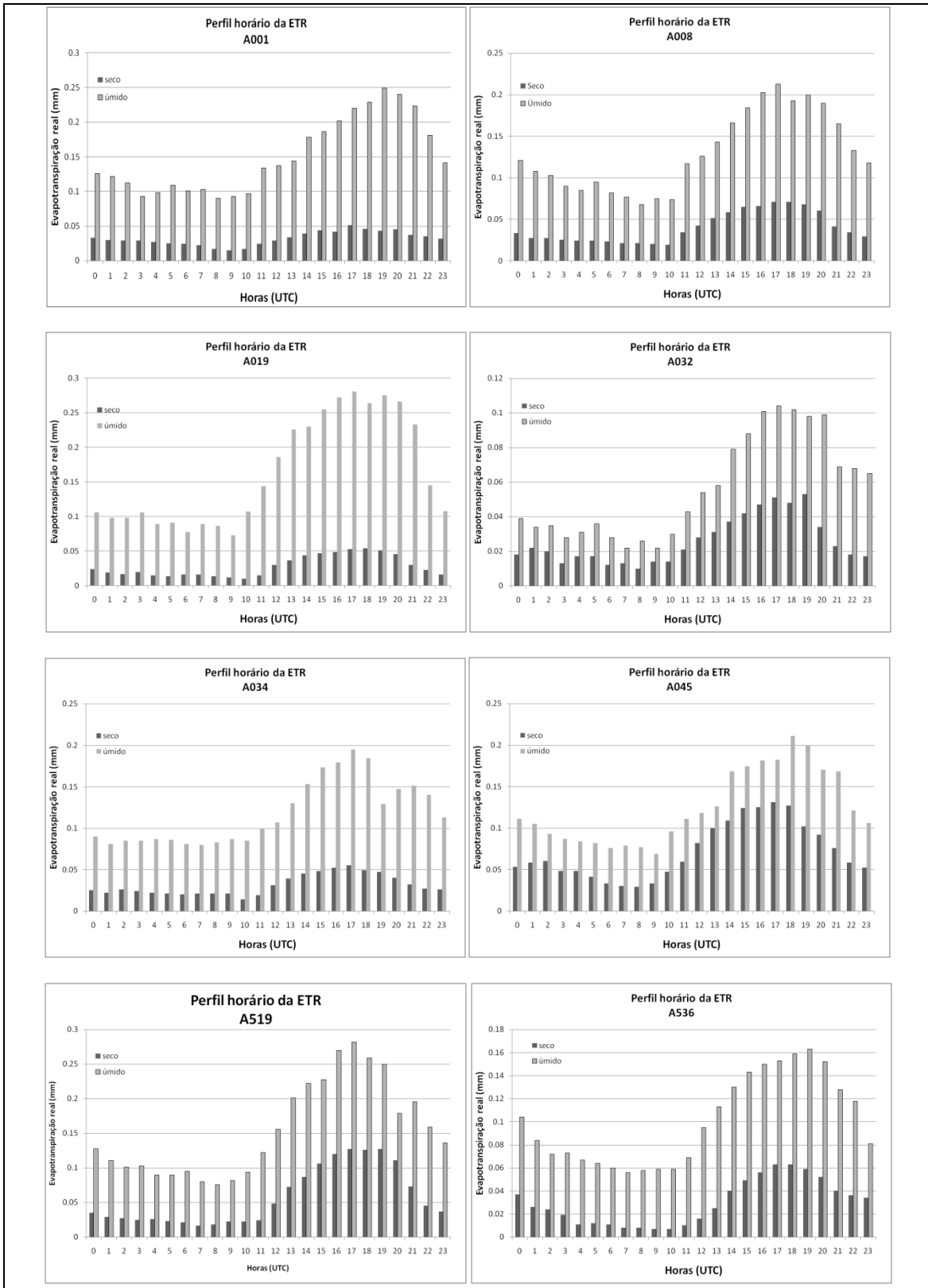


Figura 3-15: Perfil horário da evapotranspiração real (mm) das EMAS: A001, A008, A019, A032, A034, A045, A519 e A536.

3.7 Produtos e Imagens de satélite

Utilizaram-se os produtos MYD09GA, MYD11A1 obtidos por imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua e MCD12C1 derivado de imagens dos satélites Terra e Aqua.

Do produto MYD09GA se extraíram os dados de reflectância nas bandas do visível (espectro do vermelho e do azul) e infravermelho próximo (IR) para cálculo dos índices de vegetação - *EVI* e *NDVI* com resolução espacial de 500 metros. Além dessas, também se extraiu do produto, informações de ângulo zenital do Sol no momento do imageamento.

Do produto MYD11A1 obteve-se a temperatura da superfície (*LST*) com resolução de 1.000 metros.

Do produto MCD12C1, coletaram-se informações a respeito do tipo de cobertura da superfície predominante durante o ano, em resolução de 0,05 graus provida pela *International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)*, *University of Maryland (UMD)* e dos produtos MODIS usando a razão entre o Índice de Área Foliar e a radiação fotossinteticamente ativa (*LAI/FPAR*).

Cada imagem foi reprojeta para o DATUM WGS84, correspondente a EPSG: 4326, conforme descrito em OGP (2011), utilizando o software MODIS Reprojection Tool da *U.S Geological Survey-USGS*, documentado em USGS-MRT (2011), as quais foram convertidas do formato HDF-Hierarchical Data File para o formato GEOTIFF.

Então se empilharam as camadas obtidas de cada produto para cada dia e se armazenou no banco de dados PostgreSQL habilitado com extensão PostGIS Raster versão 2.0.

3.7.1 Cálculo dos índices de vegetação (EVI e NDVI) a partir do produto MYD09GA versão 5

Para o cálculo dos índices de vegetação utilizou-se o conjunto de dados obtidos do produto MYD09GA, pois o mesmo contém medidas nas bandas de reflectância que são utilizadas para a estimativa do Índice de Vegetação Realçado (Enhanced Vegetation Index - *EVI*) e do Índice de

Vegetação por Diferença Normalizada (NormalizedDifferenceVegetation Index - NDVI).

O MYD09GA versão 5 é um produto MODIS diário de reflectância da superfície que provê uma estimativa da reflectância espectral da superfície como se fosse medido ao nível da superfície com ausência do espalhamento ou absorção da atmosfera. Os dados de nível inferior são corrigidos dos efeitos de gases e aerossóis na atmosfera (STRAHLER *et al.*, 1999).

O produto MYD09GA contém as bandas de 1 a 7 com as características descritas na Tabela 2-1 em projeção sinusoidal, com resoluções de 500 m para as de reflectância e resolução de 1 km para demais informações contidas no produto, como, estatísticas de geoposicionamento, qualidade dos dados, cobertura da observação número de observações, ângulos zenitais e azimutais do sensor e do sol e pontos orbitais (LP DAAC-Team, 2008).

A versão 5 do produto MODIS/Aqua de reflectância da superfície são validados, o que significa que a precisão dos dados foi avaliada por estudos em várias regiões e períodos de tempo e embora possam surgir melhorias futuramente, os dados estão prontos para utilização em publicações científicas, conforme (LP DAAC-Team, 2008).

Os dados estão disponíveis desde julho de 2002 em LP DAAC-Team (2008), onde área de cada *tile* abrange uma área de aproximadamente 1.100 km x 1.100 km, sendo que as imagens com resolução espacial de 500 metros possuem dimensão de 1.200 linhas por 1.200 colunas e as imagens com resolução espacial de 1000 metros, possuem 2.400 linhas por 2.400 colunas em formato de dados HDF-EOS com tamanho de aproximadamente 85 MB e projeção sinusoidal.

As informações coletadas do produto MYD09GA versão 5 foram processadas conforme as características descritas no Quadro 3-1 onde multiplicou-se o valor de cada conjunto de dados pelo respectivo fator de escala.

Quadro 3-1: Características das informações do Produto MYD09GA.

Resolução	Conjunto de dados	Unidades	Tipo BIT	No data	Intervalo válido	Fator de escala
500m	sur_refl_b01: 500m Surface Reflectance Band 1 (620-670 nm)	Reflectância	16 - bit	-28.672	-100–16.000	0,0001
	sur_refl_b02: 500m Surface Reflectance Band 2 (841-876 nm)					
	sur_refl_b03: 500m Surface Reflectance Band 3 (459-479 nm)					
	sur_refl_b04: 500m Surface Reflectance Band 4 (545-565 nm)					
	sur_refl_b05: 500m Surface Reflectance Band 5 (1230-1250 nm)					
	sur_refl_b06: 500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)					
	sur_refl_b07: 500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)					
1km	SensorZenith	Graus		-32.767	0–18.000	0,01
	SensorAzimuth					
	SolarZenith					
	SolarAzimuth					

3.7.1.1 Índice de vegetação realçado (Enhanced Vegetation Index - EVI)

O Índice de Vegetação Realçado (EVI) é um índice otimizado projetado para melhorar o sinal da vegetação com aumento da sensibilidade nas regiões com alto teor de biomassa e estrutura da vegetação e dissociação do sinal de interferência do solo e redução de influencia da atmosfera.

O EVI pode ser calculado utilizando a Equação 3-15:

$$EVI = G \times \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{(\rho_{ivp} + C_1\rho_v - C_2\rho_{Azul} + L)}$$

Equação 3-15

Onde ρ_{ivp} , ρ_v e ρ_{AZUL} são reflectâncias da superfície do infravermelho próximo, do vermelho e do azul, respectivamente, corrigidas ou parcialmente corrigidas atmosféricamente (para o espalhamento Rayleigh e para a absorção de ozônio), L é o fator de ajuste para o solo, G é o fator de ganho, C_1 e C_2 são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera. Os valores adotados pelo algoritmo do EVI são: $L=1$, $C_1=6$, $C_2=7,5$ e $G=2,5$ (HUETE *et al.*, 1997).

O EVI apresenta valores numéricos que variam entre -1 e 1 (HUETE *et al.*, 1997), em que os valores negativos indicam a resposta de alvos que não respondem como uma vegetação saudável, podendo ser interpretado como não sendo vegetação, ou seja, pode ser solo exposto, água, nuvens entre outros.

Considerando que o modelo a ser investigado, poderá ter aplicação direta no sensoriamento remoto e que é possível encontrar uma relação exponencial ou logarítmica entre a evapotranspiração real e o índice de vegetação, foi feito um processo de transformação de escala dos valores de EVI, reescalando os valores de -1 a 1 para o intervalo de 0 a 1, por meio da equação utilizada em OLIVEIRA e BAPTISTA (2011), dada por:

$$EVI^* = \frac{EVI + 1}{2}$$

Equação 3-16

3.7.1.2 Índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index - NDVI*)

O índice de vegetação por Diferença Normalizada foi proposta por ROUSE *et al.* (1973), os quais normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1. Para alvos terrestres o limite inferior torna-se aproximadamente

zero (0) e o limite superior aproximadamente 0,80. A normalização é feita pela Equação 3-17.

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v}$$

Equação 3-17

Como ferramenta para monitoramento da vegetação, o NDVI é utilizado para construir perfis sazonal e temporal das atividades da vegetação, permitindo comparações interanuais desses perfis. O perfil temporal do NDVI tem sido utilizado para detectar atividades sazonais e fenológica, duração do período de crescimento, pico de saúde vegetativa, mudança fisiológica das folhas e períodos de senescência.

O NDVI também apresenta valores numéricos que variam entre -1 e +1, em que os valores negativos indicam a resposta de alvos que não respondem como uma vegetação em condições saudáveis, podendo ser interpretado como não sendo vegetação, da mesma forma que o EVI, porém, possui menor sensibilidade, ou seja, as imagens de EVI possuem maior margem de variação de tons de cinza antes de ocorrer a saturação do pixel, melhor realce.

Considerando que o modelo a ser investigado usando NDVI como parâmetro, poderá ter aplicação direta no sensoriamento remoto e que é possível encontrar uma relação exponencial ou logarítmica entre a ETR e o NDVI, foi feito o mesmo processo de transformação de escala dos valores reescalando os valores de -1 a +1 para o intervalo de 0 a +1, por meio da equação utilizada em OLIVEIRA e BAPTISTA (2011), dada por:

$$NDVI^* = \frac{NDVI + 1}{2}$$

Equação 3-18

3.7.2 Temperatura da superfície (LST) com MYD11A1 versão 041

O produto MODIS/Aqua Temperatura da superfície e emissividade (LST/E) é conhecido como MYD11A1 e provê valores de temperatura e

emissividade para cada pixel diariamente com resolução espacial de 1 km e com projeção sinusoidal utilizando o algoritmo de temperatura da superfície conhecido como *Split-window* generalizado (WAN, 1999). O algoritmo é ideal para separar intervalos de vapor de água na coluna atmosférica e temperatura do ar na camada limite inferior e os valores de emissividade de superfície nas bandas 31 e 32 são estimados a partir do tipo de cobertura da superfície (LP DAAC-TEAM, 2008).

O produto MYD11A1 versão 041 (V41) usa uma versão modificada do algoritmo de temperatura de superfície da versão 4 (V4) conjuntamente com uma versão modificada de entrada de dados da versão 5 (V5). Os valores obtidos para V41 tem como objetivo resolver problemas de subestimativa dos produtos gerados na grade de modelagem climática do V5, visto que os produtos V5 subestimam a temperatura em até 6 K especialmente no deserto e áreas semiáridas.

O Produto MYD11A1 V41 iniciou em janeiro de 2007 e continuou até a versão 6 ser reprocessada completamente em 2010.

Os dados estão disponíveis para download desde janeiro de 2007 em LP DAAC-TEAM (2008) com resolução espacial de 1.000 metros cobrindo uma área de 1.100 km x 1.100 km e a imagem tem dimensão de 1.200 linhas por 1.200 colunas em formato de dados HDF-EOS e projeção sinusoidal com tamanho aproximado de 24 MB.

As informações coletadas do produto MYD11A1 versão 041 foram processadas conforme as características descritas no Quadro 3-2, multiplicando-se o valor de cada conjunto de dados pelo respectivo fator de escala e adicionando-se o *offset* para se obter a informação em suas respectivas unidades de medida.

Quadro 3-2: Características das informações do Produto Aqua/MODIS V004 & V041 MYD11A1 (1 Km).

Conjunto de dados	Unidades	Dados	No data	Intervalo válido	Fator de escala	Adicionar Offset
LST (<i>Land surface temperature</i>)	Kelvin	16-bit	0	7.500–65.535	0,02	NA
Band 31 Emissividade	Adimensional	8-bit		1-255	0,002	0,49
Band 32 Emissividade						

Fonte: (LP DAAC-TEAM, 2008)

Sendo assim, multiplicou-se o dado de LST por um fator de escala igual a 0,02, para converter para Kelvin e em seguida subtraído 273,15 para convertê-los em graus Celsius.

3.7.3 Tipo de cobertura do solo a partir do produto MCD12C1 versão 5

O produto MCD12C1 (*MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05 Deg - CMG*) é um produto de baixa resolução espacial (0,05°), que provê o tipo de cobertura dominante, a frequência de distribuição de classes de cobertura de superfície e controle de qualidade de informação. O produto CMG, conhecido como MCD12C1 é derivado usando o mesmo algoritmo que processa o *V005 Global 500 m Land Cover Type Product (MCD12Q1)*, com 500 metros de resolução espacial (STRAHLER, 1999). Ele contém três esquemas de classificação, que descrevem as propriedades da cobertura da superfície derivadas de observações do sensor MODIS à bordo dos satélites Aque e Terra durante um ano. O primeiro esquema de cobertura de superfície identifica 17 classes definidas pelo Programa internacional Biosfera Geosfera (IGBP), que inclui 11 classes de vegetação natural, 3 classes de lotes urbanizados e 3 classes de solo não vegetado. Inclui os seguintes classificadores, derivados de um método de classificação conhecido como árvore de decisão supervisionado.

Tipo 1: Esquema de classificação de vegetação global do IGBP;

Tipo 2: Esquema adotado pela Universidade de Maryland (UMD)

Tipo 3: Esquema derivado da razão entre Índice de Área Foliar (IAF) e Radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) derivado do sensor MODIS.

O produto MCD12C1 versão 5 cobriu os anos de 2001 a 2007. A imagem possui dimensão de 3.600 linha por 7.200 colunas, com resolução espacial de aproximadamente 0,05° o que corresponde cerca de 5600 metros, com dados em até 8 bits no formato HDF-EOS com dez camadas em projeção geográfica (STRAHLER, 1999).

As informações coletadas do produto MCD12C1 versão 5 foram processadas conforme as características descritas no Quadro 3-3 abaixo, onde classifica-se o tipo de cobertura do solo predominante conforme o valor

numérico correspondente na coluna “Classificação” e foram utilizados para análise de influência do tipo de cobertura do solo nos valores de ETR.

Quadro 3-3: Tipos de classificação de cobertura de superfície.

Classificação	IGBP (Tipo 1)	UMD (Tipo 2)	IAF/fPAR (Tipo 3)
0	Água	Água	Água
1	Floresta	Floresta	Gramas/ culturasde cereais
2	Floresta ombrófila	Floresta ombrófila	Arbustos
3	Floresta decídua	Floresta decídua	Cultura de folhas largas
4	Floresta ombrófila decídua	Floresta Decídua de folha larga	Savana
5	Floresta mista	Floresta mista	Floresta de folhas largas
6	Mata densa	Mata densa	Floresta Decídua de folha larga
7	Clareira	Clareira	Floresta de folha estreita
8	Savanas arbóreas	Savanas arbóreas	Florestaestacional decidual
9	Savanas	Savanas	Não vegetado
10	Gramado	Gramado	Urbano
11	Pantano		
12	Cultivo	Cultivo	
13	Urbano com construções	Urbano com construções	
14	Mosaico de cultivo e vegetação natural		
15	Neve e gelo		
16	Solo exposto	Solo exposto	
254	Sem classificação	Sem classificação	Sem classificação
255	Valor nulo	Valor nulo	Valor nulo

Fonte: (LPDAAC-TEAM, 2008)

3.8 Passos para elaboração dos modelos de estimativa da evapotranspiração real instantânea e diária

Com base na metodologia estatística apresentada, foram utilizados os dados de RG observada nas EMAS, EVI* e LST como variáveis explicativas e ETR instantânea observada (estimada pelo balanço hídrico sequencial horário) como variável dependente, para os dias de céu claro no horário próximo ao de imageamento, às 17h UTC, para estimar a evapotranspiração real do instante de obtenção da imagem, então, elaboraram-se alguns modelos lineares, híbridos e por fim não lineares, onde se aplicou o método de Newton-Raphson para encontrar os valores dos parâmetros do modelo adotando o método de Máxima verossimilhança para convergência.

Adotaram-se as seguintes escalas de medida: Os dados de LST representados em graus Celsius, a RG em MJ.m^{-2} , o EVI* e o NDVI* adimensionais com valores variando entre 0 e 1 e a ETR instantânea em mm de água.

Posteriormente, substituiu-se o EVI* pelo NDVI* e elaboraram-se novamente as análises a fim de encontrar uma relação da ETR com NDVI*, RG e LST, elaborando-se novos modelos não lineares.

Tendo encontrado os modelos que melhor explicaram as variações de ETR instantânea em função das variáveis explicativas procurou-se estimar a evapotranspiração real diária multiplicando-se a ETR instantânea pelo número de horas de radiação solar (fotoperíodo) estimado a partir das informações de data (ano, mês, dia, dia de ordem do ano (DOA)) e posição (longitude, latitude e altitude) de cada estação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi elaborada a análise descritiva dos dados para verificar as características de cada variável, conforme PASQUALI (2011). Devido a falta de relação linear entre as variáveis foi adotado o método não linear de Newton-Raphson com convergência por uso do método de máxima verossimilhança.

Adotou-se primeiramente o *EVI** para representar a variação sazonal da vegetação e em seguida o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*NDVI**) a fim de se encontrar uma relação específica para essa variável, devido ao fato da mesma ser mais simples para obtenção e exigir menor número de bandas para seu cálculo.

Além de utilizar os dados em sua forma original, aplicaram-se também transformações, como o logarítmico, exponencial, variáveis ao quadrado e ao cubo para identificar padrões de comportamento das variáveis em função da *ETR* quando essa se apresentava com valores abaixo e acima de 0,05 mm, valor esse, evidenciado pelos gráficos de dispersão e que está imediatamente abaixo da média dos dados de *ETR*. Observou-se, inicialmente, maior correlação, porém fracas, para os valores de $ETR > 0,05$ mm, e fraca correlação quando os valores de $ETR \leq 0,05$ mm.

A fundamentação física para explicação dessa observação se deve principalmente ao fato da necessidade de que haja uma quantidade mínima de umidade no solo para que ocorra evapotranspiração.

Foram feitos agrupamentos por estações pelos métodos de ligação completa e média com distância Euclidiana para se obter grupos de estações semelhantes com relações mais claras, o que ajudou perceber uma grande mudança de comportamento na relação das variáveis para quando a $ETR \leq 0,05$ mm e $ETR > 0,05$ mm partindo-se então para solução utilizando modelos não lineares.

Com estes modelos não lineares, foram calculados coeficientes de determinação melhores em relação às tentativas anteriores, porém quando realizado o diagnóstico percebeu-se que algumas suposições para um modelo não linear exponencial não estavam sendo atendidas, como as hipóteses de normalidade e independência dos resíduos. A primeira pode ser relevada já

que modelos dessa natureza são robustos a fuga de normalidade, porém resíduos dependentes não são desejáveis.

Observando o gráfico de resíduos por valores preditos verificou-se que o padrão fica evidente nos valores em que a predição da variável *ETR* é menor que 0,05 mm. Então se procurou ajustar um modelo somente para valores de *ETR* maior que 0,05 mm, obtendo-se um modelo muito melhor do ponto de vista do coeficiente de determinação e suposição de independência dos resíduos.

A partir deste modelo obteve-se um gráfico para os valores observados e os valores preditos no tempo, a fim de verificar a qualidade do modelo, observou-se então que existem alguns problemas de subestimação e superestimação em pontos distintos, porém nota-se a manutenção da tendência com o passar do tempo, ou seja, o modelo é sensível para o período mais úmido e menos úmido durante o ano, contanto que haja o mínimo de umidade para evapotranspiração.

Sendo assim, são apresentados alguns resultados sobre a análise descritiva das variáveis e em seguida um estudo sobre as correlações entre a variável resposta e as variáveis explicativas, o que levou a concluir que a variável temperatura da superfície (*LST*) não possui boa relação com a variável resposta *ETR*.

Os modelos lineares não são adequados para este estudo. Por fim, são analisados quatro modelos não lineares.

4.1 Análise descritiva

Observando a Figura 4-1 verificou-se maior concentração dos valores de $ETR \leq 0,05$ mm, resultantes do maior número de observações obtidas no período menos chuvoso, visto que as imagens de satélite foram predominantemente coletadas em dias de céu claro para cada estação meteorológica.

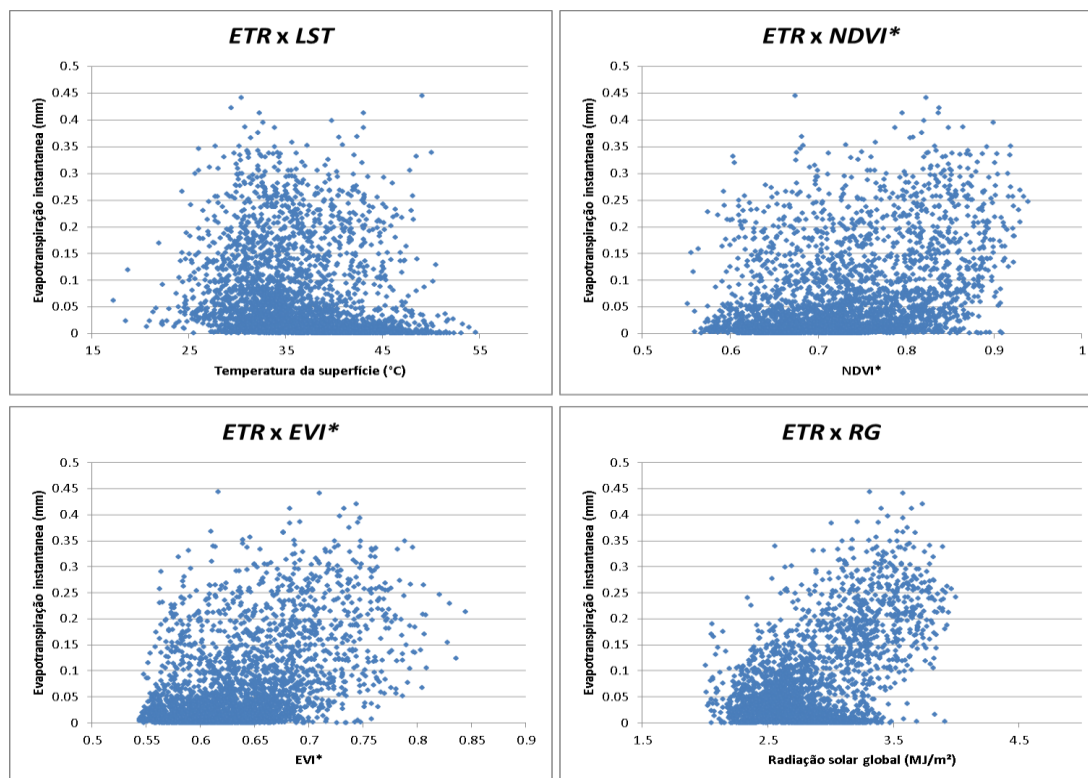


Figura 4-1: Dispersão entre (*ETR*) e variáveis explicativas: *LST*, *NDVI** e *EVI** e *RG*.

A média, mediana, moda, desvio padrão, variância, amplitude e amplitude interquartílica foram calculadas para cada uma das variáveis, *EVI**, (Quadro 4-1), *LST* em °C, (Quadro 4-2), *RG* em MJ.m⁻², (Quadro 4-3) e *ETR* em mm (Quadro 4-4) do instante da passagem do satélite Aqua.

Quadro 4-1: Análise descritiva do Índice de Vegetação Realçado (*EVI**).

Medidas Estatísticas Básicas (<i>EVI*</i>)			
Posição		Variabilidade	
Média	0,632074	Desvio Padrão	0,05097
Mediana	0,623665	Variância	0,00260
Moda	0,545375	Amplitude	0,30067
N	3361	Amplitude Interquartílica	0,06566
Variações (<i>EVI*</i>)			
Assimetria	0,88901709	Curtose	0,62092813
Soma dos quadrados (SS) não corrigido	1351,50994	Soma dos quadrados (SS) corrigido	8,72997978
Coef. Variação	8,06433965	Erro médio padrão	0,00087923

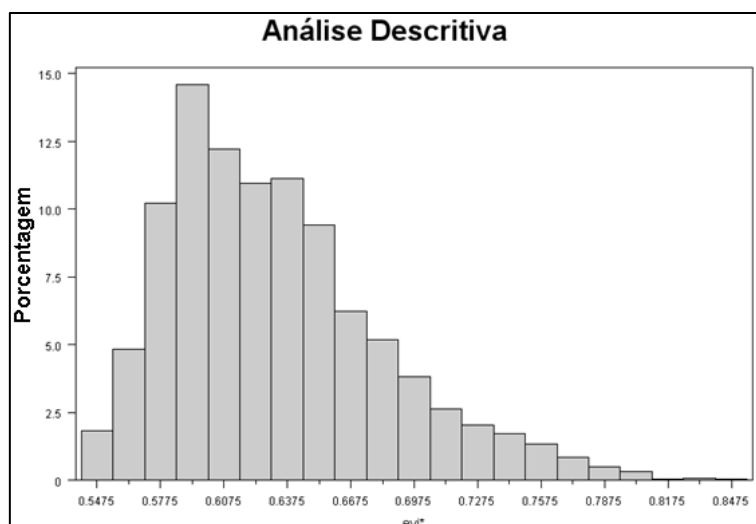


Figura 4-2: Histograma de frequência das observações de EVI*.

Quadro 4-2: Análise descritiva da temperatura da superfície (LST).

Medidas Estatísticas Básicas (LST)			
Posição		Variação	
Média	36,52387	Desvio Padrão	5,58972
Mediana	36,05000	Variância	31,24498
Moda	32,89000	Amplitude	37,42000
N	3361	Amplitude Interquartílica	7,78000
Variações (LST)			
Assimetria	0,23347625	Curtose	-0,2374621
Soma dos quadrados (SS) não corrigido	4588534,09	Soma dos quadrados (SS) corrigido	104983,138
Coef. Variação	15,3042953	Erro médio padrão	0,0964175

A Figura 4-3 apresenta um histograma das observações de temperatura da superfície para todo período.

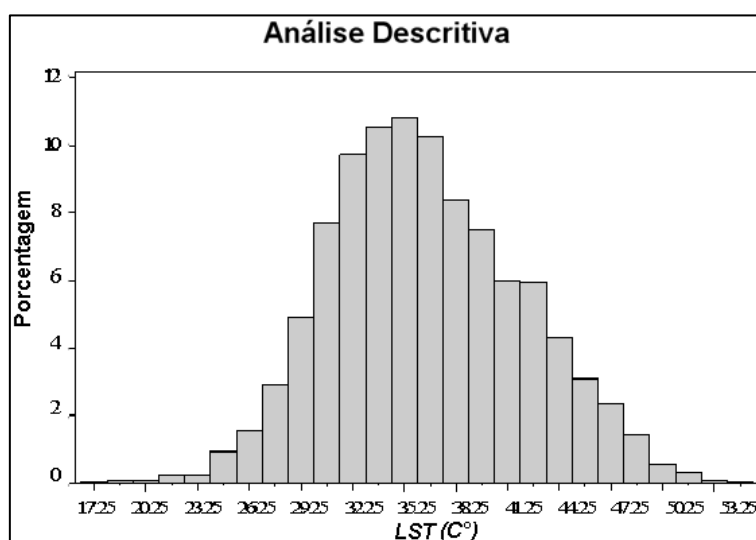


Figura 4-3: Histograma de frequência das observações de temperatura da superfície pelo MODIS/Aqua.

Quadro 4-3: Análise descritiva da Radiação Solar Global (RG).

Medidas Estatísticas Básicas (RG)			
Posição		Variação	
Média	2,826733	Desvio Padrão	0,36035
Mediana	2,771301	Variância	0,12985
Moda	2,542000	Amplitude	1,99342
N	3361	Amplitude Interquartílica	0,47598
Variações (RG)			
Assimetria	0,61341248	Curtose	0,0809866
Soma dos quadrados (SS) não corrigido	27292,0936	Soma dos quadrados (SS) corrigido	436,293471
Coef. Variação	12,7477908	Erro médio padrão	0,00621563

Nota: A moda é a menor de 4 modas encontradas.

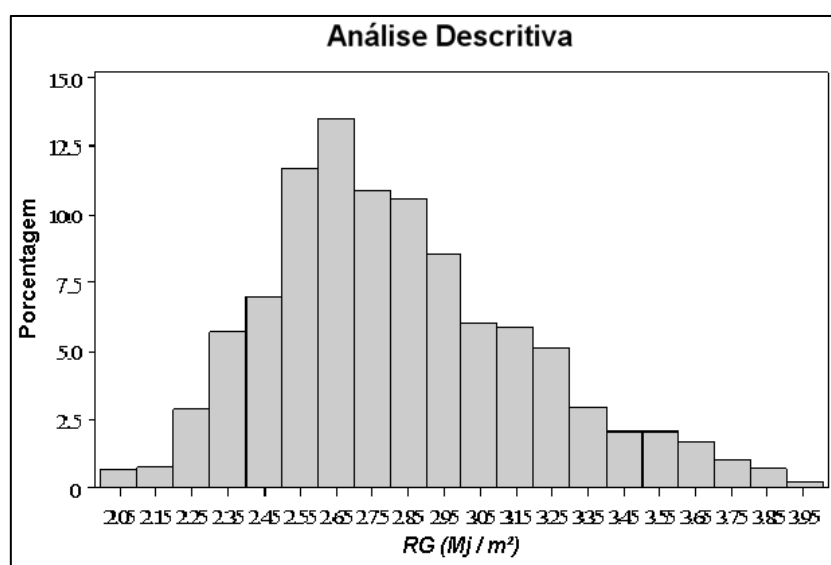


Figura 4-4: Histograma de frequência das observações de Radiação solar global – estação meteorológica.

Quadro 4-4: Análise descritiva da Evapotranspiração real (ETR).

Medidas Estatísticas Básicas (ETR)			
Posição		Variação	
Média	0,063324	Desvio Padrão	0,08278
Mediana	0,024000	Variância	0,00685
Moda	0,000100	Amplitude	0,44390
N	3361	Amplitude Interquartílica	0,08800
Variações (ETR)			
Assimetria	1,6324	Curtose	2,0234
Soma dos quadrados (SS) não corrigido	36,5019	Soma dos quadrados (SS) corrigido	23,0248
Coef. Variação	130,7264	Erro médio padrão	0,00143

Observa-se que o desvio padrão para a variável resposta chega a ser maior que a média, o que resulta em um coeficiente de variação maior que 100%, (130.7%). Isso confirma a grande variabilidade dos dados e a dificuldade na análise e modelagem dos mesmos.

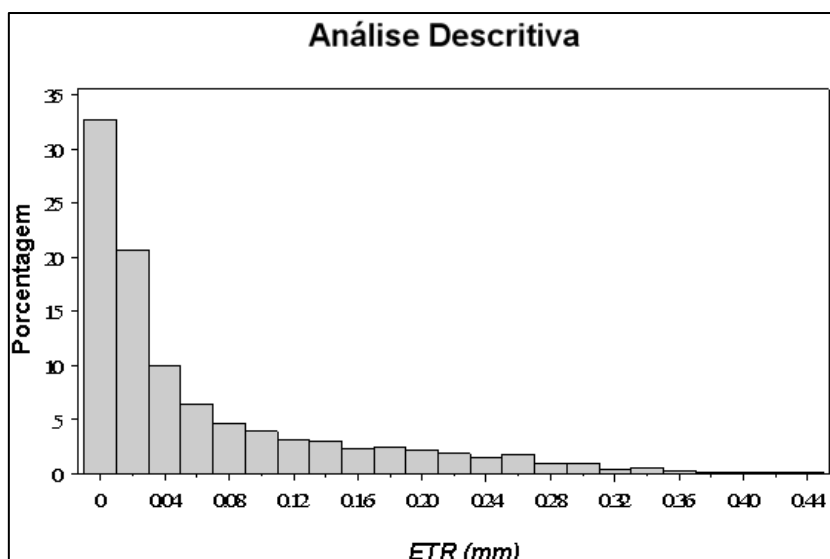


Figura 4-5: Histograma de frequência das observações de Evapotranspiração Real – Thornthwaite e Mather, 1955.

4.2 Análise das correlações

Para os dados brutos, sem nenhuma alteração, observaram-se os coeficientes de correlação linear de Pearson e seus respectivos p-valores.

Os p-valores se referem à hipótese de que os coeficientes são iguais a zero. Observa-se que a um nível de significância de 0,05, todos os testes levam a rejeitar a hipótese de nulidade. Porém, observa-se que a relação das variáveis explicativas com a variável resposta (*ETR*) não é muito alta.

Observando os *gráficos de dispersão* abaixo, a última linha dos gráficos, que mostra as relações das variáveis explicativas com a variável resposta, onde se percebe muito bem essa falta de relação linear e não se consegue encontrar nenhum padrão nos gráficos.

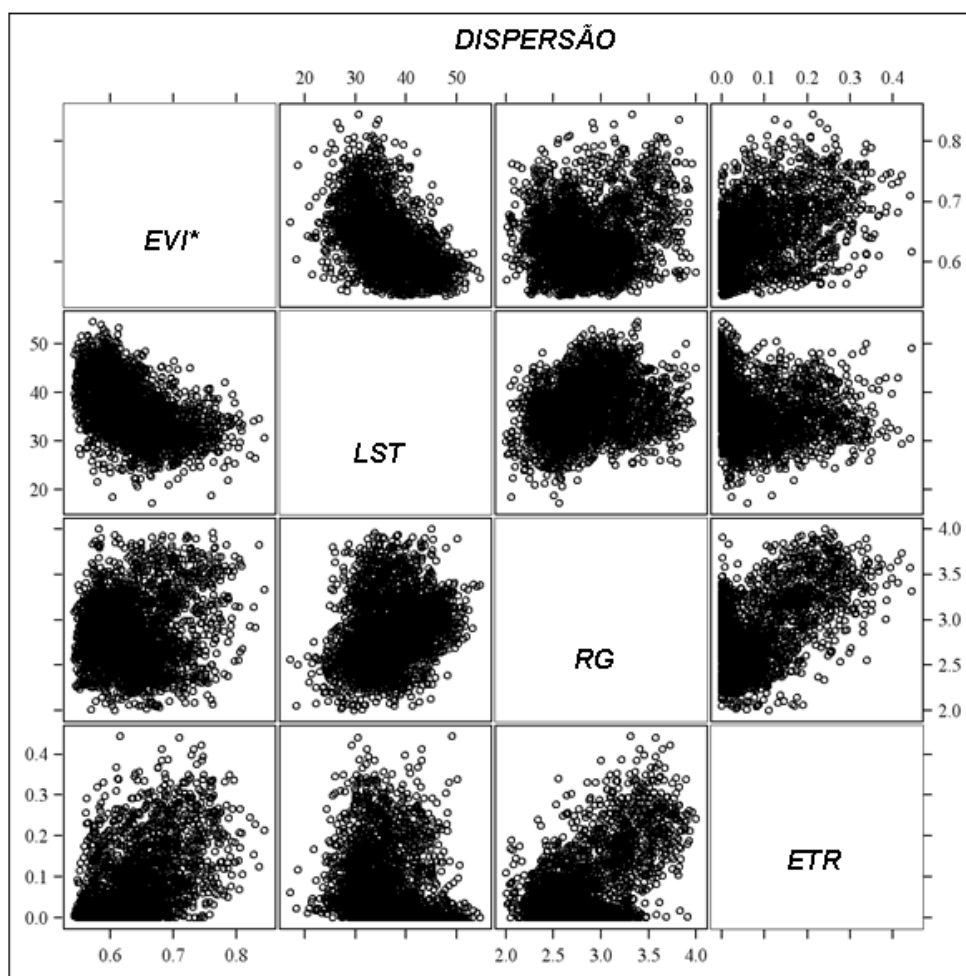


Figura 4-6: Gráfico de dispersão das variáveis *EVI**, *LST*, *RG* e *ETR*.

Foram realizadas as seguintes transformações para cada uma das variáveis: Logaritmo natural, quadrado, exponencial e cubo. O que resultou nas seguintes correlações utilizando apenas metade das observações:

Quadro 4-5: Coeficientes de correlação de Pearson.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1681									
Prob > r under H0: Rho=0									
	<i>LST</i>	<i>expLST</i>	<i>InLST</i>	<i>LST</i> ²	<i>LST</i> ³	<i>RG</i>	<i>expRG</i>	<i>InRG</i>	
<i>ETR</i>	-0,19873 <0,0001	-0,03573 0,1431	-0,19445 <0,0001	-0,20013 <0,0001	-0,19928 <0,0001	0,52037 <0,0001	0,57358 <0,0001	0,49360 <0,0001	
<i>InETR</i>	-0,37763 <0,0001	-0,05295 0,0300	-0,36935 <0,0001	-0,38093 <0,0001	-0,38006 <0,0001	0,22609 <0,0001	0,27390 <0,0001	0,20708 <0,0001	
	<i>RG</i> ²	<i>RG</i> ³	<i>EVI*</i>	<i>expEVI*</i>	<i>InEVI*</i>	<i>EVI*</i> ²	<i>EVI*</i> ³	<i>ETR</i>	<i>InETR</i>
<i>ETR</i>	0,54315 <0,0001	0,56141 <0,0001	0,50155 <0,0001	0,50540 <0,0001	0,49414 <0,0001	0,50730 <0,0001	0,51122 <0,0001	1,00000	0,72670 <0,0001
<i>InETR</i>	0,24393 <0,0001	0,26002 <0,0001	0,40132 <0,0001	0,40314 <0,0001	0,39702 <0,0001	0,40407 <0,0001	0,40516 <0,0001	0,72670 <0,0001	1,00000

Em relação às variáveis LST, EVI* e suas transformações não há melhorias, utilizando o logaritmo da ETR. A exponencial da RG aumenta a correlação linear com a ETR.

Optou-se então por separar o banco de dados por valores de ETR, ($ETR \leq 0,05$ mm e $ETR > 0,05$ mm) devido ao comportamento diferente nestas duas faixas de valores nos gráficos de dispersão (Figura 4-1).

Sendo assim, para medidas de $ETR \leq 0,05$ mm, obtiveram-se correlações lineares baixas:

Quadro 4-6: Coeficientes de correlação de Pearson.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1048								
Prob > r under H0: Rho=0								
	LST	expLST	lnLST	LST ²	LST ³	RG	expRG	lnRG
ETR	-0,33840 <0,0001	-0,03487 0,2594	-0,34401 <0,0001	-0,32869 <0,0001	-0,31613 <0,0001	-0,28041 <0,0001	-0,27008 <0,0001	-0,27971 <0,0001
	RG ²	RG ³	EVI*	expEVI*	lnEVI*	EVI* ²	EVI* ³	ETR
ETR	<u>-0,27908</u> <0,0001	<u>-0,27572</u> <0,0001	<u>0,13223</u> <0,0001	<u>0,13433</u> <0,0001	<u>0,12850</u> <0,0001	<u>0,13560</u> <0,0001	<u>0,13858</u> <0,0001	<u>1,00000</u>

Para $ETR > 0,05$ mm obteve-se:

Quadro 4-7: Coeficientes de correlação de Pearson.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 633								
Prob > r under H0: Rho=0								
	LST	expLST	lnLST	LST ²	LST ³	RG	expRG	lnRG
ETR	0,11355 0,0042	-0,02916 0,4640	0,11600 0,0035	0,10947 0,0058	0,10409 0,0088	0,62383 <0,0001	0,61419 <0,0001	0,61670 <0,0001
Coeficientes de correlação de Pearson, N = 633								
Prob > r under H0: Rho=0								
	RG ²	RG ³	EVI*	expEVI*	lnEVI*	EVI* ²	EVI* ³	ETR
ETR	<u>0,62591</u> <0,0001	<u>0,62340</u> <0,0001	<u>0,28069</u> <0,0001	<u>0,28202</u> <0,0001	<u>0,27773</u> <0,0001	<u>0,28265</u> <0,0001	<u>0,28356</u> <0,0001	<u>1,00000</u>

4.3 Validação do modelo

Todos os modelos foram construídos a partir da metade das observações a um nível de significância de 0,05. A outra parte das observações foi utilizada para a validação do modelo.

Analisando os dados que não foram utilizados na modelagem, verificou-se que o modelo que utiliza valores de $ETR > 0,05$ mm tem uma boa capacidade de predição, porém, ainda atrelado ao agrupamento das estações,

o que não é desejável para o objetivo final da pesquisa, já que o objetivo desta é obter um modelo de predição para a variável *ETR* a partir de qualquer ponto no espaço geográfico, proveniente não necessariamente de uma estação. Sendo assim, ajustou-se o mesmo modelo, porém sem a necessidade de separação de grupos, o qual também foi validado e apresentou uma boa capacidade de predição.

4.4 Testes de modelos lineares com *EVI**

Pelas correlações, percebeu-se que a variável *RG* pareceu estar mais correlacionada com a *ETR* do que a variável *LST*. Pelo observado nos Quadros 4-6 e 4-7 se percebe que a variável *expRG* (exponencial da radiação solar global) teve uma melhor performance, o que motivou a testar os próximos modelos, em que os coeficientes de correlação são apresentados no Quadro 4-8 com ajuste muito baixo para $ETR \leq 0,05$ mm.

Quadro 4-8: Coeficientes de correlação de Pearson.

Modelos	Metade da amostra (R ²)	<i>ETR</i> ≤ 0,05 mm (R ²)	<i>ETR</i> > 0,05 mm (R ²)
<i>ETR (RG)</i>	0,2708	0,0786	0,3892
<i>ETR (expRG)</i>	0,3290	0,0799	0,3622
<i>ETR (expRG, EVI*)</i>	0,4773	0,0628	0,3891
<i>ETR (RG, EVI*)</i>	0,4376	0,0847	0,4269

4.4.1 Agrupamento dos dados

Sob a hipótese de que as estações meteorológicas tenham comportamento diferente entre si e que, agrupando as de comportamento semelhante seja possível reduzir a variabilidade dos dados. Tentou-se utilizar vários métodos para agrupar as estações, sempre pela variável resposta, verificar dendogramas (Figuras 4-7 e 4-8).

As técnicas de conglomerados ou *clusters* são frequentemente classificadas em dois tipos: técnicas hierárquicas e não hierárquicas, sendo que as hierárquicas são classificadas em aglomerativas e divisivas. As técnicas hierárquicas, na maioria das vezes, são utilizadas em análises exploratórias

dos dados com o intuito de identificar possíveis agrupamentos e o valor provável do número de grupos. Já para o uso de técnicas não hierárquicas, é necessário que o valor do número de grupos já esteja pré-especificado.

Então, nesse caso, são utilizadas as técnicas hierárquicas, tendo em vista o caráter exploratório do comportamento da evapotranspiração em relação às outras variáveis.

As técnicas hierárquicas aglomerativas partem do princípio de que no início do processo de agrupamento tem-se n conglomerados, ou seja, cada elemento do conjunto de dados observado é considerado como sendo um conglomerado isolado. Em cada passo do algoritmo, os elementos amostrais vão sendo agrupados, formando novos conglomerados até o momento no qual todos os elementos considerados estão num único grupo. Portanto, no estágio inicial do processo de agrupamento, cada elemento amostral é considerado como um cluster de tamanho 1 e no último estágio de agrupamento tem-se apenas um único cluster constituído de todos os elementos amostrais.

Em termos de variabilidade, no estágio inicial, tem-se a partição com a menor dispersão interna possível, já que todos os conglomerados tem um único elemento e, logo, a variância de cada um deles é igual a zero. No estágio final, tem-se a maior dispersão interna possível, já que todos os elementos amostrais estão num único cluster. Em cada estágio do procedimento de agrupamento, os grupos são comparados através de alguma medida de similaridade (ou dissimilaridade) previamente definida. Os passos principais para aplicação das técnicas hierárquicas aglomerativas podem ser resumidas da seguinte forma:

- a. Cada elemento constitui um cluster de tamanho 1. Portanto, tem-se n clusters;
- b. Em cada estágio do algoritmo de agrupamento, os pares de conglomerados mais similares são combinados e passam a constituir um único conglomerado.
- c. Propriedade de hierarquia. Em cada estágio do algoritmo, cada novo conglomerado formado é um agrupamento de conglomerados formados nos estágios anteriores. Se dois elementos amostrais aparecem juntos num mesmo cluster em

algum estágio do processo de agrupamento, eles aparecerão juntos em todos os estágios subsequentes;

- d. Devido à propriedade de hierarquia, é possível construir um gráfico chamado de Dendrograma ou Dendograma (TIMM, 2002). Dendograma é um gráfico em forma de árvore no qual a escala vertical indica o nível de similaridade (ou dissimilaridade). No eixo horizontal, são marcados os elementos amostrais numa ordem conveniente relacionada à história de agrupamento. As linhas verticais, partindo dos elementos amostrais agrupados, tem altura correspondente ao nível em que os elementos foram considerados semelhantes, isto é, a distância do agrupamento ou o nível de similaridade.

Existem vários métodos de agrupamentos hierárquicos (MINGOTI, 2007). Para esse estudo foram utilizados os métodos: Método de ligação completa (*Complete Linkage*) e o Método da média das distâncias (*Average Linkage*), os quais serão brevemente descritos a seguir.

4.4.1.1 Método de ligação completa

Nesse método, a similaridade entre dois conglomerados é definida pelos elementos que são “menos semelhantes” entre si (SNEATH, 1957). Em cada estágio do processo de agrupamento, a medida é calculada para todos os pares de grupos, sendo então, aqueles que apresentarem o menor valor da distância, isto é, o menor valor de máximo.

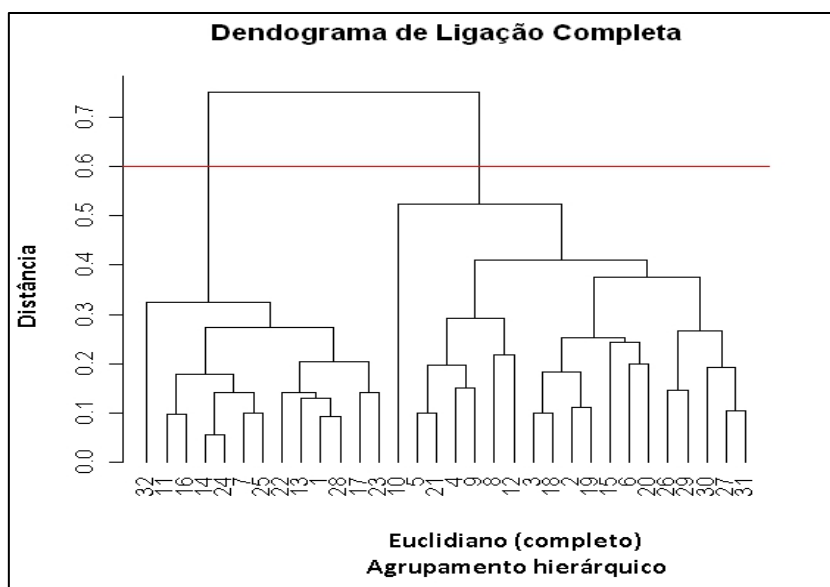


Figura 4-7: Dendrograma ligação completa com distância Euclidiana.

4.4.1.2 Método da média das distâncias

Este método trata a distância entre dois conglomerados como a média das distâncias entre todos os pares de elementos que podem ser formados com os elementos dos dois conglomerados que estão sendo comparados.

Observa-se que as separações apresentam pouca diferença entre si, mas para a análise talvez esta pequena diferença seja essencial.

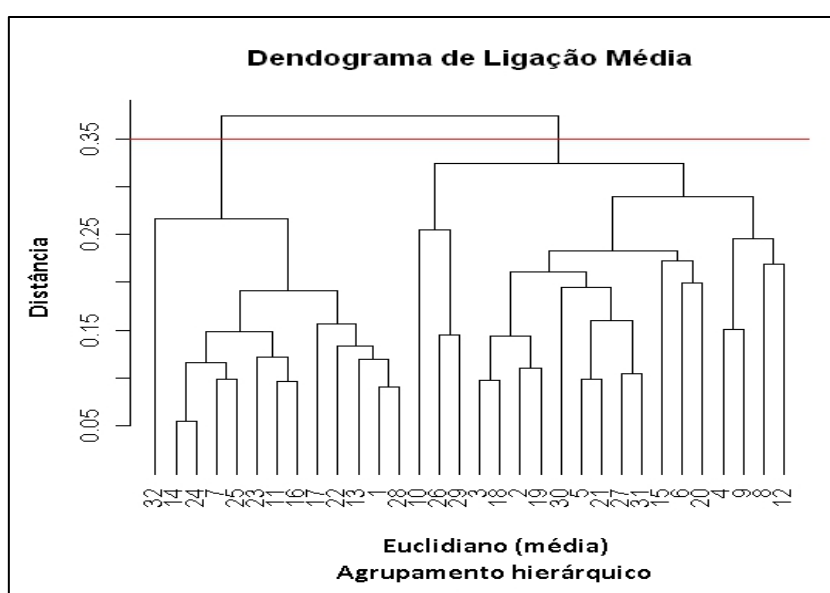


Figura 4-8: Dendrograma de ligação média com distância Euclidiana.

A Figura 4-9 apresenta a distribuição espacial das estações separadas pelos dois métodos de agrupamento, em que as mesmas estações ficaram nos mesmos grupos após as duas tentativas. Então na Figura 4-9, as estações que ficaram no Grupo 1 são representadas, por um círculo e as que ficaram no Grupo 2 são representadas por um quadrado.

Observando a Figura 4-9, também se verifica que a distribuição geográfica das estações é aleatória, havendo proximidade de estações mesmo com comportamentos heterogêneos, indicando que mesmo posicionadas em região climaticamente semelhante ocorre diferença no comportamento da *ETR*, levando a concluir que esta variável é resposta das condições edafoclimáticas e paisagística local.

As estações foram codificadas da seguinte maneira para que houvesse melhor apresentação visual nos dendogramas.

O Grupo 1 possui estações com os códigos: 1, 7, 11,13,14, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 28, 32 e no Grupo 2 as estações 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 29, 30 e 31, (Quadro 4-9) sendo calculadas as correlações de Pearson para cada grupo.

Quadro 4-9: Agrupamento das estações meteorológicas automáticas.

Grupo 1 Estações = código	Grupo 2 Estações = código
A001 = 1	A003 =2
A017 = 7	A008 =3
A023 =11	A009 =4
A034 = 13	A010 =5
A036 = 14	A012 =6
A039= 16	A018 =8
A528= 22	A019 =9
A536= 23	A022 = 10
A537= 24	A032 = 12
A538= 25	A038 = 15
A045= 17	A505 = 18
A544= 28	A507 = 19
A730= 32	A519 = 20
	A520 = 21
	A542 = 26
	A543 = 27
	A545 = 29
	A547 = 30
	A553 = 31

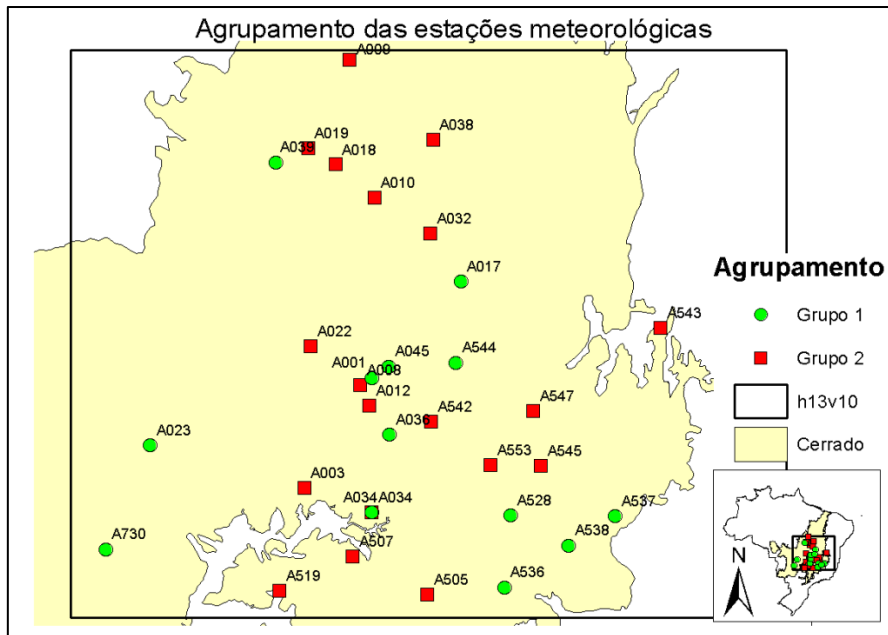


Figura 4-9: Distribuição geográfica das estações meteorológicas automáticas.

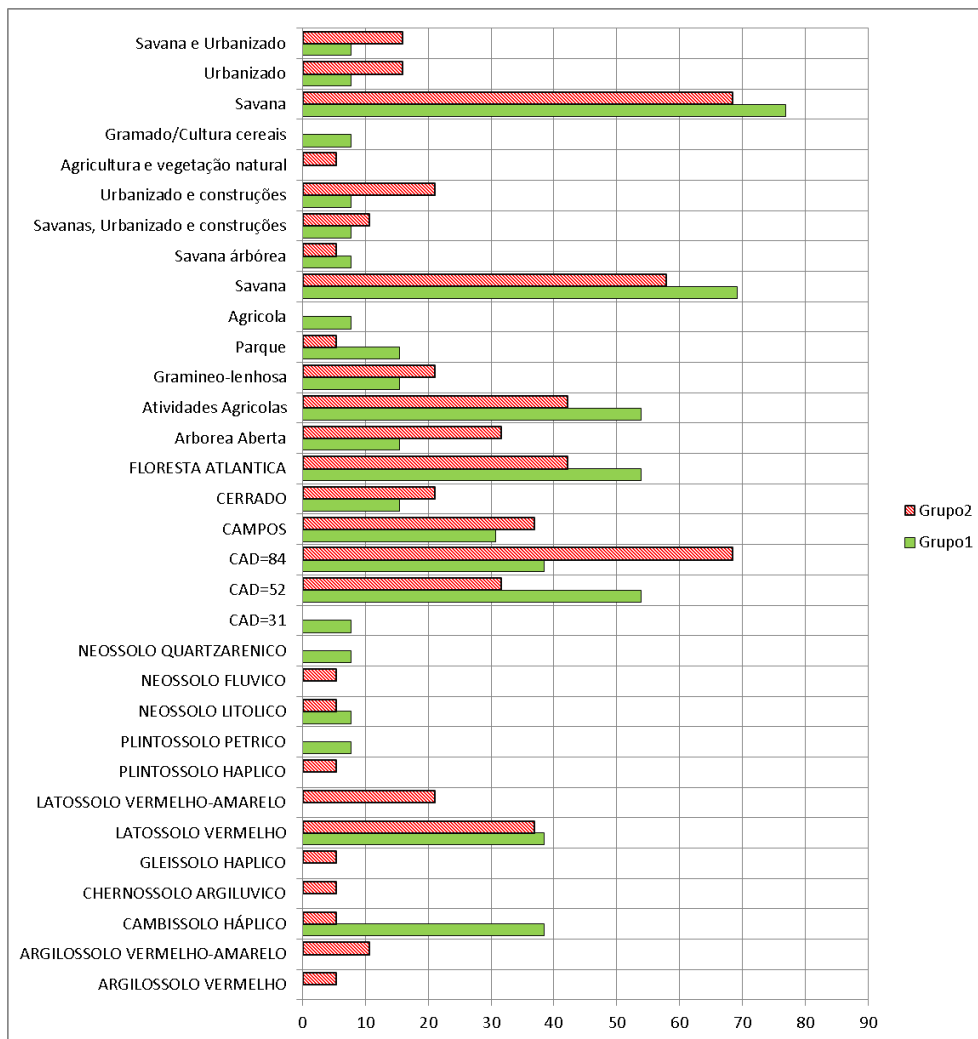


Figura 4-10: Características ambientais de cada estação por grupo.

Com o objetivo de encontrar alguma característica em comum, no sentido edafoclimático e paisagístico, para as estações que se agruparam foram então organizados os metadados para cada estação (codest) com as informações sobre tipo de solo (solo), capacidade de água disponível (CAD), subgrupos e classes de savana conforme IBGE e MMA (2004) e cobertura de superfície segundo o *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) disponíveis no produto MODIS (MCD12C1), o qual disponibiliza dados de tipo cobertura de superfície em resolução espacial de 0,05 graus, derivado usando o mesmo algoritmo que produz o tipo de cobertura de superfície a cada 500 metros (MCD12Q1), como descrito em LP_DAAC_TEAM (2008).

Constatou-se através dos dados disponíveis que não havia algum elemento que fosse comum ao grupo (Figuras 4-9 e 4-10).

Pois os grupos possuem características que se alternam.

Para o Grupo 1 tem-se:

Quadro 4-10: Descrição do ambiente de cada estação do Grupo 1.

codest	Solo	CAD	Classe	IGBP	IAF/FPAR
A001	LATOSSOLO VERMELHO	84	Arbórea Aberta	Urbanizado e construções	Urbano
A017	NEOSSOLO QUARTZARENICO	31	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A023	CAMBISSOLO HÁPLICO	52	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A034	LATOSSOLO VERMELHO	84	Atividades Agrícolas	Savanas, Urbanizado e construções	Savana e Urbanizado
A036	CAMBISSOLO HÁPLICO	52	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A039	PLINTOSSOLO PETRICO	52	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A045	LATOSSOLO VERMELHO	84	Arbórea Aberta	Savana arbórea	Savana
A528	CAMBISSOLO HÁPLICO	52	Gramíneo-lenhosa	Savana	Savana
A536	CAMBISSOLO HÁPLICO	52	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A537	NEOSSOLO LITOLICO	52	Gramíneo-lenhosa	Savana	Savana
A538	CAMBISSOLO HÁPLICO	52	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A544	LATOSSOLO VERMELHO	84	Parque	Savana	Savana
A730	LATOSSOLO VERMELHO	84	Parque	Agrícola	Gramado/Cultivo de cereais

Quadro 4-11: Coeficientes de correlação de Pearson para o Grupo 1.

GRUPO 1 - Coeficientes de correlação de Pearson, N = 581								
Prob > r under H0: Rho=0								
	<i>RG</i> ²	<i>RG</i> ³	<i>EVI</i> [*]	<i>expEVI</i> [*]	<i>InEVI</i>	<i>EVI</i> ²	<i>EVI</i> ³	<i>ETR</i>
<i>ETR</i>	<u>0,49922</u> <u><0,0001</u>	<u>0,51830</u> <u><0,0001</u>	<u>0,48312</u> <u><0,0001</u>	<u>0,48337</u> <u><0,0001</u>	<u>0,48089</u> <u><0,0001</u>	<u>0,4834</u> <u><0,0001</u>	<u>0,48166</u> <u><0,0001</u>	<u>1,0000</u>
	<i>LST</i>	<i>expLST</i>	<i>InLST</i>	<i>LST</i> ²	<i>LST</i> ³	<i>RG</i>	<i>expRG</i>	<i>InRG</i>
<i>ETR</i>	<u>-0,10768</u> <u>0,0094</u>	<u>-0,08014</u> <u>0,0535</u>	<u>-0,10150</u> <u>0,0144</u>	<u>-0,11281</u> <u>0,0065</u>	<u>-0,11711</u> <u>0,0047</u>	<u>0,47612</u> <u><0,0001</u>	<u>0,53265</u> <u><0,0001</u>	<u>0,44936</u> <u><0,0001</u>

E para o Grupo 2:

Quadro 4-12: Descrição do ambiente de cada estação do Grupo 2.

codest	solo	CA D	classe	IGBP	IAF/FPAR
A003	LATOSSOLO VERMELHO	84	Atividades Agrícolas	Urbanizado e construções	Savana
A008	LATOSSOLO VERMELHO	84	Arbórea Aberta	Savanas, Urbanizado e construções	Savana e Urbanizado
A009	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	84	Atividades Agrícolas	Urbanizado e construções	Urbanizado
A010	ARGILOSSOLO VERMELHO-AMARELO	52	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A012	LATOSSOLO VERMELHO	84	Arbórea Aberta	Savana	Savana
A018	GLEISSOLO HAPLICO	84	Arbórea Aberta	Savana	Savana
A019	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	84	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A022	CHERNOSSOLO ARGILUVICO	84	Atividades Agrícolas	Savana	Savana
A032	PLINTOSSOLO HAPLICO	52	Arbórea Aberta	Savana	Savana
A034	LATOSSOLO VERMELHO	84	Atividades Agrícolas	Savanas, Urbanizado e construções	Savana e Urbanizado
A038	CAMBISSOLO HÁPLICO	52	Parque	Savana	Savana
A505	LATOSSOLO VERMELHO	84	Gramíneo-lenhosa	Agricultura e vegetação natural	Savana e Urbanizado
A507	LATOSSOLO VERMELHO	84	Atividades Agrícolas	Urbanizado e construções	Urbanizado
A519	ARGILOSSOLO VERMELHO	52	Atividades Agrícolas	Savana arbórea	Savana
A542	LATOSSOLO VERMELHO	84	Arbórea Aberta	Savana	Savana
A543	ARGILOSSOLO VERMELHO-AMARELO	52	Arbórea Aberta	Savana	Savana
A545	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	84	Gramíneo-lenhosa	Urbanizado e construções	Urbanizado
A547	NEOSSOLO FLUVICO	52	Gramíneo-lenhosa	Savana	Savana
A553	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	84	Gramíneo-lenhosa	Savana	Savana

Quadro 4-13: Coeficientes de correlação de Pearson para o Grupo 2.

GRUPO 2 - Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1100								
Prob > r under H0: Rho=0								
	LST	expLST	InLST	LST ²	LST ³	RG	expRG	InRG
ETR	<u>-0,25907</u> <,0001	<u>-0,04389</u> 0,1458	<u>-0,25920</u> <,0001	<u>-0,25547</u> <0,0001	<u>-0,24945</u> <0,0001	<u>0,55257</u> <0,0001	<u>0,60477</u> <0,0001	<u>0,52555</u> <0,0001
GRUPO 2 - Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1100								
Prob > r under H0: Rho=0								
	RG ²	RG ³	EVI*	expEVI*	InEVI	EVI ²	EVI ³	ETR
ETR	0,57542 <0,0001	0,59348 <0,0001	0,51284 <0,0001	0,51751 <0,0001	0,50435 <0,0001	0,51981 <0,0001	0,52513 <0,0001	1,00000

É possível perceber uma mudança no comportamento das correlações nos dois grupos. Testaram-se então mais modelos, alguns com o Grupo como sendo uma variável do modelo e outros criando dois modelos diferentes para cada grupo e verificou-se que o grupo é significativo na modelagem, porém, os modelos lineares ainda não retratam a natureza da relação entre as variáveis.

Passou-se então para os modelos não lineares e verificou-se que houve uma melhora nos coeficientes de determinação, (pseudo R², que leva em consideração a soma de quadrados corrigida). Os modelos com $ETR \leq 0,05$ mm não deram um bom. Chegou-se então, a dois modelos não lineares e, a partir destes, desenvolveu-se mais dois modelos que serão mais úteis aos objetivos da pesquisa, conforme (MAZUCHELI e ACHCAR, 2002).

4.5 Testes de modelos não lineares

4.5.1 Modelo não linear 1

Este primeiro modelo engloba todas as observações da amostra de construção (todos os grupos e todos os valores para ETR), mas foi feito por partes, ou seja, separa os valores baixos de evapotranspiração e grupos da seguinte forma:

- Se $ETR \leq 0,05$ mm, então:

$$ETR = -0,1942 + \exp^{(-2,8218 - 0,00867.LST + 0,3370.RG + 1,1484.EVI^*)}$$

Equação 4-1

Se $ETR > 0,05$ mm, então separa por grupo.

- **Se Grupo 1, então:**

A Equação 4-1 não sofre alterações.

- **Se Grupo 2, então:**

$$ETR = -0,1942 + \exp(-2,8218 + 0,3370.RG + 1,1484.EVI^*)$$

Equação 4-2

Propôs-se este modelo porque nas análises de correlação foi possível verificar que quando a ETR é baixa, o grupo não faz muita diferença na análise, mas quando a ETR é mais alta, o grupo faz diferença e cada um tem um comportamento diferente. Utilizando a análise de variância ANOVA obteve-se o Quadro 4-14.

Quadro 4-14: Análise de variância ANOVA do Modelo Não Linear 1.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Modelo	4	7,8266	1,9567	854,44	<0,0001
Erro	1676	3,8380	0,00229		
Total	1680	11,6647			

Com um $R^2 = 0,6709$, que é uma medida da porcentagem (67,09%) da variação total dos dados explicada pelo modelo.

As estimativas dos parâmetros, usando o método de Newton-Raphson, estão na coluna “*Estimativa*” e seus respectivos intervalos de confiança nas duas colunas de *Aproximação 95% - Limites de confiança* (Quadro 4-15).

Quadro 4-15: Coeficientes do modelo não linear 1.

Parâmetro	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b_{00}	-0,1942	0,0344	-0,2617	-0,1267	-1,0708
b_0	-2,8218	0,3050	-3,4200	-2,2235	0,1893
b_1	-0,00867	0,00107	-0,0108	-0,00657	-0,1323
b_2	0,3370	0,0403	0,2579	0,4161	0,0135
b_3	1,1484	0,1487	0,8569	1,4400	0,1731

A coluna *Skewness* é uma medida de linearidade dos parâmetros, sendo desejável que o módulo desta seja menor que 0,1 ou perto deste, pois assim as estimativas não estarão viesadas. Observa-se que somente o parâmetro b_{00} tem um valor alto para esta medida, o que não atrapalha a análise.

Avaliando os resíduos, observamos que estes não seguem uma distribuição normal, como se pode perceber pelo gráfico dos quantis da normal versus os valores da distribuição dos resíduos (*qqplot*), que deveria mostrar uma reta diagonal, mas apresenta um desvio para baixo, indicando assimetria.

A distribuição dos resíduos é ligeiramente assimétrica conforme se observa na Figura 4-11.

No gráfico dos resíduos versus os valores preditos (Figura 4-12) existe uma tendência para os valores preditos menores que 0,1, assumindo que estes valores sejam as superestimações dos valores em que a $ETR \leq 0,05$ mm, propôs-se então, o próximo modelo (Modelo Não Linear 2).

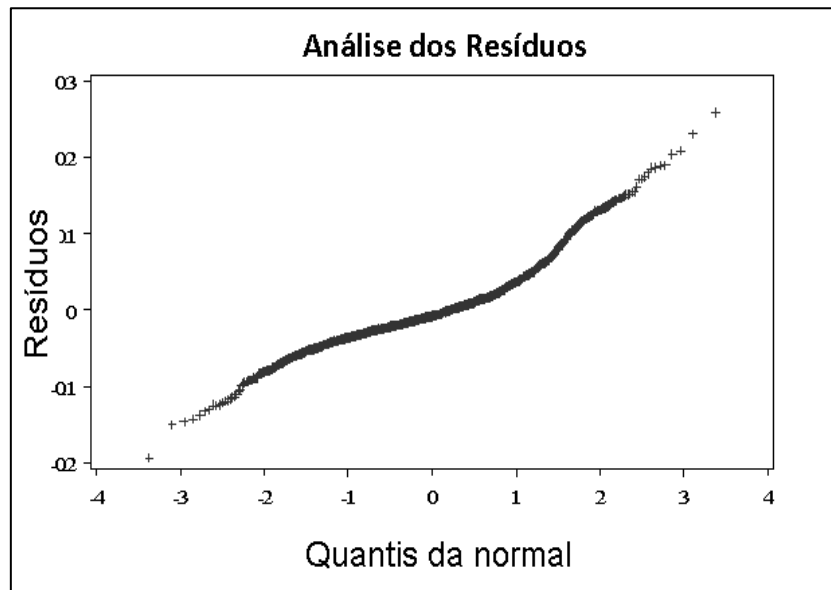


Figura 4-11: Análise dos Resíduos versus Quantis da normal do Modelo Não Linear 1.

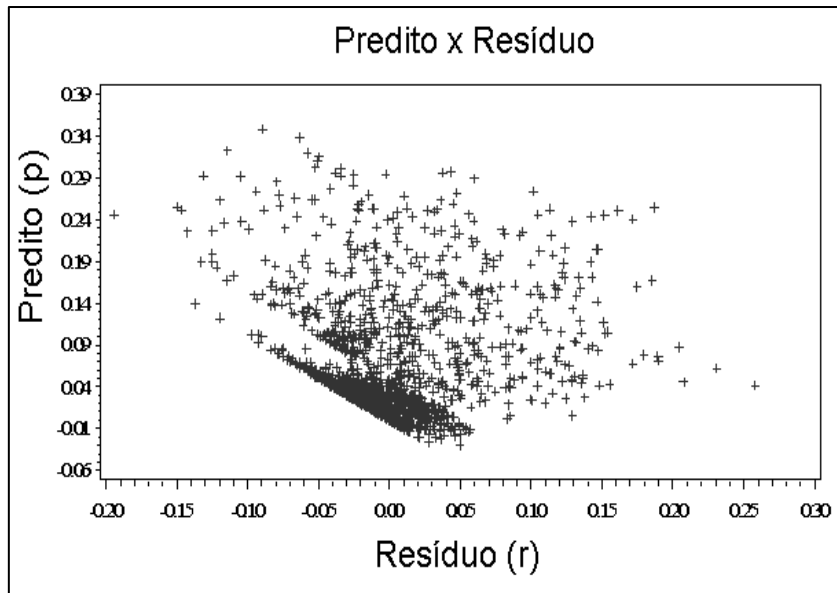


Figura 4-12: Análise dos Resíduos, Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear 1.

O gráfico de dispersão dos valores observados e preditos encontra-se na Figura 4-13. O problema deste modelo é que algumas predições apresentaram valores ligeiramente negativos para a resposta *ETR*, devido ao fato de que a escala da variável já é muito pequena e quando aplicada no modelo, os valores gerados por este ficam negativos. A validação do modelo foi satisfatória, pois a medida $MSPR=0,0021315$ encontra-se próxima da $MSE = 0,00229$, testaram-se então novos modelos.

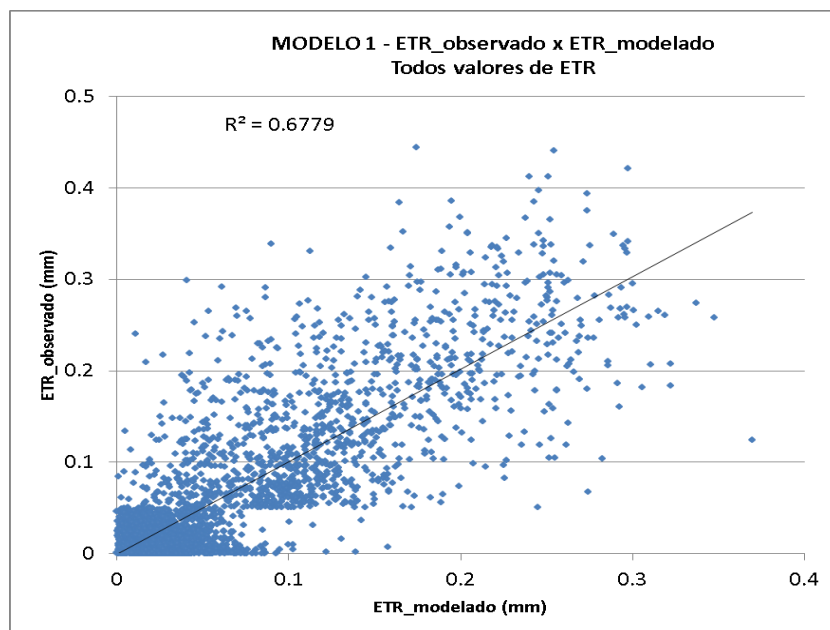


Figura 4-13: Gráfico de dispersão dos valores observados versus valores preditos do Modelo Não Linear 1 – Todos valores de ETR e todo período.

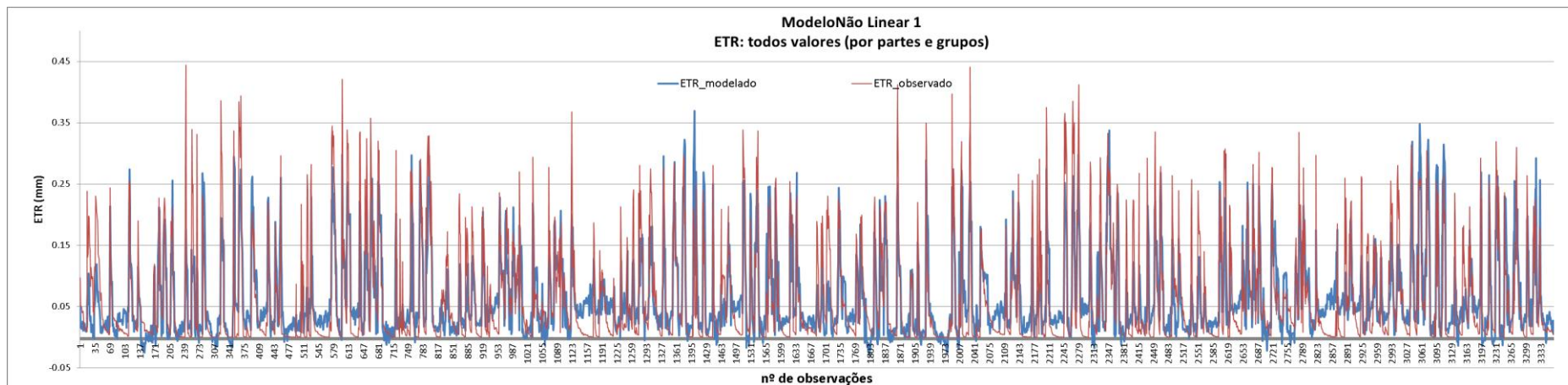


Figura 4-14: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 1 versus a *ETR* instantânea observada para toda amostra.

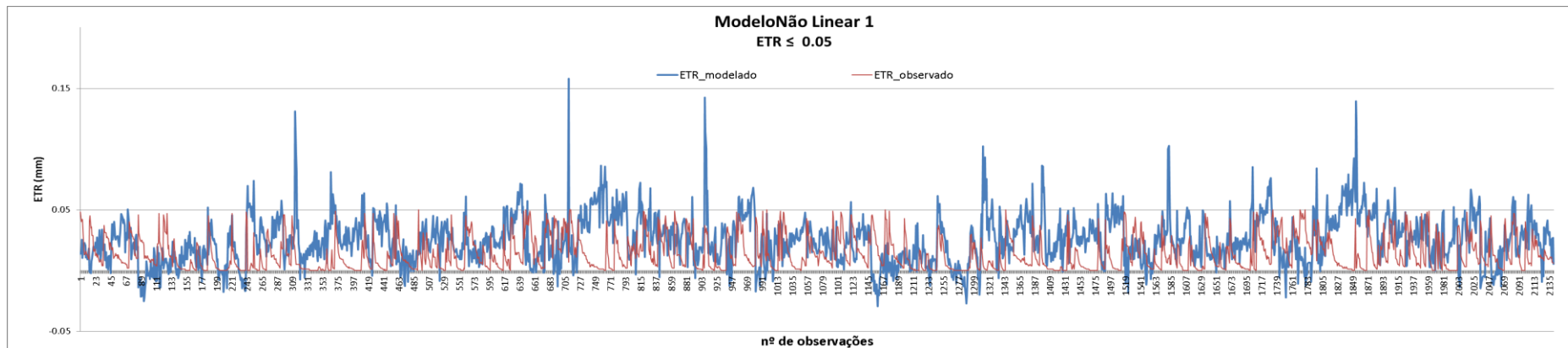


Figura 4-15: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 1 versus a *ETR* instantânea observada para toda amostra, $ETR \leq 0,05\text{mm}$.

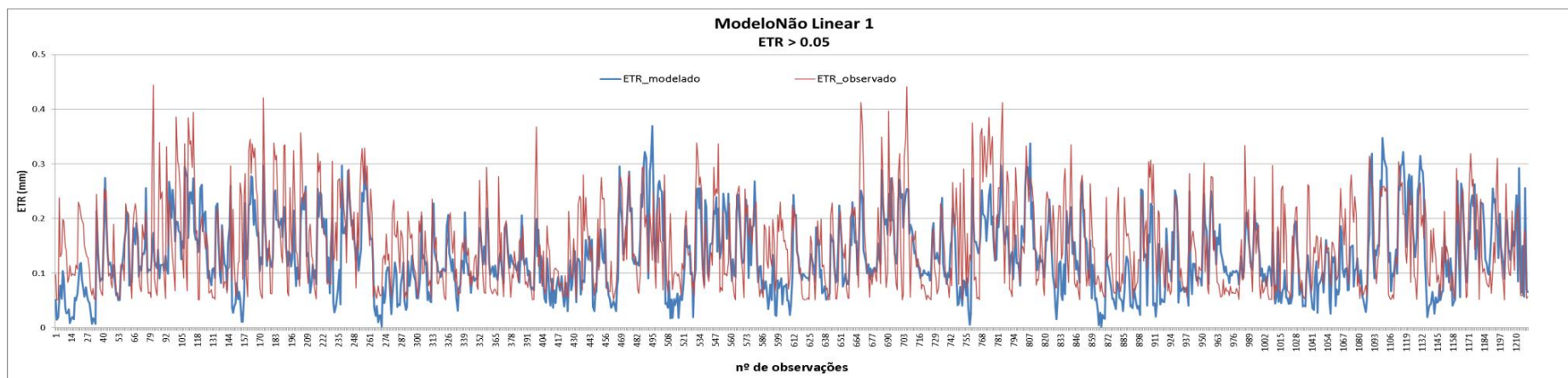


Figura 4-16: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 1 versus a *ETR* instantânea observada para toda amostra, $ETR > 0,05\text{mm}$.

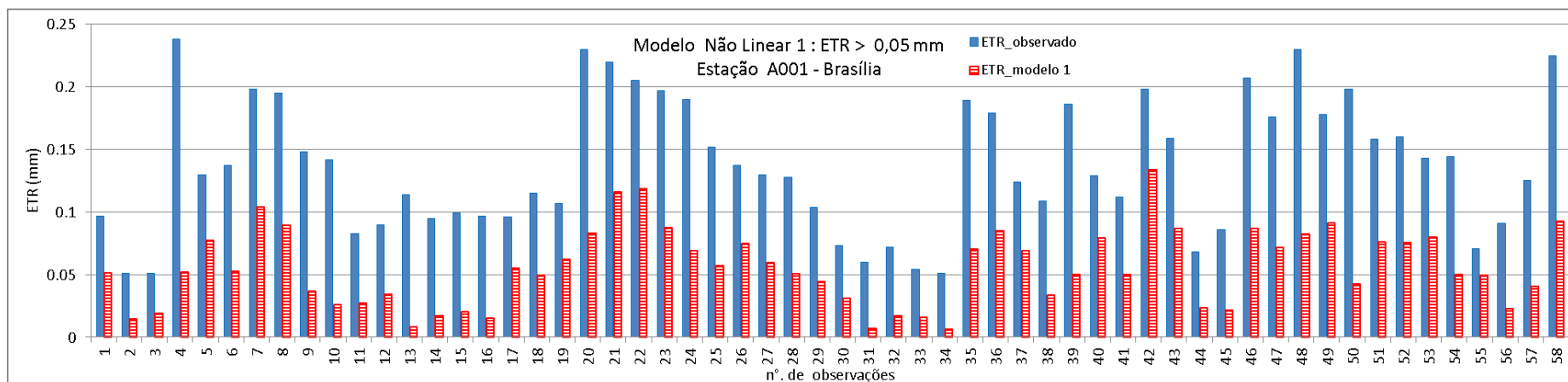


Figura 4-17: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 1 versus *ETR* instantânea observada para estação A001 em todo período, $ETR > 0,05\text{mm}$.

4.5.2 Modelo não linear 2

Como se pode observar nas Figuras 4-14, 4-15, 4-16 e 4-17 as estimativas de $ETR \leq 0,05$ mm não parecem ter uma boa relação com a variável resposta, utilizou-se então, o mesmo modelo anterior (Modelo não linear 1), sem o intercepto (b_{00}), porém, levando em consideração apenas a parte em que a $ETR > 0,05$ mm e separado por grupo, ficando da seguinte forma:

- Se Grupo 1, então:

$$ETR = \exp^{(-5,0325 - 0,006.LST + 0,707.RG + 1,5513.EVI^*)}$$

Equação 4-3

- Se Grupo 2, então:

$$ETR = \exp^{(-5,0325 + 0,707.RG + 1,5513.EVI^*)}$$

Equação 4-4

A análise de variância é apresentada no Quadro 4-16, obtendo-se um $R^2 = 16,0964/18,344 = 0,8775$ e os parâmetros estimados no Quadro 4-17.

Quadro 4-16: Análise de variância ANOVA do modelo não linear 2.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Modelo	4	16,0964	4,0241	1126,14	<0,0001
Erro	629	2,2476	0,00357		
Total não corrigido	633	18,3440			

Quadro 4-17: Coeficientes do Modelo Não Linear 2.

Parâmetro	Estimado	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b_0	-5,0325	0,1818	-5,3896	-4,6754	-0,0136
b_1	-0,00601	0,000978	-0,00793	-0,00409	-0,0518
b_2	0,7070	0,0350	0,6382	0,7757	0,0225
b_3	1,5513	0,2417	1,0767	2,0259	0,00367

Observa-se no Quadro 4-17 que todos os valores da medida *Skewness* estão dentro dos padrões desejados, ou seja, o módulo desta é menor que 0,1. Avaliando os resíduos observa-se que estes ainda não seguem uma distribuição normal, mas o gráfico abaixo mostra que os resíduos estão bem próximos de uma reta diagonal.

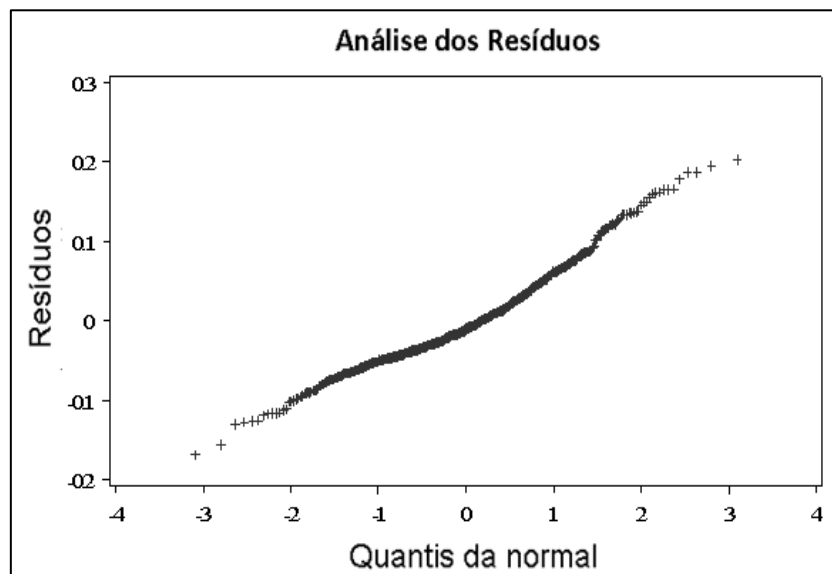


Figura 4-18: Análise dos Resíduos versus Quantis da normal do Modelo Não Linear 2.

Observando o gráfico dos valores preditos pelos resíduos, tem-se:

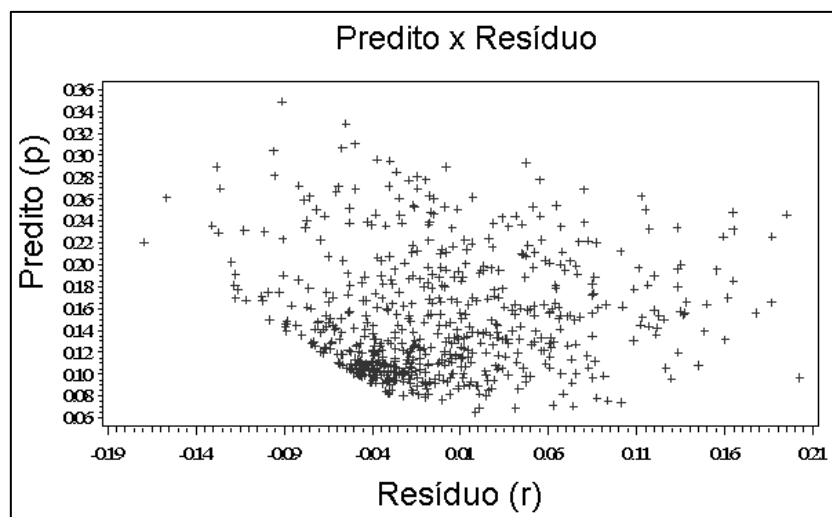


Figura 4-19: Análise dos Resíduos, Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear 2.

Os valores abaixo de 0,1 continuam mostrando uma tendência, porém esta é menos acentuada que a observada no Modelo Não Linear 1, tendência a qual pode ser devido à relação das observações no tempo, sazonalidade das

observações. Ainda assim, este modelo apresenta um melhor desempenho tanto no coeficiente de determinação (R^2) como no comportamento dos parâmetros e dos resíduos. Algumas observações influentes foram encontradas, mas estas não prejudicam a modelagem.

Na validação, o MSPR (*Mean Squared Prediction Error*) é uma medida estatística que mede a habilidade de predição do modelo. Valores de MSPR próximos do MSE (*Mean Squared Error*) da amostra de construção indicam uma boa habilidade de predição do modelo.

Para o estudo em questão tem-se que o $MSE = 0,00357$ e $MSPR = 0,0036793$. Logo, podemos considerar que o modelo ajustado é válido.

O gráfico dos valores preditos e dos valores reais encontra-se nas Figuras 4-20 e 4-21.

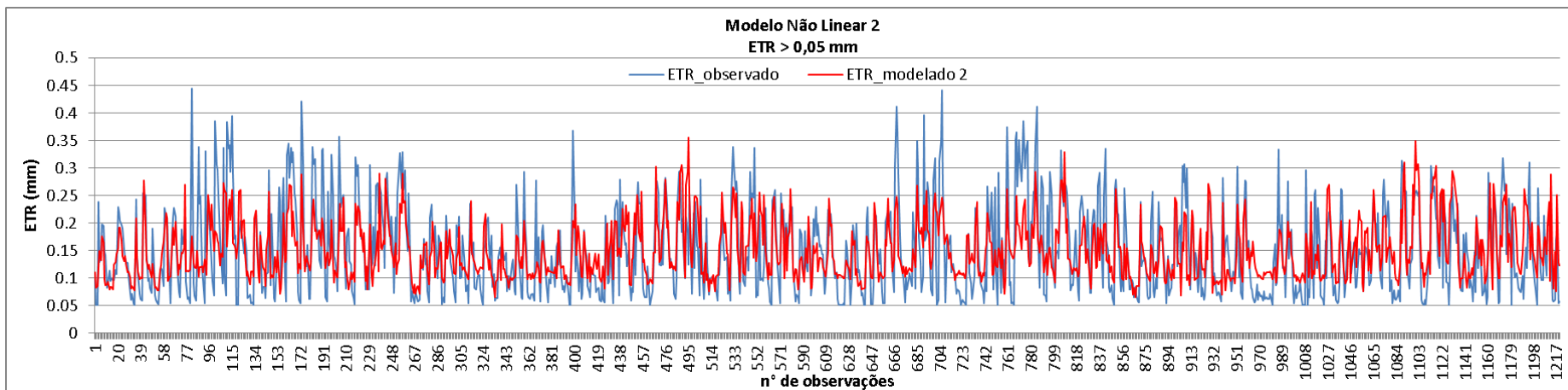


Figura 4-20: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 2 versus a *ETR* instantânea observada para todas estações e todo período, *ETR* > 0,05mm.

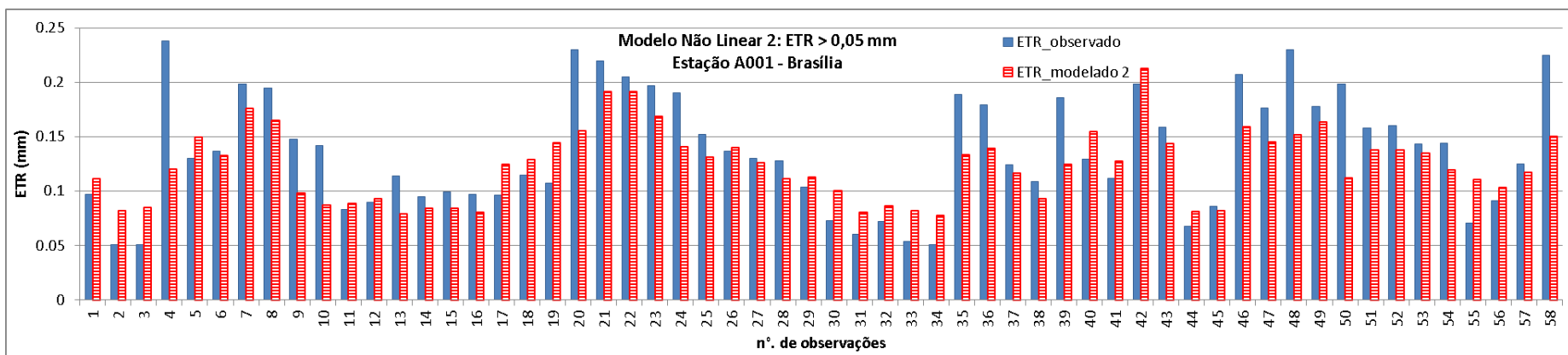


Figura 4-21: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 2 versus a *ETR* instantânea observada para estação A001 em todo período, *ETR* > 0,05 mm.

4.5.3 Modelo não linear 3

Tendo em vista os objetivos da pesquisa, testaram-se os modelos anteriores sem levar em consideração o agrupamento, já que a ideia é estimar a evapotranspiração para um ponto qualquer em uma região dentro do Cerrado e não necessariamente para uma das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

Sendo assim, foram propostos mais dois modelos. Em que os coeficientes (Quadro 4-19) foram estimados após sete iterações pelo método de Newton-Raphson, obtendo $R^2 = 12,5667/18,7341 = 0,6708$ com a medida *Skewness* dentro do padrão desejado utilizando-se a relação:

$$ETR = \exp^{(-7,63 - 0,0383.LST + 1,3042.RG + 3,8749.EVI^*)}$$

Equação 4-5

Quadro 4-18: Análise de variância ANOVA do Modelo Não Linear 3.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Modelo	4	12,5667	3,1417	854,27	<0,0001
Erro	1677	6,1674	0,00368		
Total	1681	18,7341			

Observa-se que quando são incluídos todos os valores de *ETR*, o coeficiente de determinação diminui, mas continua aceitável.

As estimativas dos parâmetros encontram-se no Quadro 4-19.

Quadro 4-19: Coeficientes do Modelo Não Linear 3.

Parâmetros	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b_0	-7,6300	0,2832	-8,1855	-7,0745	-0,0118
b_1	-0,0383	0,00433	-0,0468	-0,0298	-0,0130
b_2	1,3042	0,0484	1,2092	1,3992	0,0134
b_3	3,8749	0,3474	3,1935	4,5563	-0,00431

A medida da habilidade de predição do modelo foi igual a 0,0036793, o que também é satisfatório, pois foi muito próximo do erro quadrático médio (0,00368).

Os gráficos dos resíduos apresentam-se nas Figuras 4-23 e 4-24.

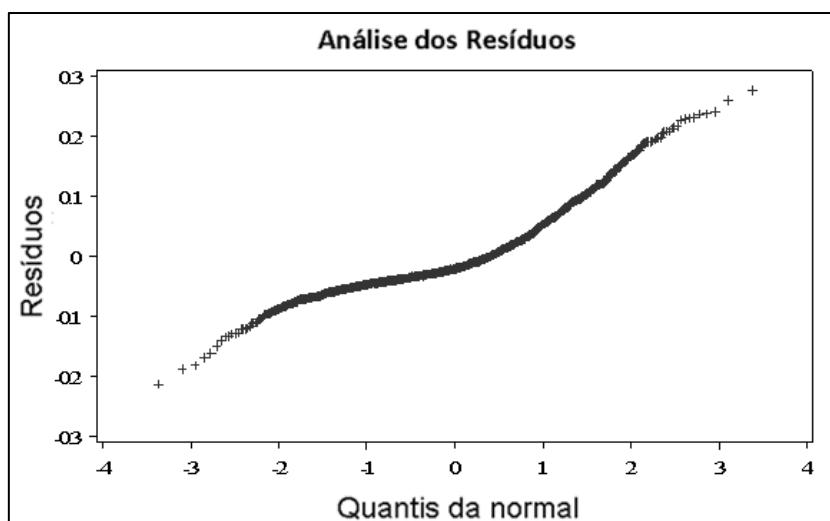


Figura 4-22: Análise dos Resíduos versus Quantis da normal do Modelo Não Linear 3.

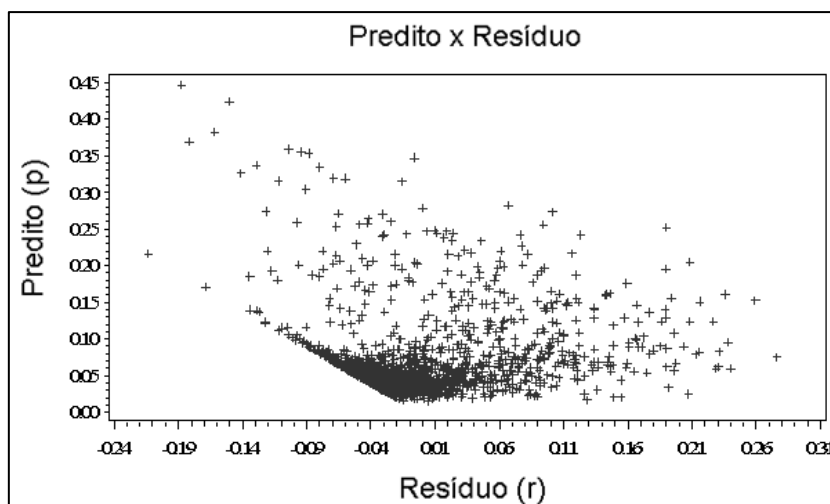


Figura 4-23: Análise dos Resíduos, Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear 3.

Os gráficos dos valores reais e preditos para todas as estações da área de estudo e para Brasília são apresentados nas Figuras 4-24 e 4-25, respectivamente. Os gráficos foram elaborados utilizando todo período e todos os valores de *ETR*, conforme citado na elaboração do Modelo Não Linear 3.

Observa-se pela análise dos gráficos abaixo que existe subestimativa dos maiores valores de evapotranspiração e superestimativa dos menores valores, conforme já discutido na análise de resíduos.

Embora haja esse desvio da estimativa dos valores, pode-se constatar que o modelo consegue acompanhar bem a sazonalidade das observações, passando pelos períodos com menor e maior umidade com boa resposta.

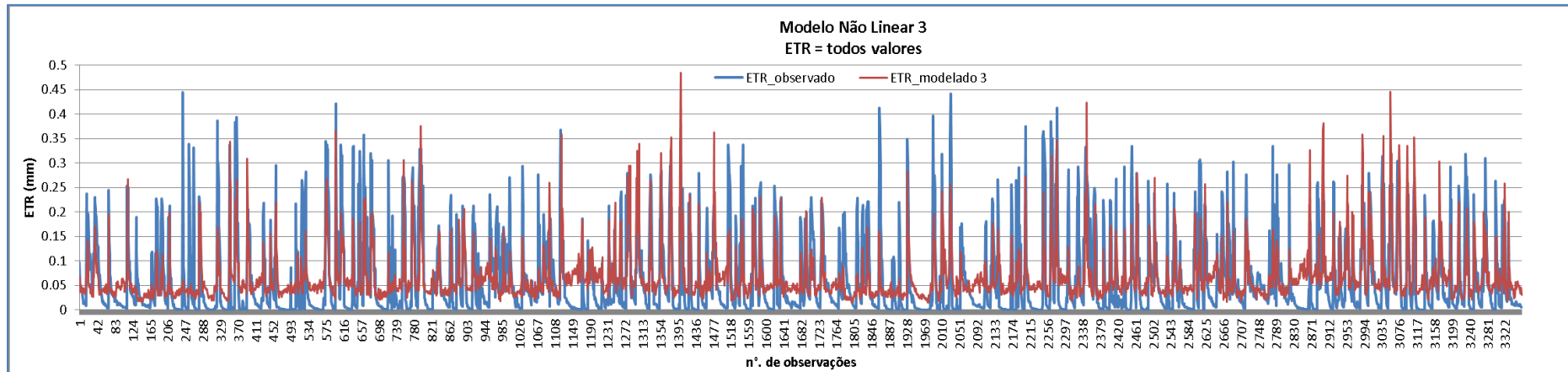


Figura 4-24: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 3 versus a *ETR* instantânea observada para todas estações e todo período.

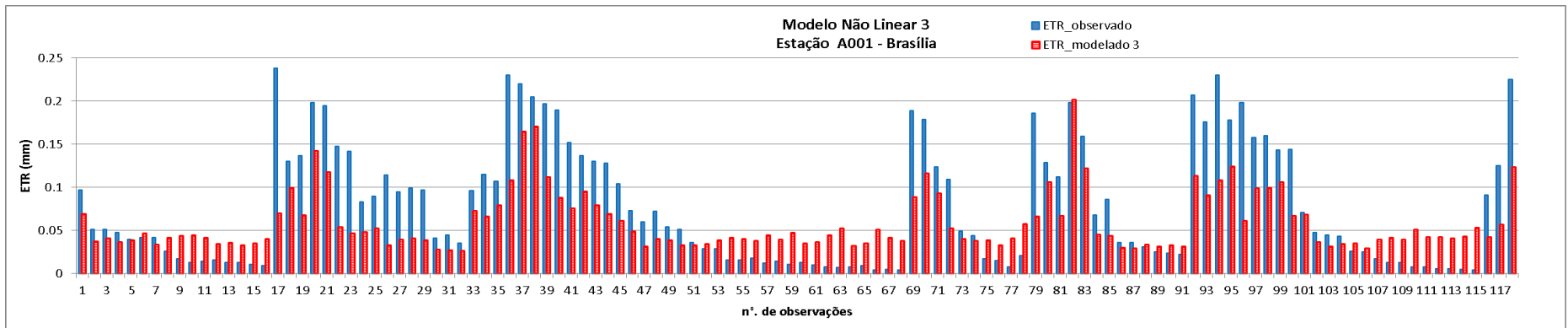


Figura 4-25: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 3 versus a *ETR* instantânea observada para estação A001, ETR = todos valores.

4.5.4 Modelo não linear 4

Por fim, testou-se o modelo anterior utilizando apenas as observações cuja $ETR > 0,05$ mm obtendo-se:

$$ETR = \exp(-4,9805 - 0,00241.LST + 0,6995.RG + 1,5373.EVI^*)$$

Equação 4-6

Quadro 4-20: Análise de variância ANOVA do modelo não linear 4.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Modelo	4	15,9495	3,9874	1047,39	<0,0001
Erro	629	2,3946	0,00381		
Total	633	18,3440			

Com um $R^2 = 15,9495/18,344 = 0,8695$. A variável LST não foi significativa, pois o intervalo de confiança para o parâmetro contém o ponto zero, demonstrando que não é uma variável significativa na modelagem.

Quadro 4-21: Coeficientes do Modelo Não linear 4.

Parâmetros	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b_0	-4,9805	0,2600	-5,4910	-4,4700	-0,00661
b_1	-0,00241	0,00392	-0,0101	0,00529	-0,00760
b_2	0,6995	0,0403	0,6203	0,7787	0,0150
b_3	1,5373	0,2910	0,9659	2,1088	-0,00443

Sendo assim, excluiu-se a variável temperatura de superfície do modelo obtendo o Modelo Não Linear 4 sem LST (Modelo Não Linear 5).

4.5.5 Modelo não linear 5

Diante das observações efetuadas nas diversas tentativas anteriores conseguiu-se chegar ao Modelo Não Linear 5, visto que o parâmetro LST apresentou baixa correlação e por fim seu coeficiente apresentou-se insignificante para o modelo.

$$ETR = \exp(-5,0882 + 0,688.RG + 1,6215.EVI^*)$$

Equação 4-7

São apresentados no Quadro 4-22 os valores para o teste F e as somas dos quadrados de *ETR* modelada e observada, usados para encontrar o R^2 do modelo.

Quadro 4-22: Análise de variância ANOVA do Modelo Não Linear 5.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Dados	3	15,9480	5,3160	1397,78	<0,0001
Erro	630	2,3960	0,00380		
Total	633	18,3440			

Com um $R^2 = 15,948/18,344 = 0,8694$. Como era de se esperar, não houve uma grande diferença, pois a variável retirada não era significativa no modelo.

Os coeficientes de cada termo da equação e seus respectivos intervalos de confiança são apresentados no Quadro 4-23.

Quadro 4-23: Coeficientes do Modelo Não Linear5.

Parâmetros	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b_0	-5,0882	0,1921	-5,4654	-4,7109	-0,0113
b_2	0,6888	0,0364	0,6173	0,7604	0,0237
b_3	1,6215	0,2563	1,1181	2,1248	-0,00004

O modelo foi validado com MSPR (0,0040453) próximo do MSE (0,00380).

Observa-se nos gráficos de resíduos que a tendência existente está bem menos acentuada (Figuras 4-26 e 4-27), e que no gráfico de dispersão, os valores estimados e observados se aproximam (Figuras 4-28, 4-29, 4-30 e 4-31).

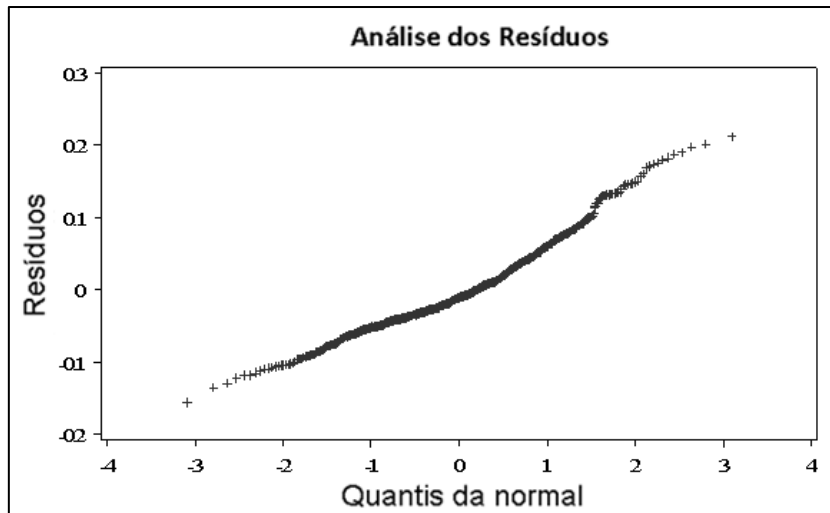


Figura 4-26: Análise dos Resíduos versus Quantis da normal do Modelo Não Linear 5.

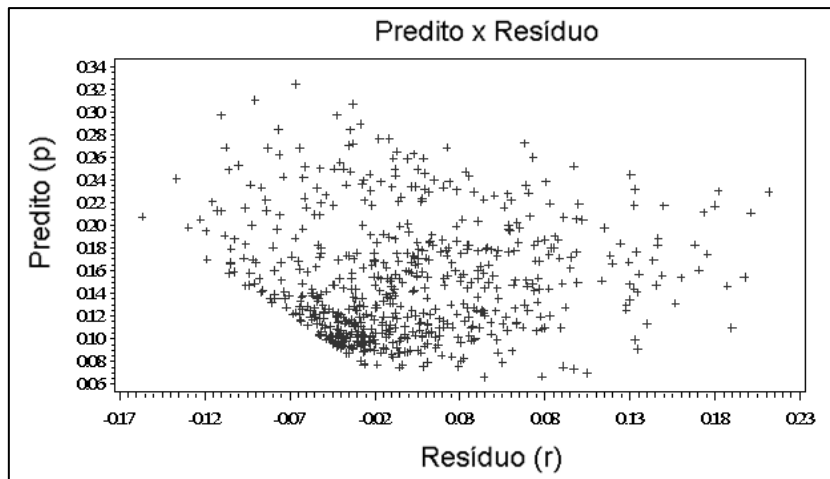


Figura 4-27: Análise dos Resíduos, Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear 5.

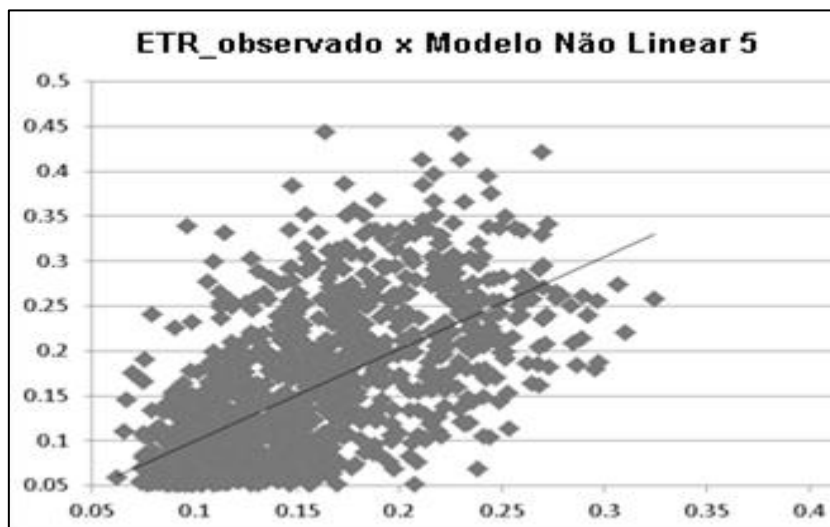


Figura 4-28: Gráfico de dispersão entre os valores modelados e observados da ETR.

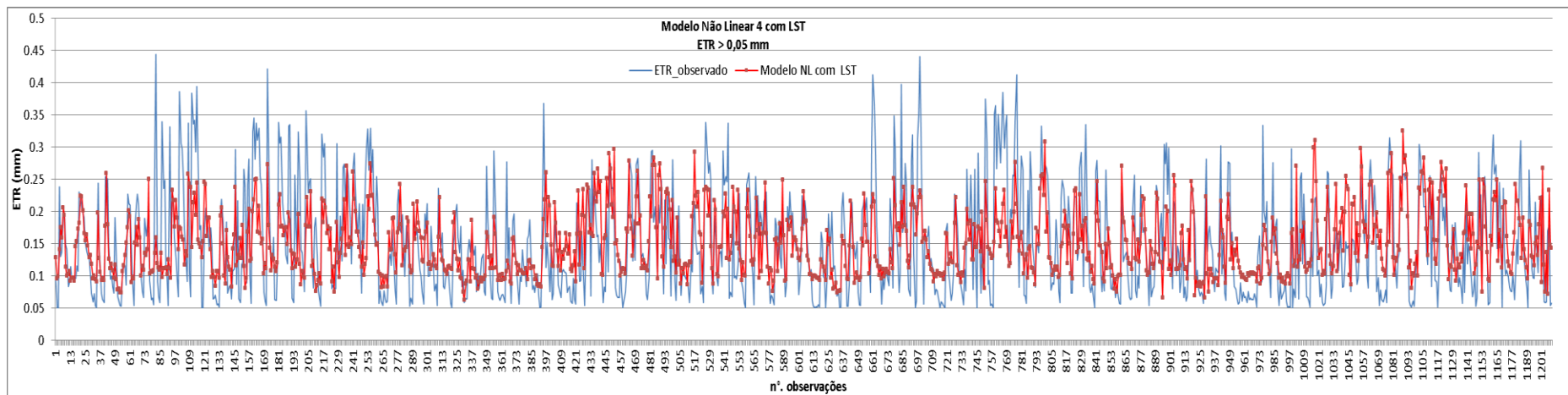


Figura 4-29: ETR instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 4 versus a ETR instantânea observada para todas estações e todo período.

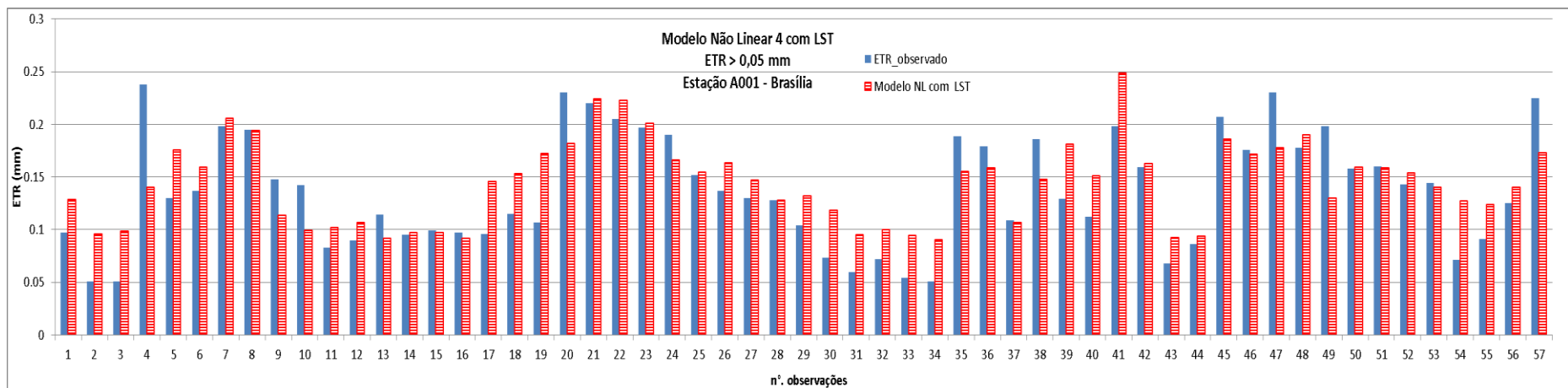


Figura 4-30: ETR instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 4 versus a ETR instantânea observada para estação A001, ETR > 0,05 mm.

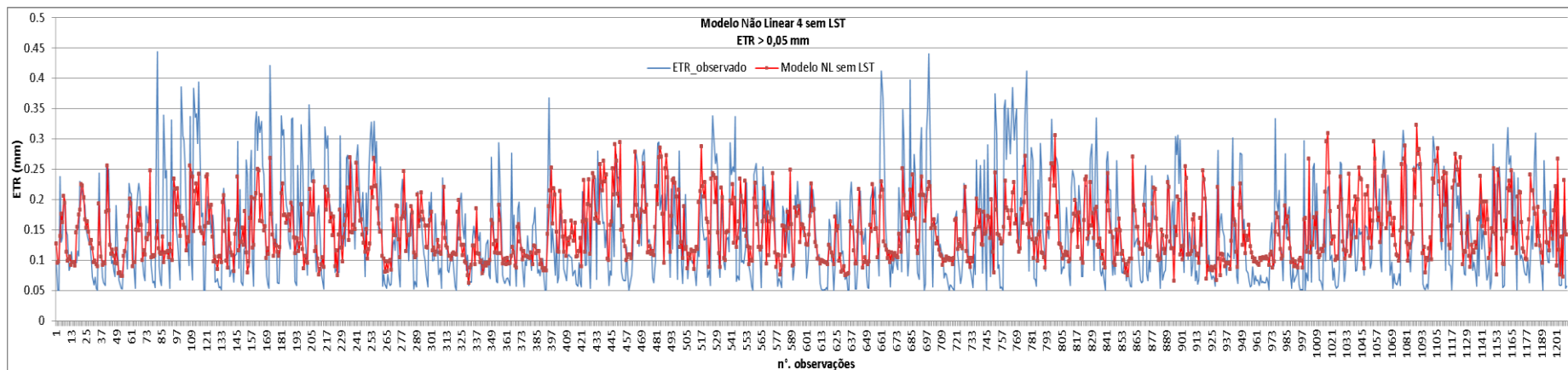


Figura 4-31: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 5 versus a *ETR* instantânea observada para todas estações e todo período.

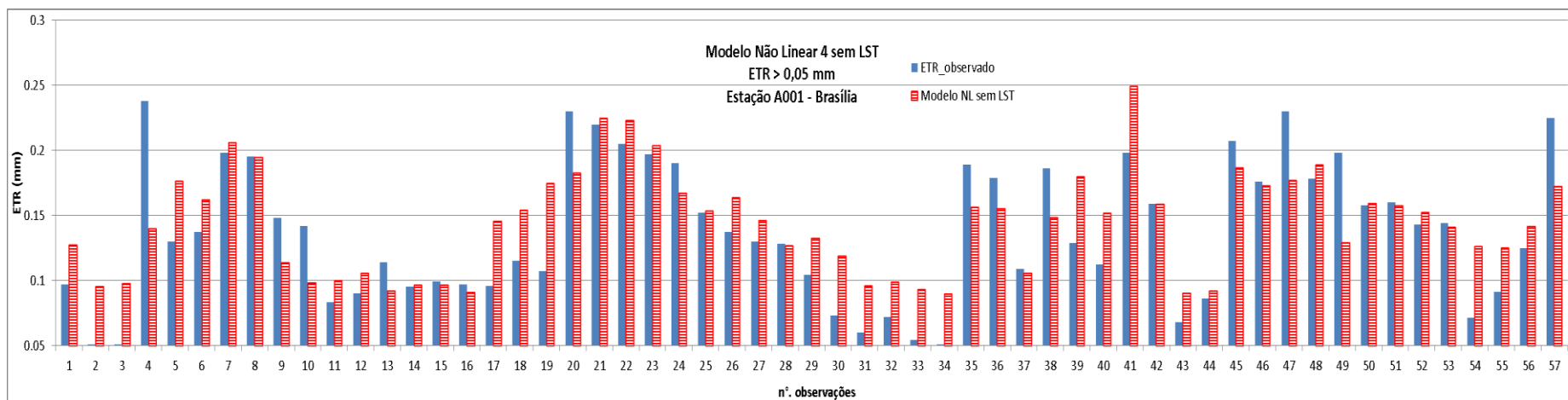


Figura 4-32: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 5 versus a *ETR* instantânea observada para estação A001, *ETR* > 0,05 mm.

4.6 Substituição de *EVI** por *NDVI**

Analogamente elaborou-se um estudo utilizando dados de *RG* e *NDVI**, motivado pela menor complexidade de obtenção do *NDVI* comparado ao cálculo do *EVI*.

A *LST* não foi utilizada devido às fracas correlações apresentadas em todas tentativas anteriores com *EVI** (Quadro 4-24).

Quadro 4-24: Coeficientes de correlação de Pearson.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 3361 Prob > r under H0: Rho=0				
	<i>EVI*</i>	<i>LST</i>	<i>RG</i>	<i>NDVI*</i>
<i>ETR</i>	0,50283 <0,0001	-0,20283 <0,0001	0,50823 <0,0001	0,40 <0,0001

Como se pode observar no Quadro 4-25, o *NDVI** possui correlação elevada com *EVI**, sendo o principal motivo estatístico de não se usar essas duas variáveis no mesmo modelo, essa alta correlação é devido essas duas variáveis representarem fisicamente a vegetação.

Quadro 4-25: Coeficientes de correlação de Pearson.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 3361 Prob > r under H0: Rho=0, p<0,0001					
	<i>NDVI*</i>	<i>RG</i>	<i>EVI*</i>	<i>LST</i>	<i>ETR</i>
<i>NDVI*</i>	1,00	0,04	0,89	-0,56	0,40
<i>RG</i>	0,04	1,00	0,15	0,29	0,51
<i>EVI*</i>	0,89	0,15	1,00	-0,49	0,50
<i>LST</i>	-0,56	0,29	-0,49	1,00	-0,20
<i>ETR</i>	0,40	0,51	0,50	-0,20	1,00

O valor da correlação da *LST* com os índices de vegetação demonstra uma correlação negativa, ou seja, à medida que o *NDVI* e o *EVI* aumentam, a temperatura da superfície (dossel) diminui. Os testes levam a rejeitar a hipótese de nulidade e a relação da variável *NDVI** com *ETR* é em torno de 0,40.

A Figura 4-33 apresenta a relação entre os índices de vegetação (*EVI** e *NDVI**) com as temperaturas do ar e da superfície (dossel), onde se observa que à medida que os valores do índice de vegetação se elevam a temperatura da superfície (dossel) diminui, levando a algumas conclusões a respeito de que quando há menos vegetação, o calor latente, usado para evaporar água da

superfície, é convertido em calor sensível, porém a temperatura do ar se mantém com pouca variação neste caso do Cerrado, possivelmente devido à estrutura física da vegetação, que por proporcionar menor rugosidade permite que haja renovação do gradiente de umidade próximo à superfície devido à ação do vento.

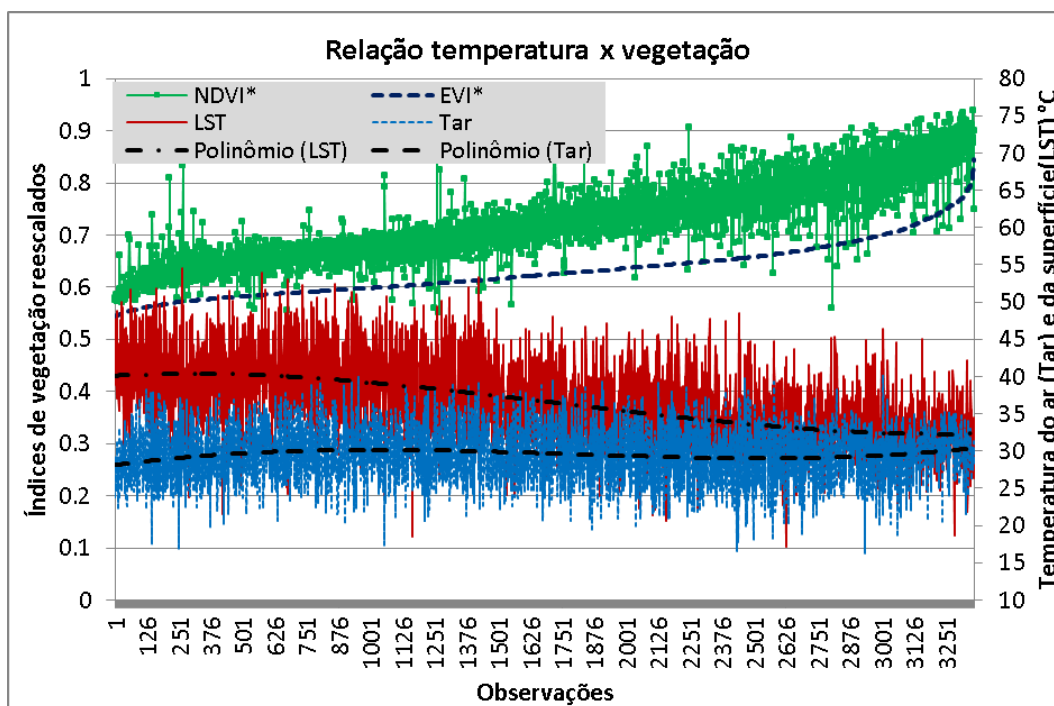


Figura 4-33: Comportamento da temperatura em relação à vegetação da superfície.

A análise descritiva apresentou um coeficiente de variação de aproximadamente 11% (Quadro 4-26).

Quadro 4-26: Análise descritiva do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI*).

Medidas Estatísticas Básicas (NDVI*)			
Posição		Variabilidade	
Média	0,7237485	Desvio Padrão	0,07734
Mediana	0,715777	Variância	0,00598
Moda	0,655172	Amplitude	0,38710
N	3361	Amplitude Interquartílica	0,11431
Variações (NDVI*)			
Assimetria	0,38857534	Curtose	-0,56321
Soma dos quadrados (SS) não corrigido	1780,63115	Soma dos quadrados (SS) corrigido	20,099396
Coef. Variação	10,686468	Erro médio padrão	0,0013341

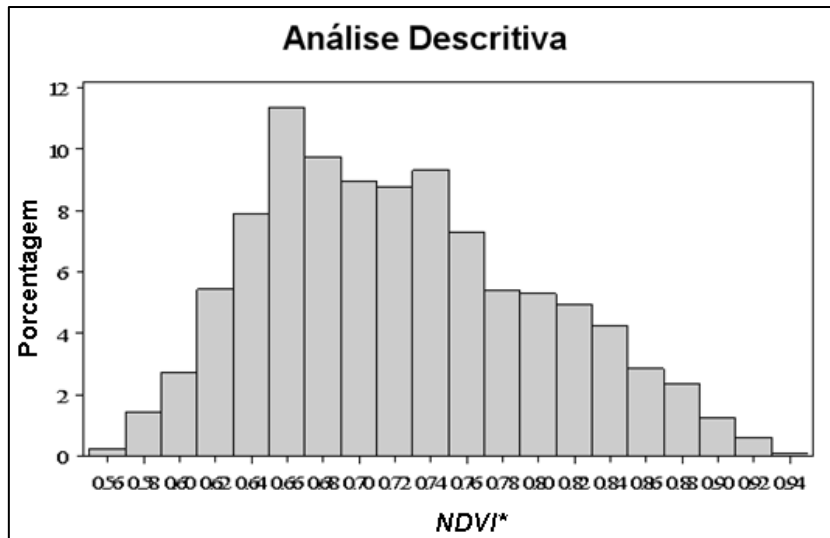


Figura 4-34: Histograma de frequência das observações de *NDVI**.

Analisando os gráficos de dispersão (Figura 4-35) nota-se muito bem essa falta de relação linear, onde não é possível encontrar nenhum padrão nos gráficos (verificar a última linha dos gráficos, que mostra as relações das variáveis explicativas com a variável resposta).

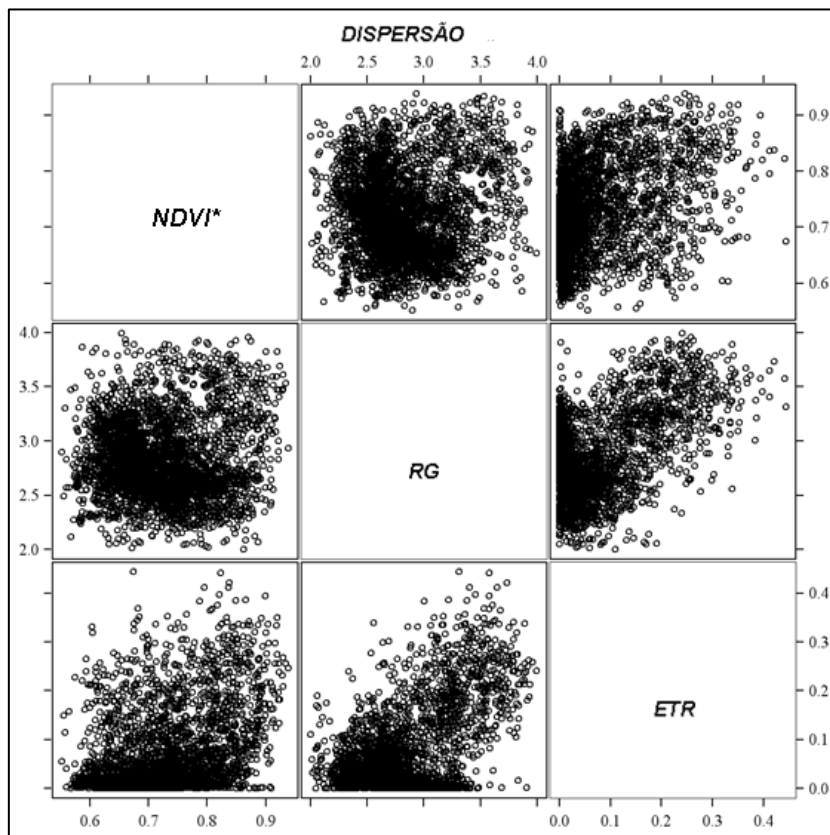


Figura 4-35: Gráfico de dispersão das variáveis *NDVI**, *LST*, *RG* e *ETR*.

Aplicando-se transformações para cada uma das variáveis (logaritmo natural, exponencial, ao quadrado e ao cubo) resultou nas seguintes correlações apresentadas no Quadro 4-27 utilizando apenas metade das observações, não havendo grandes melhorias.

Quadro 4-27: Coeficientes de correlação de Pearson.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1681								
Prob > r under H0: Rho=0 (NDVI*)								
	RG	expRG	InRG	RG ²	RG ³	NDVI*	expNDVI*	InNDVI*
RG	1	0,97151	0,99667	0,99676	0,98736	0,07569	0,08238	0,06724
		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0019	0,0007	0,0058
expRG	0,97151	1	0,94971	0,98716	0,99656	0,12164	0,12831	0,11289
	<0,0001		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
InRG	0,99667	0,94971	1	0,98692	0,97133	0,05926	0,06579	0,05112
	<0,0001	<0,0001		<0,0001	<0,0001	0,0151	0,0070	0,0361
RG ²	0,99676	0,98716	0,98692	1	0,99689	0,09190	0,09867	0,08323
	<0,0001	<0,0001	<0,0001		<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0006
RG ³	0,98736	0,99656	0,97133	0,99689	1	0,10734	0,11412	0,09856
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001		<0,0001	<0,0001	<0,0001
NDVI*	0,07569	0,12164	0,05926	0,09190	0,10734	1	0,99903	0,99820
	0,0019	<0,0001	0,0151	0,0002	<0,0001		<0,0001	<0,0001
expNDVI*	0,08238	0,12831	0,06579	0,09867	0,11412	0,99903	1	0,99459
	0,0007	<0,0001	0,0070	<0,0001	<0,0001	<0,0001		<0,0001
InNDVI*	0,06724	0,11289	0,05112	0,08323	0,09856	0,99820	0,99459	1
	0,0058	<0,0001	0,0361	0,0006	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
NDVI* ²	0,08444	0,13040	0,06780	0,10077	0,11624	0,99823	0,99988	0,99288
	0,0005	<0,0001	0,0054	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NDVI* ³	0,09334	0,13903	0,07656	0,10969	0,12509	0,99305	0,99727	0,98425
	0,0001	<0,0001	0,0017	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
ETR	<u>0,52037</u>	<u>0,57358</u>	<u>0,49360</u>	<u>0,54315</u>	<u>0,56141</u>	<u>0,41071</u>	<u>0,41819</u>	<u>0,39921</u>
	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>
InETR	0,22609	0,27390	0,20708	0,24393	0,26002	0,36344	0,36845	0,35479
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1681								
Prob > r under H0: Rho=0 (NDVI*)								
	NDVI* ²	NDVI* ³	ETR	InETR				
RG	0,08444	0,09334	0,52037	0,22609				
	0,0005	0,0001	<0,0001	<0,0001				
expRG	0,13040	0,13903	0,57358	0,27390				
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001				
InRG	0,06780	0,07656	0,49360	0,20708				
	0,0054	0,0017	<0,0001	<0,0001				
RG ²	0,10077	0,10969	0,54315	0,24393				
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001				
RG ³	0,11624	0,12509	0,56141	0,26002				
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001				
NDVI*	0,99823	0,99305	0,41071	0,36344				
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001				
expNDVI*	0,99988	0,99727	0,41819	0,36845				

	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
lnNDVI*	0,99288	0,98425	0,39921	0,35479
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
NDVI*2	1	0,99828	0,42063	0,37022
		<0,0001	<0,0001	<0,0001
NDVI*3	0,99828	1	0,42886	0,37507
	<0,0001		<0,0001	<0,0001
ETR	<u>0,42063</u>	<u>0,42886</u>	<u>1</u>	<u>0,72670</u>
	<u><0,0001</u>	<u><0,0001</u>		<u><0,0001</u>
lnETR	0,37022	0,37507	0,72670	1
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	

Dividiu-se o banco de dados por valores de *ETR*, ($ETR \leq 0,05$ mm e $ETR > 0,05$ mm) tendo em vista que se observou um comportamento diferente nestas duas faixas de valores quando elaborados os gráficos de dispersão entre *ETR* e cada variável para cada uma das 32 estações.

O Quadro 4-28 contém as correlações lineares de Pearson para valores de *ETR* abaixo de 0,05 mm, constatando-se que continuam baixas.

Quadro 4-28: Coeficientes de correlação de Pearson, $ETR \leq 0,05$ mm.

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1048 Prob > r under H0: Rho=0							
	RG	expRG	lnRG	RG²	RG³	NDVI*	expNDVI
RG	1,00000	0,98050 <0,0001	0,99774 <0,0001	0,99772 <0,0001	0,99083 <0,0001	-0,24722 <0,0001	-0,24841 <0,0001
expRG	0,98050 <0,0001	1,00000	0,96568 <0,0001	0,99129 <0,0001	0,99784 <0,0001	-0,22912 <0,0001	-0,23017 <0,0001
lnRG	0,99774 <0,0001	0,96568 <0,0001	1,00000	0,99096 <0,0001	0,97964 <0,0001	-0,24799 <0,0001	-0,24920 <0,0001
RG²	0,99772 <0,0001	0,99129 <0,0001	0,99096 <0,0001	1,00000	0,99767 <0,0001	-0,24400 <0,0001	-0,24515 <0,0001
RG³	0,99083 <0,0001	0,99784 <0,0001	0,97964 <0,0001	0,99767 <0,0001	1,00000	-0,23828 <0,0001	-0,23939 <0,0001
NDVI*	-0,24722 <0,0001	-0,22912 <0,0001	-0,24799 <0,0001	-0,24400 <0,0001	-0,23828 <0,0001	1,00000	0,99915 <0,0001
expNDVI	-0,24841 <0,0001	-0,23017 <0,0001	-0,24920 <0,0001	-0,24515 <0,0001	-0,23939 <0,0001	0,99915 <0,0001	1,00000
lnNDVI	-0,24409 <0,0001	-0,22634 <0,0001	-0,24478 <0,0001	-0,24096 <0,0001	-0,23536 <0,0001	0,99837 <0,0001	0,99518 <0,0001
NDVI²	-0,24896 <0,0001	-0,23065 <0,0001	-0,24977 <0,0001	-0,24568 <0,0001	-0,23989 <0,0001	0,99836 <0,0001	0,99987 <0,0001
NDVI³	-0,24931 <0,0001	-0,23093 <0,0001	-0,25015 <0,0001	-0,24601 <0,0001	-0,24020 <0,0001	0,99348 <0,0001	0,99733 <0,0001
ETR	-0,28041 <0,0001	-0,27008 <0,0001	-0,27971 <0,0001	-0,27908 <0,0001	-0,27572 <0,0001	0,14877 <0,0001	0,15242 <0,0001
lnETR	-0,22179 <0,0001	-0,22594 <0,0001	-0,21577 <0,0001	-0,22582 <0,0001	-0,22774 <0,0001	0,13030 <0,0001	0,13471 <0,0001

Coeficientes de correlação de Pearson, N = 1048					
Prob > r under H0: Rho=0					
	lnNDVI*	NDVP	NDVP	ETR	lnETR
RG	-0,24409 <0,0001	-0,24896 <0,0001	-0,24931 <0,0001	-0,28041 <0,0001	-0,22179 <0,0001
expRG	-0,22634 <0,0001	-0,23065 <0,0001	-0,23093 <0,0001	-0,27008 <0,0001	-0,22594 <0,0001
lnRG	-0,24478 <0,0001	-0,24977 <0,0001	-0,25015 <0,0001	-0,27971 <0,0001	-0,21577 <0,0001
RG²	-0,24096 <0,0001	-0,24568 <0,0001	-0,24601 <0,0001	-0,27908 <0,0001	-0,22582 <0,0001
RG³	-0,23536 <0,0001	-0,23989 <0,0001	-0,24020 <0,0001	-0,27572 <0,0001	-0,22774 <0,0001
NDVI*	0,99837 <0,0001	0,99836 <0,0001	0,99348 <0,0001	0,14877 <0,0001	0,13030 <0,0001
expNDVI	0,99518 <0,0001	0,99987 <0,0001	0,99733 <0,0001	0,15242 <0,0001	0,13471 <0,0001
lnNDVI*	1,00000	0,99347 <0,0001	0,98539 <0,0001	0,14279 <0,0001	0,12302 <0,0001
NDVP	0,99347 <0,0001	1,00000	0,99837 <0,0001	0,15392 <0,0001	0,13658 <0,0001
NDVP	0,98539 <0,0001	0,99837 <0,0001	1,00000	0,15813 <0,0001	0,14179 <0,0001
ETR	0,14279 <0,0001	0,15392 <0,0001	0,15813 <0,0001	1,00000	0,78323 <0,0001
lnETR	0,12302 <0,0001	0,13658 <0,0001	0,14179 <0,0001	0,78323 <0,0001	1,00000

Para as observações $ETR > 0,05$ mm se obtém os coeficientes de correlação apresentados no Quadro 4-29.

Nos Quadros 4-27, 4-28 e 4-29 pode-se perceber que o comportamento das variáveis é diferente quanto aos níveis de evapotranspiração e diante de tais observações citadas após análise dos resultados obtidos para correlações lineares foram propostos novos modelos escolhendo as variáveis ou suas transformações que tiveram as maiores correlações significativas.

Quadro 4-29: Coeficientes de correlação de Pearson ETR>0,05 mm.

Pearson Correlation Coefficients, N = 633								
Prob > r under H0: Rho=0								
	RG	expRG	InRG	RG²	RG³	NDVI*	expNDVI*	InNDVI*
RG	1,00000	0,97591 <0,0001	0,99706 <0,0001	0,99727 <0,0001	0,98953 <0,0001	0,07099 0,0743	0,07591 0,0563	0,06477 0,1035
expRG	0,97591 <0,0001	1,00000	0,95704 <0,0001	0,98912 <0,0001	0,99698 <0,0001	0,07869 0,0478	0,08349 0,0357	0,07249 0,0684
InRG	0,99706 <0,0001	0,95704 <0,0001	1,00000	0,98872 <0,0001	0,97574 <0,0001	0,06661 0,0940	0,07143 0,0725	0,06057 0,1279
RG²	0,99727 <0,0001	0,98912 <0,0001	0,98872 <0,0001	1,00000	0,99747 <0,0001	0,07456 0,0608	0,07951 0,0455	0,06824 0,0863
RG³	0,98953 <0,0001	0,99698 <0,0001	0,97574 <0,0001	0,99747 <0,0001	1,00000	0,07728 0,0520	0,08221 0,0387	0,07095 0,0745
NDVI*	0,07099 0,0743	0,07869 0,0478	0,06661 0,0940	0,07456 0,0608	0,07728 0,0520	1,00000	0,99906 <0,0001	0,99831 <0,0001
expNDVI*	0,07591 0,0563	0,08349 0,0357	0,07143 0,0725	0,07951 0,0455	0,08221 0,0387	0,99906 <0,0001	1,00000	0,99486 <0,0001
InNDVI*	0,06477 0,1035	0,07249 0,0684	0,06057 0,1279	0,06824 0,0863	0,07095 0,0745	0,99831 <0,0001	0,99486 <0,0001	1,00000
NDVI*²	0,07730 0,0519	0,08486 0,0328	0,07277 0,0673	0,08092 0,0418	0,08362 0,0354	0,99837 <0,0001	0,99990 <0,0001	0,99337 <0,0001
NDVI*³	0,08359 0,0355	0,09092 0,0222	0,07896 0,0471	0,08723 0,0282	0,08987 0,0238	0,99364 <0,0001	0,99759 <0,0001	0,98546 <0,0001
ETR	0,62383 <0,0001	0,61419 <0,0001	0,61670 <0,0001	0,62591 <0,0001	0,62340 <0,0001	0,20925 <0,0001	0,21407 <0,0001	0,20211 <0,0001
InETR	0,63379 <0,0001	0,61957 <0,0001	0,62797 <0,0001	0,63441 <0,0001	0,63037 <0,0001	0,19021 <0,0001	0,19555 <0,0001	0,18249 <0,0001
		NDVI*²		NDVI*³		ETR		InETR
RG		0,07730 0,0519		0,08359 0,0355		0,62383 <0,0001		0,63379 <0,0001
expRG		0,08486 0,0328		0,09092 0,0222		0,61419 <0,0001		0,61957 <0,0001
InRG		0,07277 0,0673		0,07896 0,0471		0,61670 <0,0001		0,62797 <0,0001
RG²		0,08092 0,0418		0,08723 0,0282		0,62591 <0,0001		0,63441 <0,0001
RG³		0,08362 0,0354		0,08987 0,0238		0,62340 <0,0001		0,63037 <0,0001
NDVI*		0,99837 <0,0001		0,99364 <0,0001		0,20925 <0,0001		0,19021 <0,0001
expNDVI*		0,99990 <0,0001		0,99759 <0,0001		0,21407 <0,0001		0,19555 <0,0001
InNDVI*		0,99337 <0,0001		0,98546 <0,0001		0,20211 <0,0001		0,18249 <0,0001
NDVP		1,00000		0,99844 <0,0001		0,21554 <0,0001		0,19718 <0,0001
NDVP		0,99844 <0,0001		1,00000		0,22094 <0,0001		0,20334 <0,0001
ETR		0,21554 <0,0001		0,22094 <0,0001		1,00000		0,96630 <0,0001
InETR		0,19718 <0,0001		0,20334 <0,0001		0,96630 <0,0001		1,00000

4.6.1 Testes de modelos lineares com *NDVI**

Foram testados a dois modelos lineares com metade da amostra para verificar o comportamento dos coeficientes de correlação (Quadro 4-30) os quais não foram satisfatórios.

Quadro 4-30: Coeficientes de correlação de Pearson.

Modelos	Metade da amostra (R ²)	<i>ETR</i> ≤ 0,05 mm (R ²)	<i>ETR</i> > 0,05 mm (R ²)
<i>ETR (expRG, NDVI*)</i>	0,4470	0,0616	0,3732
<i>ETR (RG, NDVI*)</i>	0,4376	0,0854	0,4165

Os modelos não deram um bom resultado para as observações com *ETR* ≤ 0,05 mm, contudo, chegou-se a dois modelos não lineares que utilizam apenas observação de *NDVI* e *RG*, sendo que um dos modelos foi equacionado utilizando todo range de observações de *ETR* e outro modelo utilizou apenas valores de *ETR* > 0,05 mm.

4.6.2 Modelo não linear 6

Este modelo engloba todas as observações da amostra de construção sem considerar agrupamentos.

$$ETR = \exp^{(-9,3566+1,2647.RG+3,9691.NDVI^*)}$$

Equação 4-8

Utilizando análise de variância ANOVA obteve-se então o Quadro 4-31.

Quadro 4-31: Análise de variância ANOVA do Modelo Não Linear 6.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Modelo	3	12,2168	4,0723	1048,50	<0,0001
Erro	1678	6,5172	0,00388		
Total	1681	18,7341			

O Modelo Não Linear 6 apresentou $R^2 = 0,6521$ (resultado divisão de 12,2168 / 18,7341) que é uma medida da porcentagem igual a 65,21% da variação total dos dados explicada pelo modelo. Quando se incluem todos os valores de *ETR* (maiores e menores que 0,05 mm) o coeficiente de determinação diminui, mas continua aceitável.

As estimativas dos parâmetros estão no Quadro 4-32, na coluna *Estimativa* e seus respectivos intervalos de confiança nas duas colunas de *Aproximação 95% - Limites de confiança*.

Utilizando o método de Newton, encontraram-se os seguintes coeficientes após oito iterações.

Quadro 4-32: Coeficientes do Modelo Não Linear 6.

Parâmetro	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b₀	-9,3566	0,1837	-9,7169	-8,9963	-0,0457
b₂	1,2647	0,0466	1,1734	1,3560	0,0246
b₃	3,9691	0,2304	3,5172	4,4211	0,0215

A coluna *Skewness* apresentou-se próximo a 0,1 demonstrando que as estimativas não são viesadas.

Avaliando os resíduos, observamos que estes não seguem uma distribuição normal, como se pode perceber pelo gráfico dos quantis da normal versus os valores da distribuição dos resíduos (*qqplot*), que deveria mostrar uma reta diagonal, mas apresenta um desvio para baixo, indicando assimetria (Figura 4-36).

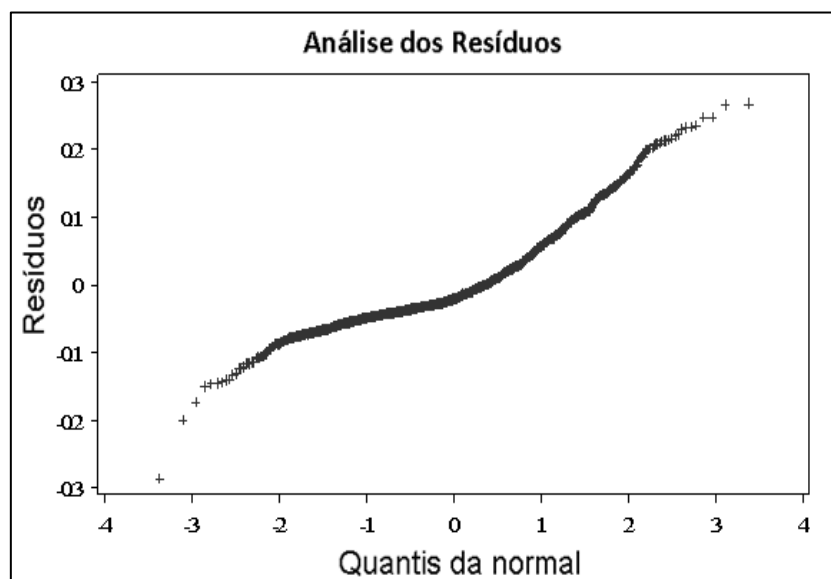


Figura 4-36: Análise dos Resíduos versus Quantis da normal do Modelo Não Linear 6.

A distribuição dos resíduos é ligeiramente assimétrica. Em seguida, temos o gráfico dos resíduos versus os valores preditos (Figura 4-37). Observa-se que existe uma tendência para os valores preditos menores que 0,1, assumindo que estes valores sejam as superestimções dos valores em que a $ETR \leq 0,05$ mm.

Os valores preditos abaixo de 0,1 continuam mostrando uma tendência, indicando uma possível superestimativa dos menores valores.

A validação do modelo foi satisfatória, visto que a medida da habilidade de predição do modelo foi igual a 0,0163549.

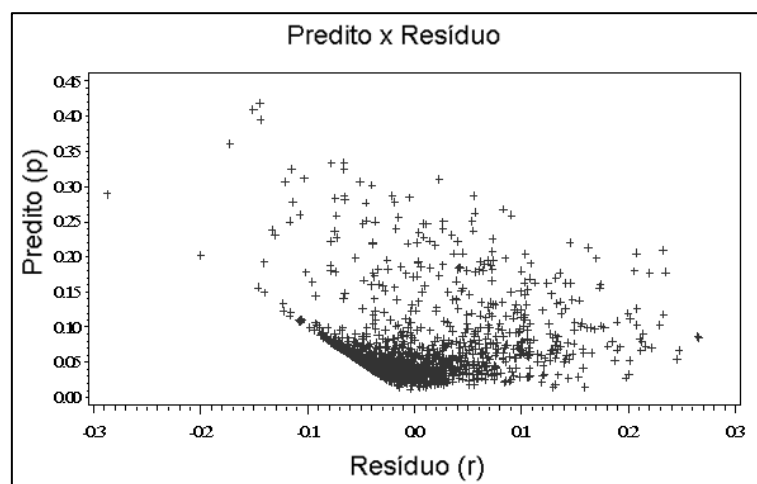


Figura 4-37: Análise dos Resíduos, Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear 6.

O gráfico dos valores reais e dos valores preditos encontra-se na Figura 4-38.

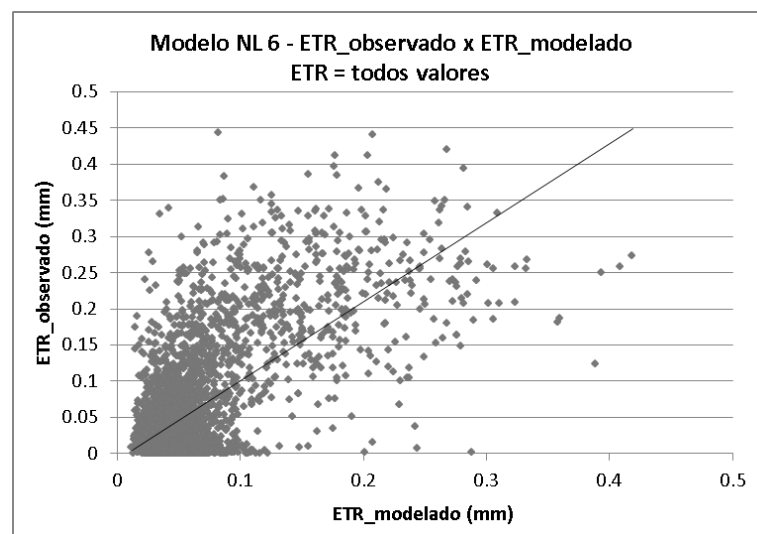


Figura 4-38: Gráfico de dispersão entre os valores modelados e observados da ETR.

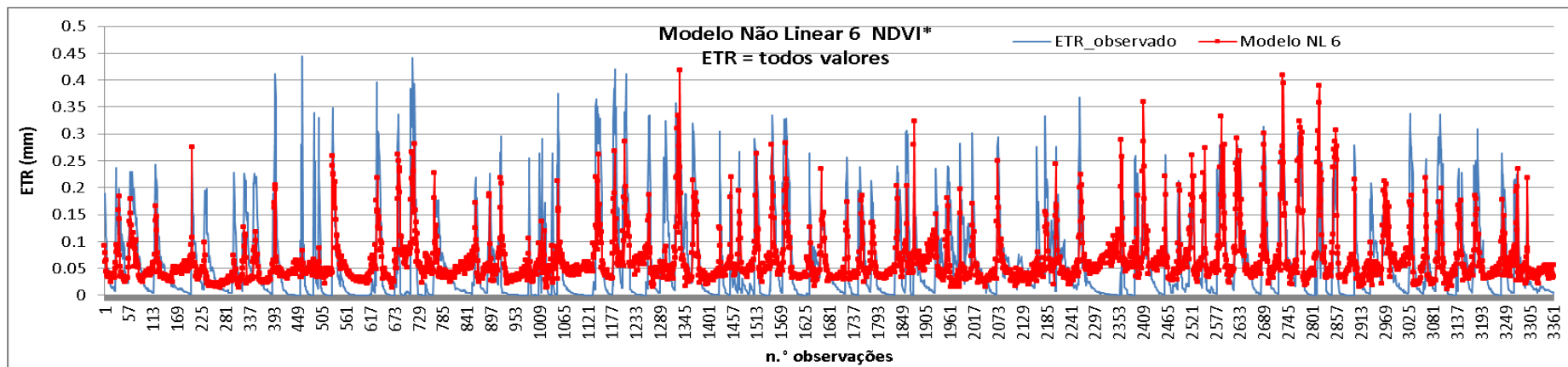


Figura 4-39: ETR instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 6 NDVI* versus a ETR instantânea observada para todas estações e todo período.

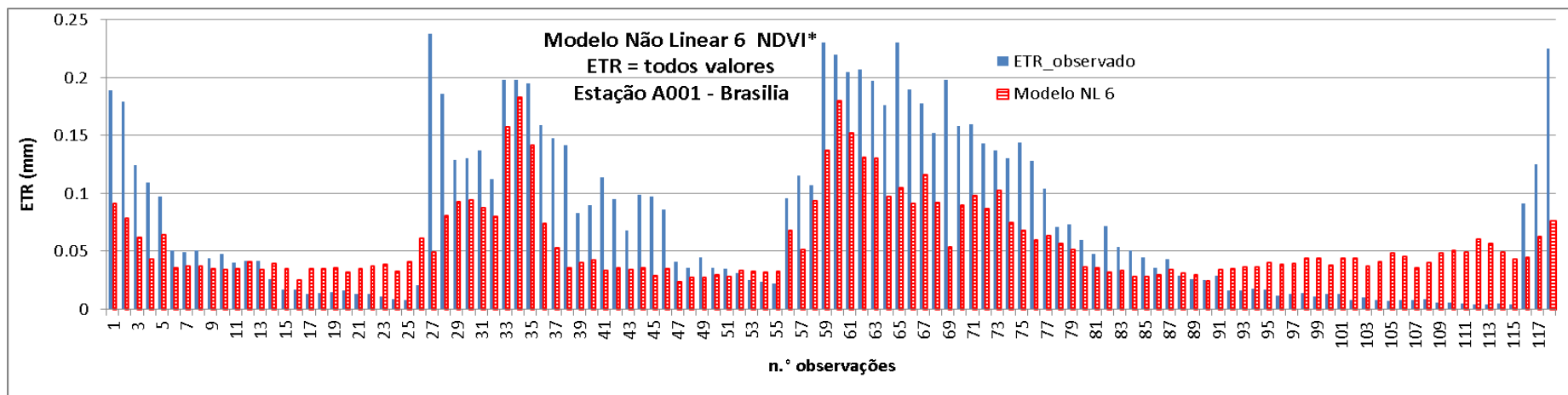


Figura 4-40: ETR instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 6 NDVI* versus a ETR instantânea observada para estação A001, ETR todos valores.

4.6.3 Modelo não linear 7

Enfim, a partir do modelo anterior calcularam-se novos coeficientes utilizando apenas as observações de ETR >0,05 mm obtendo-se:

$$ETR = \exp^{(-4,9001+0,7123.RG+1,0687.NDVI^*)}$$

Equação 4-9

Onde os valores dos coeficientes b_0 , b_2 e b_3 (Quadro 4-33) obtidos após seis iterações.

Quadro 4-33: Coeficientes do Modelo Não Linear 7.

Parâmetros	Estimativa	Desvio Padrão aproximado	Aproximação 95% - Limites de confiança		Skewness
b_0	-4,9001	0,1812	-5,2558	-4,5443	-0,0218
b_2	0,7123	0,0364	0,6409	0,7837	0,0241
b_3	1,0687	0,1890	0,6976	1,4397	0,0155

Na validação obteve-se MSPR=0,0018965 próximo do MSE=0,00384, o que indica que o modelo foi validado. A coluna *Skewness* apresentou-se menor que 0,1, logo, as estimativas não estão viesadas (Quadro 4-33).

O Modelo Não Linear 7 obteve $R^2 = 15,9228/18,3440 = 0,8680$ (Quadro 4-34).

Quadro 4-34: Análise de variância ANOVA do Modelo Não Linear 7.

Fonte	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Valor F	p-valor Pr > F
Dados	3	15,9228	5,3076	1381,05	<0,0001
Erro	630	2,4212	0,00384		
Total	633	18,3440			

Diante dos resultados obtidos para os modelos que utilizam todas estações, avalia-se que tanto o modelo que utiliza apenas o Índice de Vegetação Realçado (EVI*) quanto somente Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI*) apresentam resultados semelhantes um ao outro e ao mesmo tempo satisfatórios, onde o R^2 ajustado para o modelo não linear é de 0,6708, quando usa o EVI* e 0,6521, quando se usa o NDVI* para os modelos que consideram todo intervalo de valores de *ETR*.

Quando os modelos consideram $ETR > 0.05$ mm, ou seja, modelos apropriados para monitoramento de área úmida, o R^2 ajustado é de 0,8695, quando se utiliza o EVI^* e 0,8680, quando se utiliza o $NDVI^*$, mostrando serem aptos a explicar aproximadamente 87% da variação total dos dados para áreas úmidas.

Os gráficos dos resíduos para o Modelo Não Linear 7 (Figuras 4-41 e 4-42) apresentam comportamento mais próximo do desejado. Sendo assim os valores preditos se aproximam dos valores observados (Figuras 4-43 e 4-44).

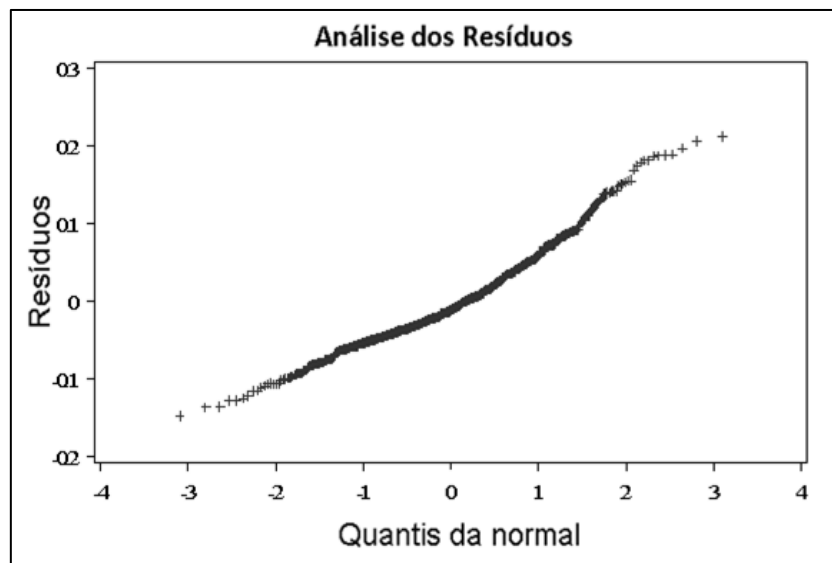


Figura 4-41: Análise dos Resíduos versus Quantis da normal do Modelo Não Linear 7.

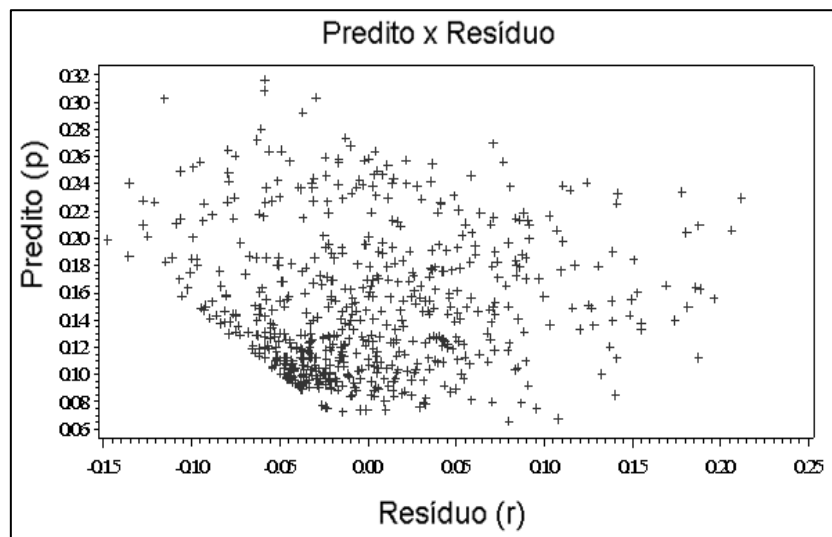


Figura 4-42: Análise dos Resíduos, Predito versus Resíduo do Modelo Não Linear 7.

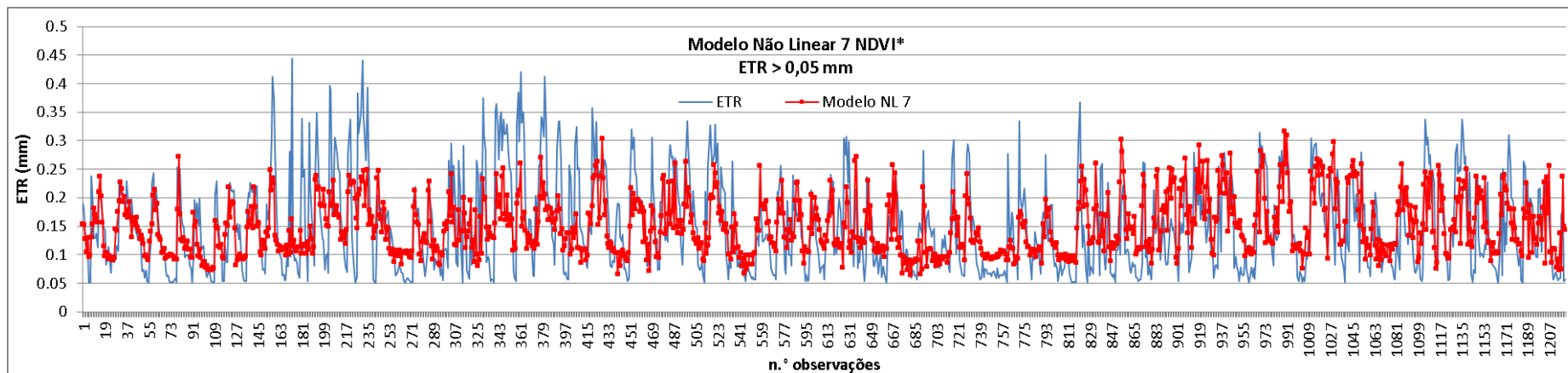


Figura 4-43: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 7 NDVI* versus a *ETR* instantânea para todas estações e período, *ETR* > 0,05 mm.

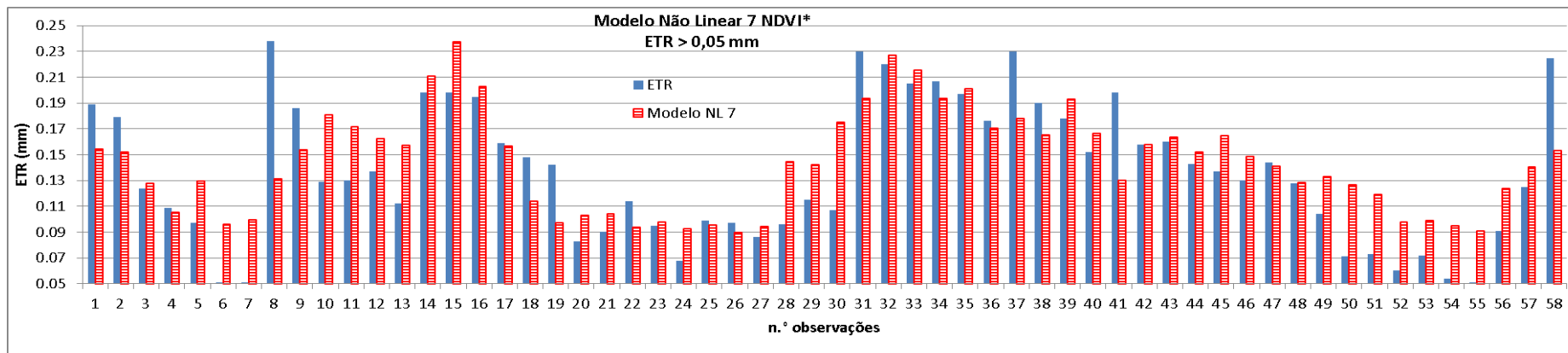


Figura 4-44: *ETR* instantânea Estimada pelo Modelo Não Linear 7 NDVI* versus a *ETR* instantânea observada para estação A001, *ETR* > 0,05 mm.

4.7 Estimativa da evapotranspiração diária

Após definirem-se as equações estimadoras da evapotranspiração real instantânea da hora da passagem do satélite, torna-se interessante a obtenção da evapotranspiração total diária, visto ser de maior interesse para aplicações no gerenciamento hídrico.

Para a estimativa da *ETR* diária, foi adotado o seguinte método:

- a. Selecionaram-se apenas os dados dos dias em que havia o registro das 24 horas de observação para obter a *ETR* diária;
- b. Calculou-se o fotoperíodo para cada um dos dias selecionados;
- c. Calculou-se a somatória das 24 observações de evapotranspiração horária de cada estação para cada um dos dias.
- d. Multiplicou-se a *ETR* instantânea pelo fotoperíodo de cada estação tendo em vista a relação entre o número de horas de exposição a energia e a quantidade de *ETR* total diária.
- e. Compararam-se os valores da *ETR* diária observada com os valores obtidos pela multiplicação da *ETR instantânea* com o fotoperíodo.

Ao realizar a análise estatística dos dados, observou-se que as estimativas de *ETR* mais precisas e acuradas foram obtidas para o momento em que a *ETR* instantânea apresentava-se maior que 0,05 mm, tal resultado apresentou-se da mesma forma ao realizar a comparação da *ETR* total diária estimada com a *ETR* total diária observada.

Apresentam-se nas Figuras 4-45, 4-46, 4-47, 4-48, 4-49, 4-50, 4-51 e 4-52 os gráficos de comparação entre *ETR* diária observada (linha de cor preta) e *ETR* diária modelada, resultado da multiplicação da *ETR* instantânea pelo fotoperíodo. Também, para efeitos de comparação, são plotadas a ET_p e a ET_o para as *EMAS* de Brasília-DF, Faculdade da Terra – DF, Água Emendadas – DF, de Palmas – TO, Paranã – TO, Caiapônia – GO, Campina Verde – MG e Conceição das Alagoas – MG.

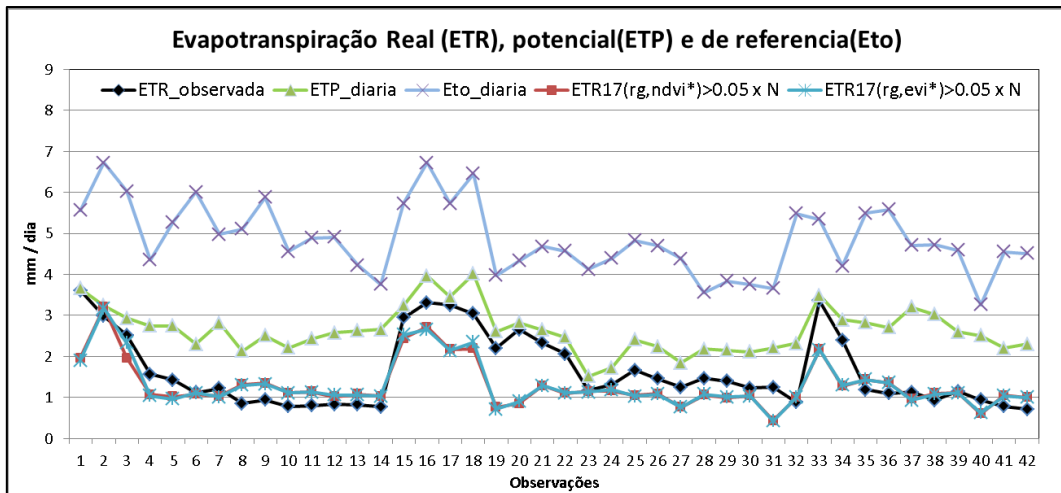


Figura 4-45: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Brasília-DF (2007-2010) pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

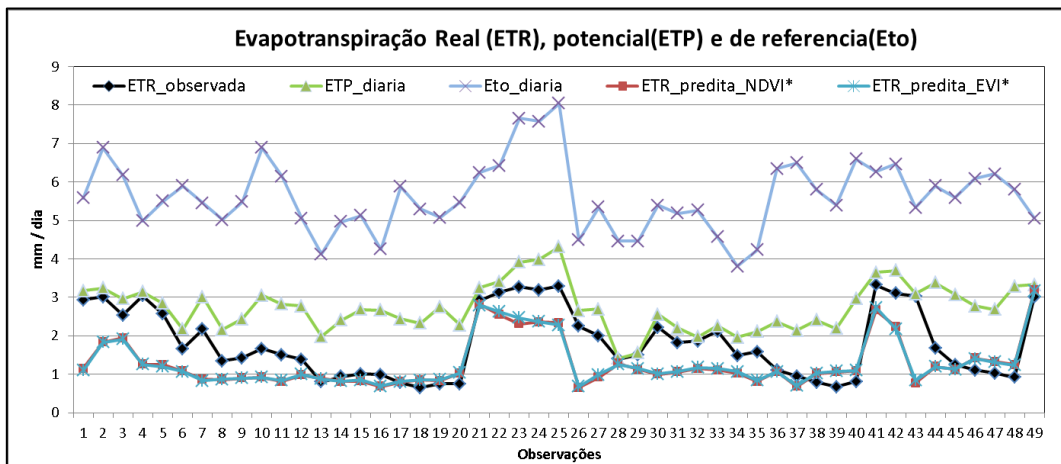


Figura 4-46: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação da Faculdade da Terra – DF, pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

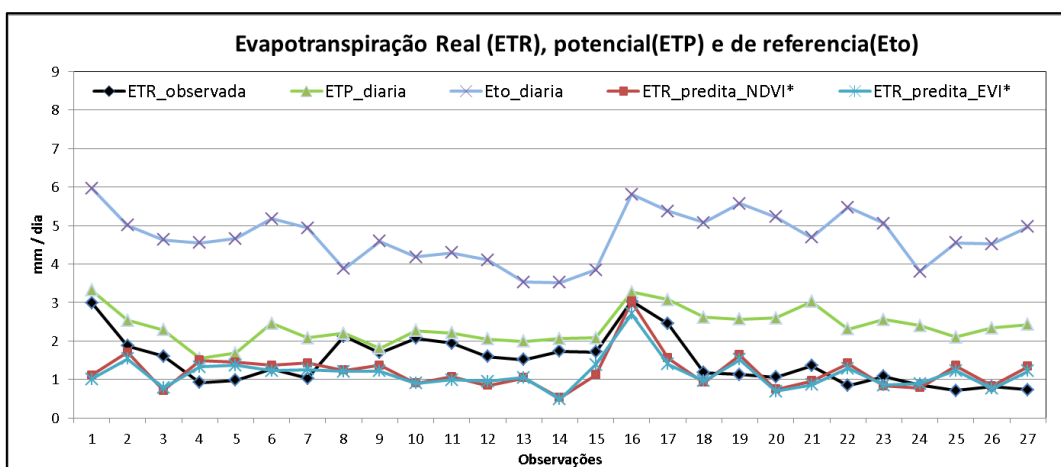


Figura 4-47: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Água Emendadas - DF, pelos Modelos Não lineares 5 e 7.

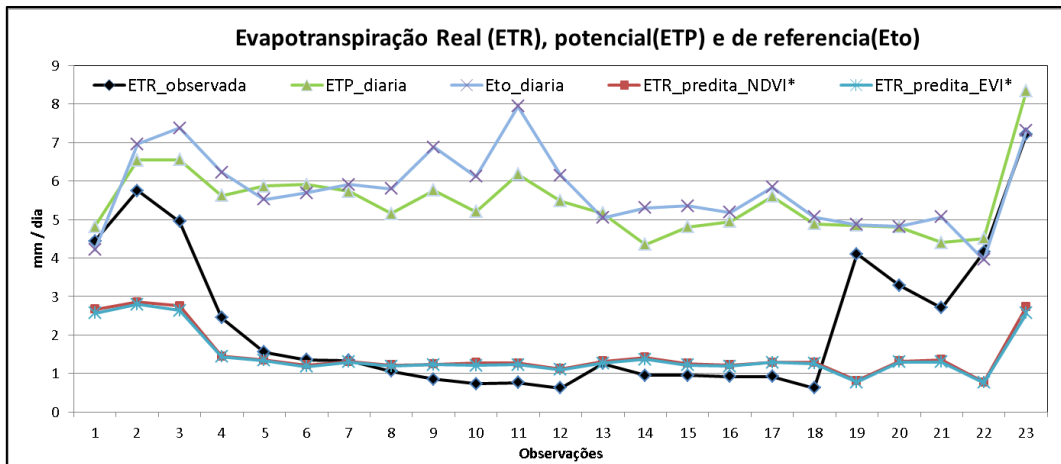


Figura 4-48: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Palmas – TO, pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

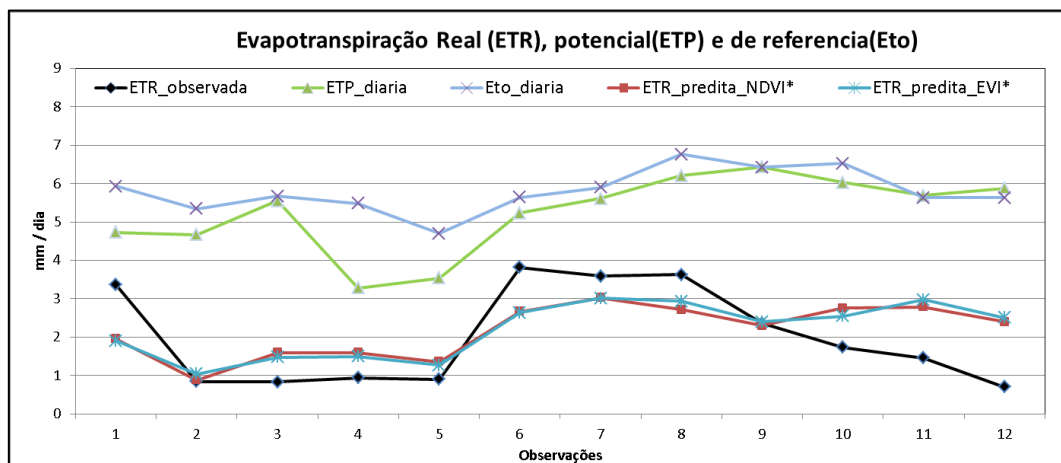


Figura 4-49: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Paranã – TO, pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

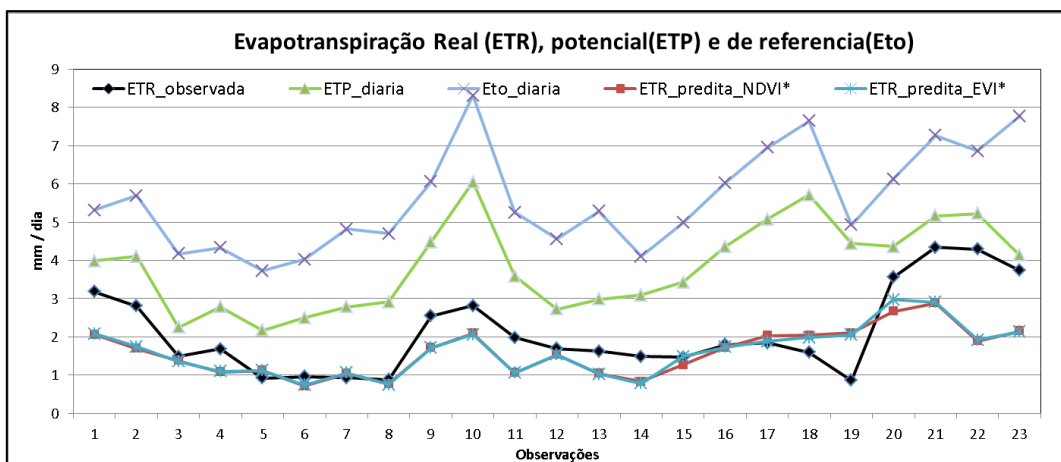


Figura 4-50: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Caiapônia – GO, pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

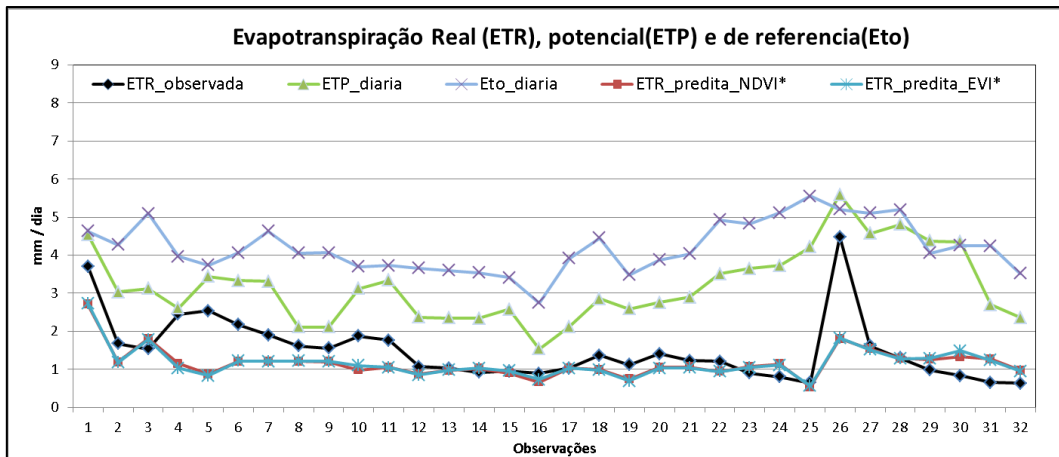


Figura 4-51: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Campina Verde – MG, pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

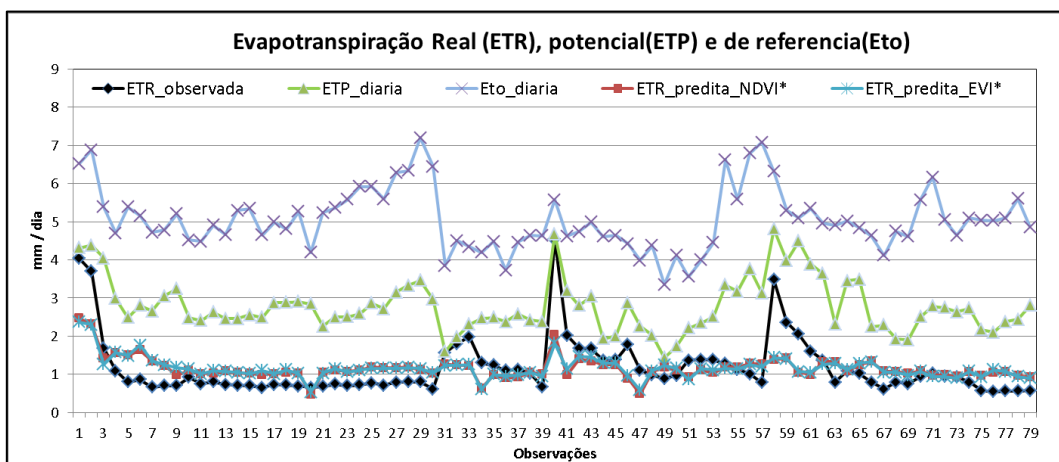


Figura 4-52: Comparação entre os valores diários de ETR, ET_p e ET_o para estação de Conceição das Alagoas - MG, pelos Modelos Não Lineares 5 e 7.

Os modelos Não lineares 5 e 7 foram aplicados sobre imagens de satélite com respectivos índices de vegetação utilizados por cada modelo em uma área próxima à estação meteorológica de Brasília (Parque Nacional de Brasília), em torno de 10 km, considerada como área vegetada e outra, pouco vegetada, associada à área urbana de Ceilândia, cidade satélite distante cerca de 20 km da estação Brasília, conforme se pode visualizar na Figura 4-53.

Nas imagens em composição colorida pode se interpretar que as áreas verdes são áreas vegetadas e áreas em tons avermelhados são solo exposto. Já nas imagens em tons de cinza, pode-se interpretar que os tons mais claros são áreas com índices de vegetação mais elevados que nas áreas de tonalidade mais escura.

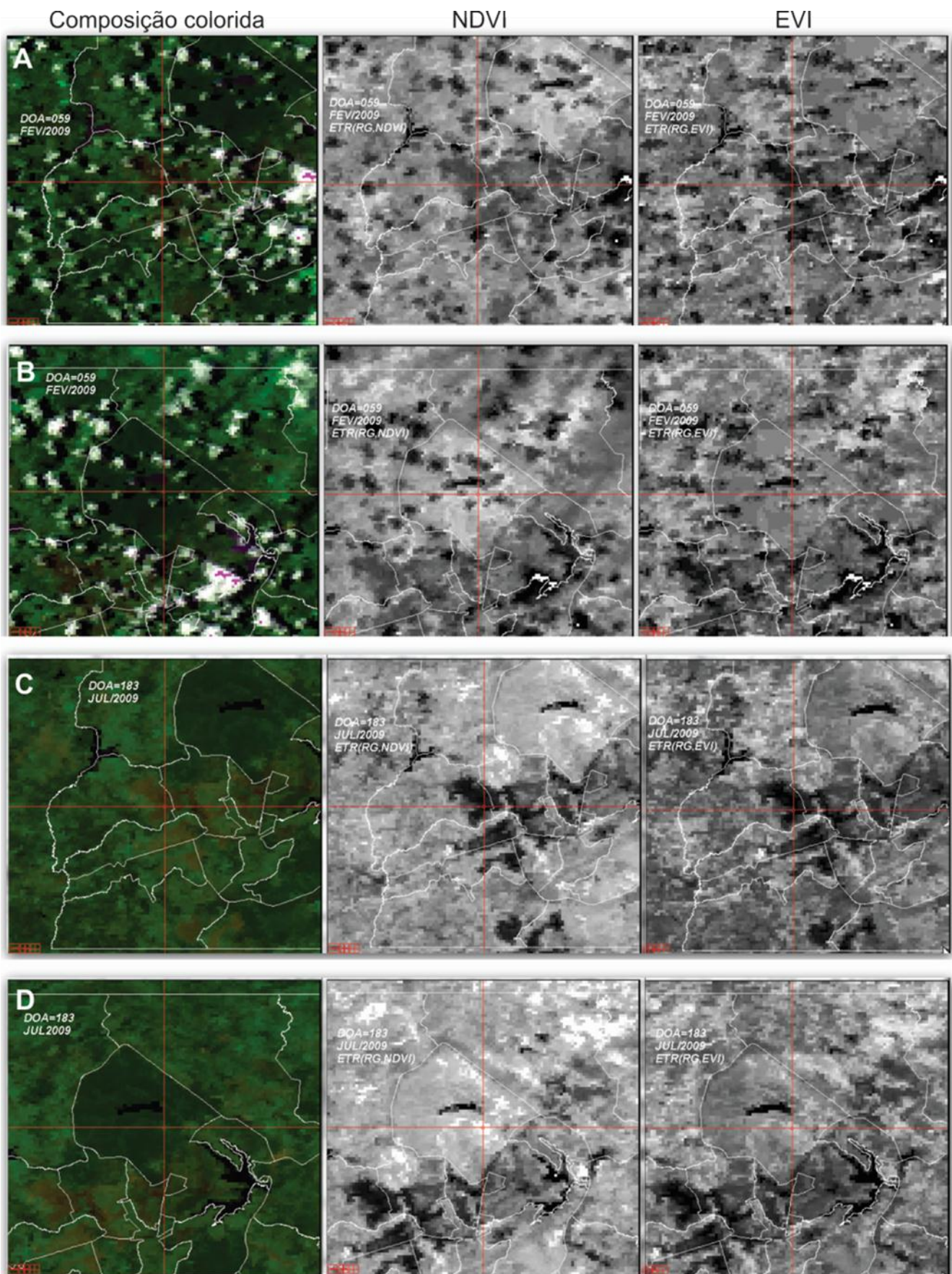


Figura 4-53: ETR diária pelos modelos não lineares 5 e 7 no período chuvoso para a região com pouca vegetação (A) e com muita vegetação (B); e no período seco com pouca vegetação (C) e com muita vegetação (D).

Para o período chuvoso foi utilizada uma imagem do mês de fevereiro de 2009, dia de ordem do ano (DOA=59), em que, para o local com pouca vegetação, os valores de EVI e NDVI foram 0,11 e 0,19, respectivamente, no qual a ETR estimada pelos modelos não lineares 5 e 7 foi 2,56 mm/dia e 2,69 mm/dia, respectivamente. Já, para a área vegetada, os valores de EVI e NDVI foram 0,38 e 0,81, respectivamente, na qual a ETR estimada pelos modelos não lineares 5 e 7 foi de 2,98 e 3,75 mm/dia, respectivamente, comparado com evapotranspiração observada na estação de Brasília, que foi de 3,05 mm/dia.

Para o período seco, foi utilizada uma imagem do mês de julho de 2009, dia de ordem do ano (DOA=183) sobre o local com pouca vegetação, os valores de EVI e NDVI permaneceram em 0,11 e 0,19, respectivamente, no qual a ETR estimada pelos modelos não lineares 5 e 7 foi de 1,15 e 1,2 mm/dia respectivamente. Já, para a área vegetada, os valores de EVI e NDVI foram 0,36 e 0,7 respectivamente, na qual a ETR estimada pelos modelos não lineares 5 e 7 foi de 1,32 e 1,59 mm/dia respectivamente, comparado com evapotranspiração observada na estação de Brasília que foi de 0,88 mm/dia. Os resultados das duas áreas para os dois períodos estão representados graficamente pela Figura 4-54.

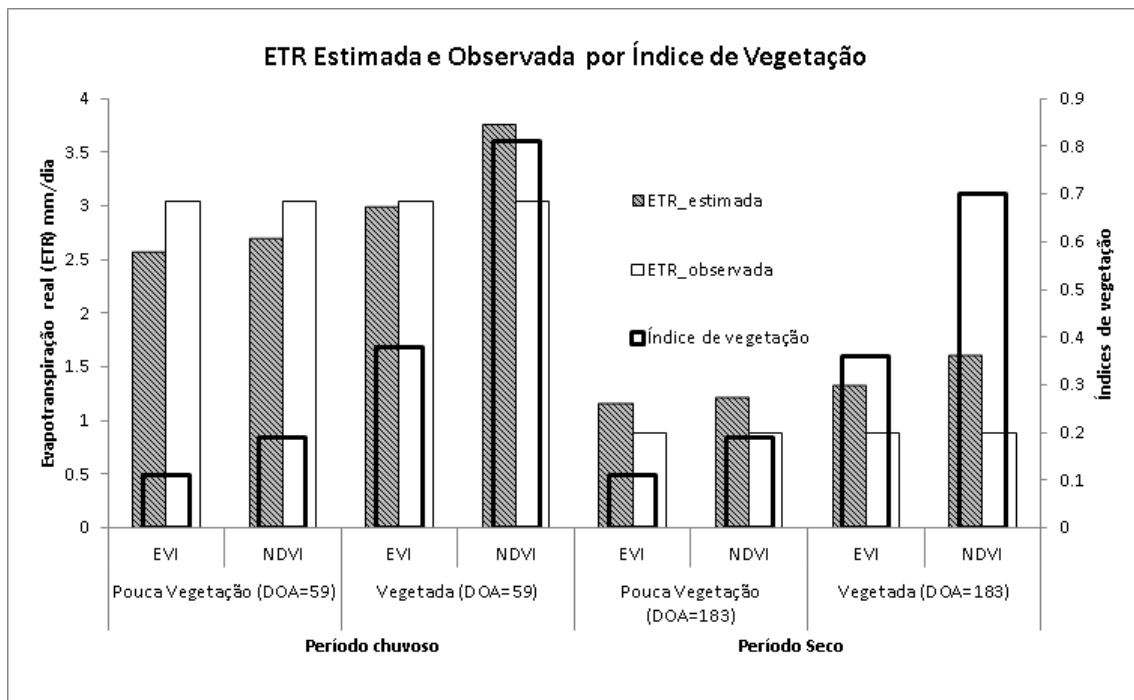


Figura 4-54: Evapotranspiração diária em área pouco vegetada e muito vegetada próximo à estação meteorológica automática de Brasília nos períodos chuvoso e seco.

Observou-se que quando a evapotranspiração real horária ultrapassa 0,05 mm, os valores predominantes dos índices de vegetação situam-se acima de 0,2 para o EVI e acima de 0,3 para o NDVI.

A Figura 4-55 apresenta em ordem crescente os valores de evapotranspiração real horária, juntamente com os valores de índice de vegetação, EVI e NDVI, obtidos por sensoriamento remoto. Observa-se que para $ETR \leq 0,05$ mm, os valores de EVI variam entre 0,1 e 0,35 e o NDVI varia entre 0,15 e 0,6.

A linha delimita o comportamento para $ETR > 0,05$ mm, onde os valores de EVI e NDVI aumentam, passando a variar, na sua maioria, entre 0,15 e 0,6 para EVI e entre 0,2 e 0,85 para o NDVI, (Quadro 4-35).

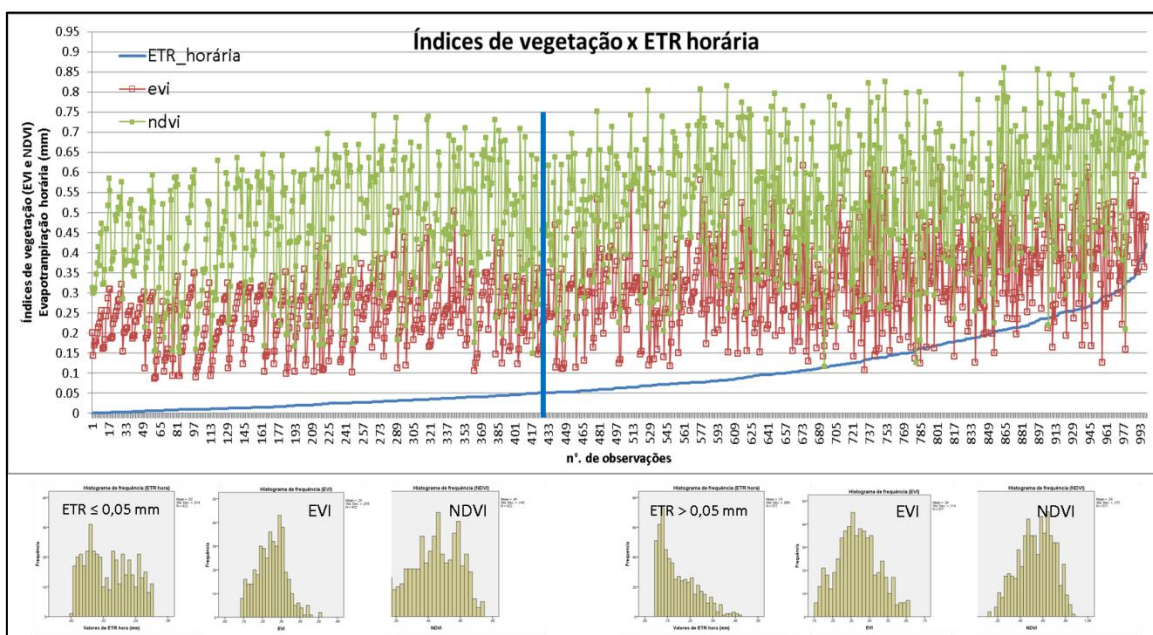


Figura 4-55: Valores predominantes de Índices de vegetação para evapotranspiração abaixo e acima de 0,05 mm.

Quadro 4-35: Análise descritiva do índice de vegetação para ETR abaixo e acima de 0,05 mm.

N=423	ETR<=0,05	EVI	NDVI		N=577	ETR>0,05	EVI	NDVI
Média	0,0231	0,2478	0,4498		Média	0,1461	0,3369	0,5385
Mediana	0,0220	0,2511	0,4547		Mediana	0,122	0,3305	0,5483
Desvio padrão	0,01414	0,07850	0,14295		Desvio padrão	0,08268	0,1136	0,1567
Variância	0,000	0,006	0,020		Variância	0,0068	0,0129	0,0246
Intervalo	0,05	0,42	0,59		Intervalo	0,37	0,5101	0,7449
Mínimo	0,00	0,09	0,15		Mínimo	0,051	0,1074	0,1154
Máximo	0,05	0,50	0,74		Máximo	0,421	0,6174	0,8603

As Figuras 4-56 e 4-57 (Fonte: INMET) apresentam as cartas de ETR decendial observada nas estações meteorológicas convencionais durante o período chuvoso (segundo decêndio de fevereiro) e seco (primeiro decêndio de julho), respectivamente. A área de estudo está demarcada com retângulo, observa-se na Figura 4-56 que existe maior evapotranspiração na região abaixo da metade da área demarcada com comportamento similar à evapotranspiração potencial, distribuída quase homogênea.

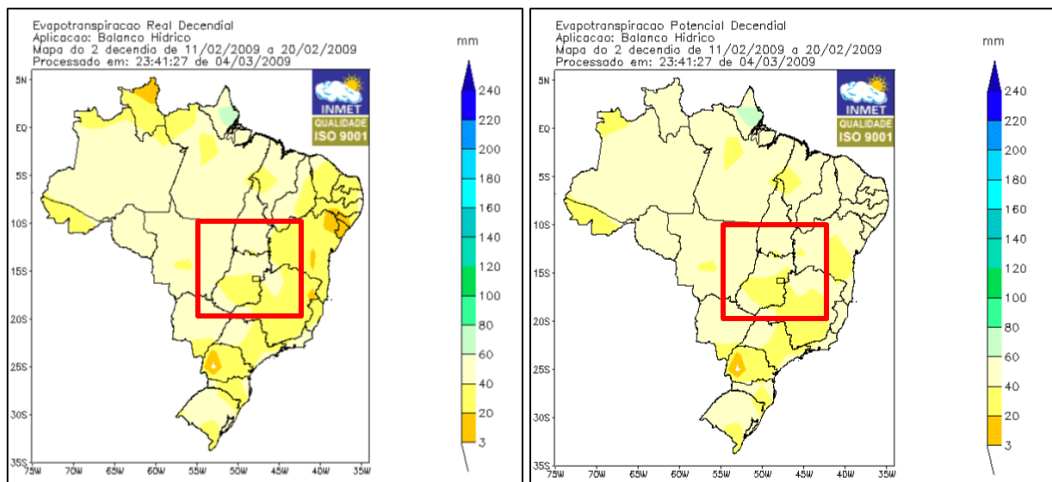


Figura 4-56: ETR decendial (Thonthwaite e Mather, 1955) no período chuvoso.

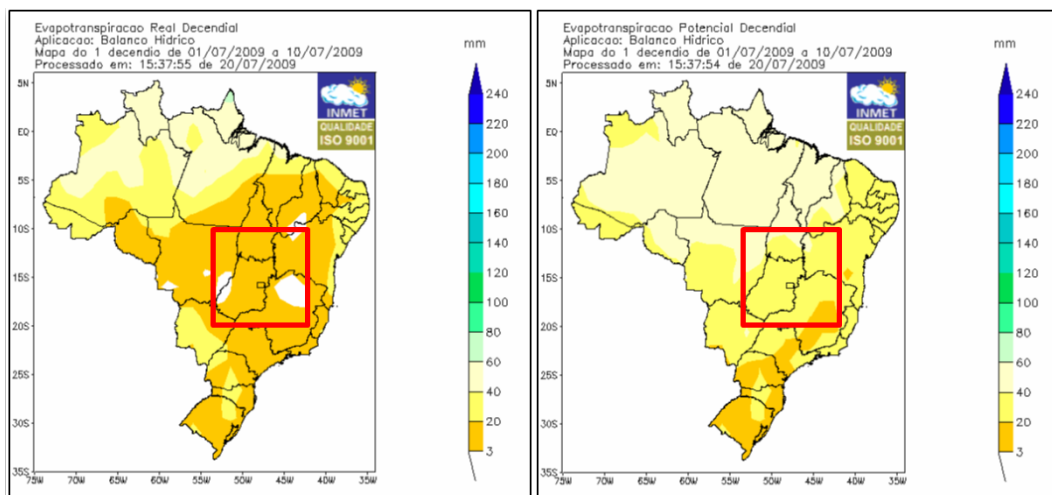


Figura 4-57: ETR decendial (Thonthwaite e Mather, 1955) no período seco.

Observa-se um comportamento similar no produto obtido do Modelo Não Linear 5 (Figura 4-58) para DOA=059. Observa-se na Figura 4-57 que a ETR é menor que a ET_p e de forma geral o gradiente positivo da ETR aumenta da região centro-oeste para o norte, conforme se pode observar também no produto obtido do Modelo Não Linear 5 para DOA=183 (Figura 4-59).

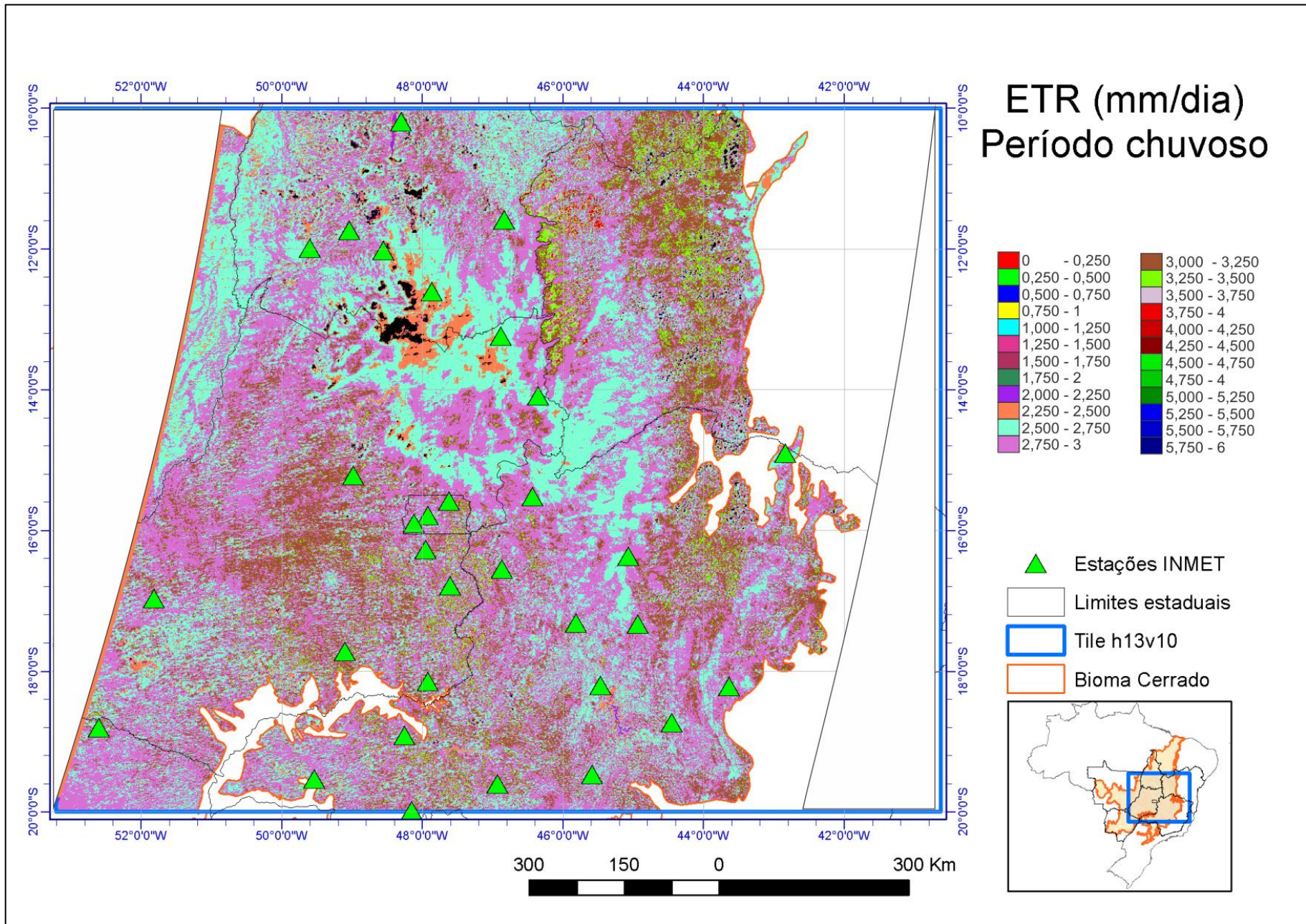


Figura 4-58: Evapotranspiração diária estimada no período chuvoso (DOA=059).

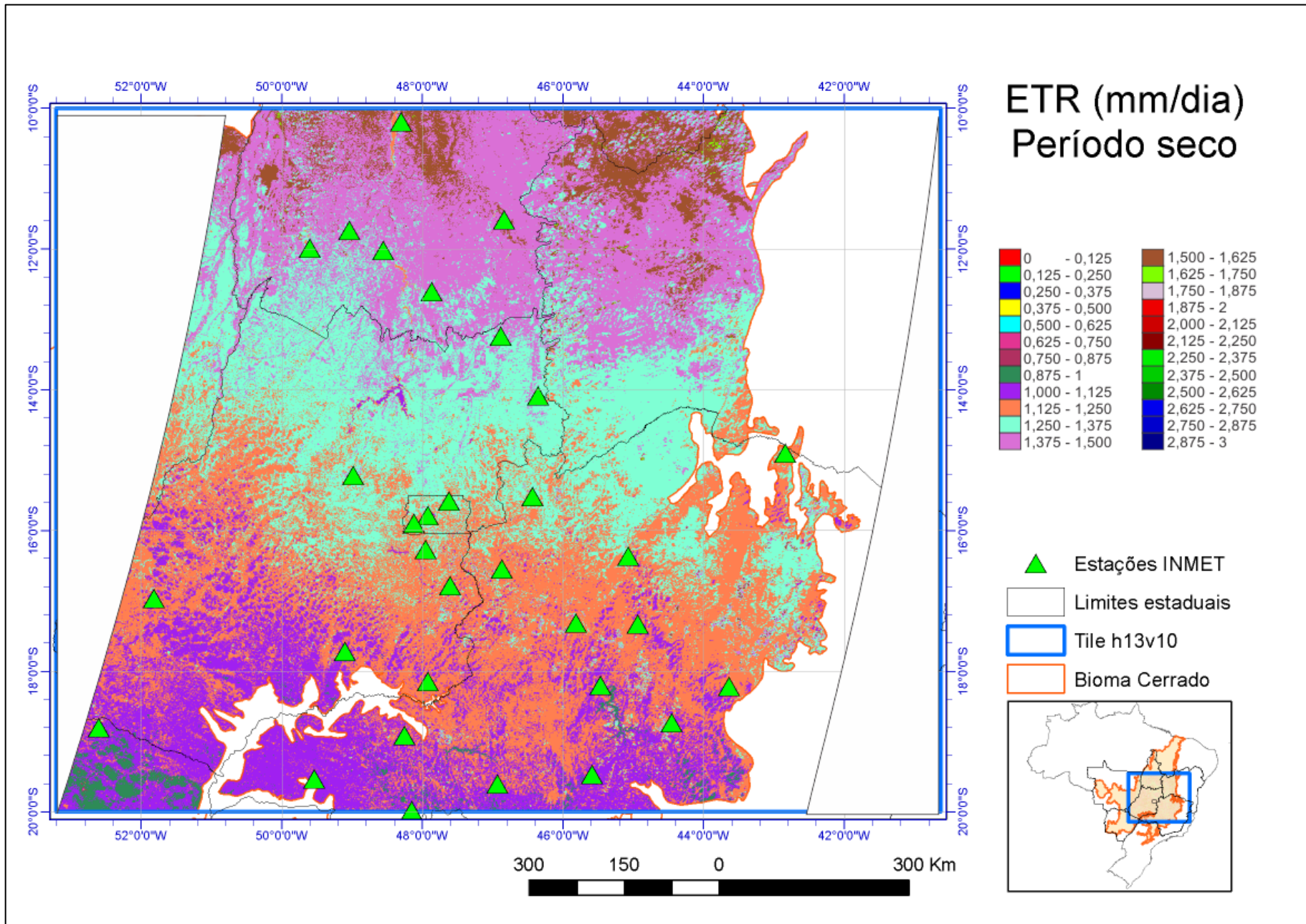


Figura 4-59: Evapotranspiração diária estimada no período seco (DOA=183).

A elaboração dos modelos para estimativa de *ETR* por sensoriamento remoto que utilizem o mínimo de informação de superfície é ideal para que se obtenham informações de áreas em que não haja disponibilidade de instrumentação adequada para medições desse parâmetro.

Tendo em vista o avanço computacional, tanto para armazenamento quanto visualização e manipulação de dados espaciais (matricial e vetorial) é possível tornar operacional a estimativa da *ETR* diária por demanda para áreas heterogêneas utilizando softwares livres como, banco de dados espaciais, por exemplo, PostgreSQL/PostGIS Raster, servidores de dados espaciais tal como, mapserver e geoserver e interface interativa em ambiente web como, I3geo, Google Earth, Google Maps entre outros.

A Figura 4-60 apresenta um exemplo de um ambiente que utiliza algumas dessas ferramentas computacionais para consulta de *ETR* diária utilizando dados de entrada como, longitude, latitude e altitude, disponíveis no próprio mapa interativo (para cálculo da *RG*) e a consulta aos índices de vegetação (EVI ou NDVI) podem ser por acesso a uma base remota de imagens armazenadas em banco de dados espaciais.

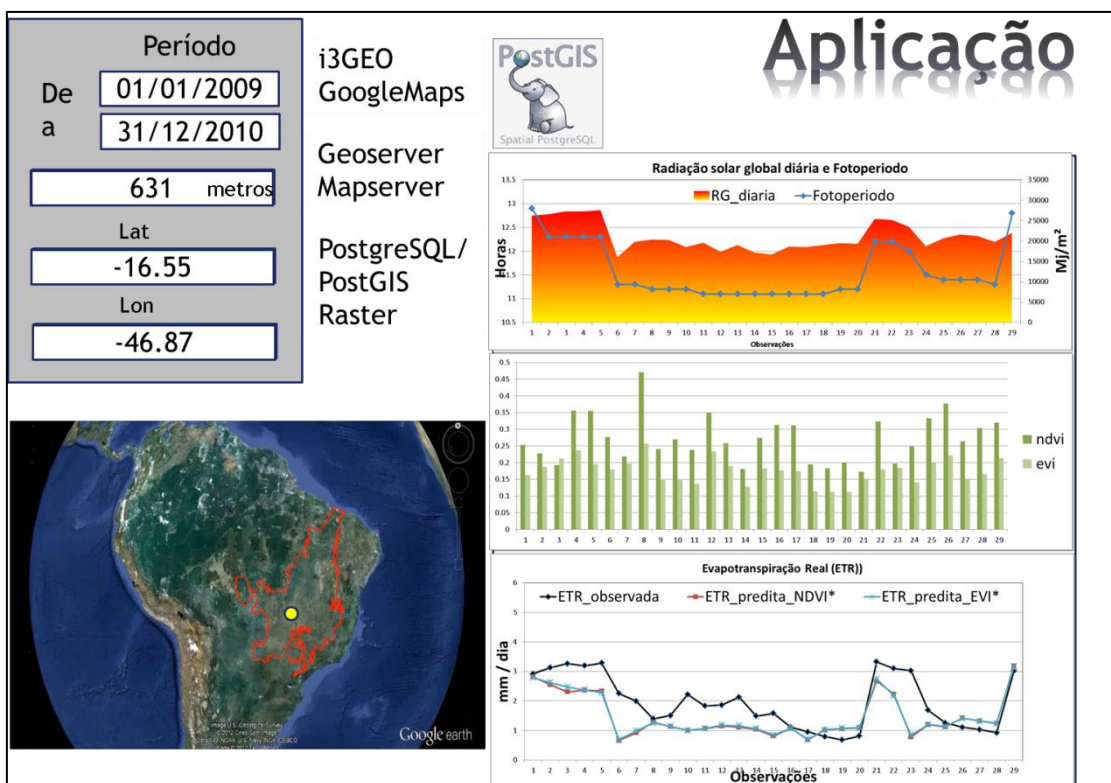


Figura 4-60: Exemplo de interface para consulta de *ETR* diária estimada pelos Modelos Não Lineares 4 e 5.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou ser possível determinar modelos não lineares para estimar a ETR, sob condições ambientais normais, ou seja, variando com o déficit e com a disponibilidade de água no solo com boa precisão utilizando métodos de regressão multivariada não linear. Isso foi possível por meio de relações observadas entre a ETR estimada pelo balanço hídrico sequencial horário e os índices de vegetação (EVI e NDVI), a temperatura da superfície (LST) e a radiação solar global (RG).

O modelo não linear 3, que foi calibrado utilizando todo universo de dados e contém como parâmetros de entrada a LST, a RG e o EVI*, apresenta MSE igual a 0,00368 e R^2 igual a 0,6708 mostrando menor capacidade preditiva em relação ao modelo não linear 4.

O modelo não linear 5, que contém como parâmetros de entrada apenas a RG e o EVI*, foi calibrado para obter valores de ETR acima de 0,05 mm e apresentou MSE igual a 0,00380 e R^2 igual a 0,8694.

A supressão do LST no modelo não linear 5 ocorreu, pois observou-se que a temperatura da superfície possui pouca significância, diminuindo em 0,0001 o valor do coeficiente de determinação se comparado ao Modelo não linear 4.

As equações não lineares geradas nesse estudo permitiram estimar a quantidade de água evapotranspirada da superfície para atmosfera durante todo período do ano com boa aproximação dos valores observados para o Bioma Cerrado, podendo ser aplicadas nas diversas áreas de conhecimento que necessitem desse tipo de informação, como por exemplo, nos modelos meteorológicos para previsão do tempo e na agricultura para gerenciamento de irrigação, recursos hídricos e avaliação de seca.

Os modelos acompanham a tendência sazonal da evapotranspiração real (ETR) calculada pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), sendo principalmente aplicadas para monitorar a variação do armazenamento de água no solo pela chuva e seca agrícola representando valores que estão relacionados à capacidade de armazenamento de campo e à climatologia da região.

Os modelos subestimam os valores para áreas irrigadas no período seco, porém acompanham a sazonalidade anual, sendo úteis para monitoramento das condições reais da região em termos de disponibilidade de água no solo.

A tendência geral dos modelos é uma subestimativa no período chuvoso e uma superestimativa no período seco, acompanhando a sazonalidade de cada estação envolvida no estudo.

As equações geradas não são sensíveis à estimativa da demanda atmosférica, pois não foram validadas com dados de evapotranspiração potencial (ET_p) mas sim com a evapotranspiração real (ETR).

O modelo não linear 5 consegue estimar em áreas com maior teor de biomassa sem saturar enquanto que o modelo não linear 7 que usa NDVI é menos sensível a esse tipo de cobertura.

Os resultados mostraram que os modelos que utilizam o EVI foram melhores que os modelos que utilizam NDVI. Isso se deve principalmente ao fato de que o cálculo do *EVI* utiliza o espectro do azul, o que possibilita correção atmosférica e a resposta do solo, porém requer um instrumento que obtenha medidas nesse espectro do visível.

Os modelos que utilizam o NDVI possibilitaram resultados inferiores aos que usam o EVI, porém essa diferença foi de 2% quando calibrados para todos os valores de evapotranspiração. Já os resultados dos modelos calibrados com valores de ETR maiores que 0,05 mm, apresentaram diferença na ordem de 0,15%, demonstrando uma mínima diferença na precisão da estimativa.

A evapotranspiração real apresentou-se superior a 0,05 mm quando os valores de EVI e NDVI possuem valores acima de 0,2 e 0,3 respectivamente, demonstrando que quanto maior a vegetação, maior é a evapotranspiração observada.

Tendo em vista a pouca diferença entre as estimativas da ETR propiciadas por cada modelo, em que os R^2 são 0,8694 e 0,8680 e os MSE se apresentam como 0,0038 e 0,00384 para os modelos não lineares 5 e 7 respectivamente, pode-se concluir que o modelo não linear 7 apresenta resultados satisfatórios sendo mais simples.

REFERÊNCIAS

ADÂMOLI, J. et al. Caracterização da região dos Cerrados. In: GOEDERT, W. J. **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina:Embrapa-CPAC: São Paulo: NOBEL, 1987. p. 33-98.

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **Journal of irrigation and drainage**, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper**. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, p. 326. 1998.

ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for Snake Plain aquifer in Idaho**. Presented at the meeting of United States Committee on Irrigation, Drainage and Food Control. San Luis Obispo, CA. 2002.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle fórmula. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, n. 2, p. 139-155, Maio 1986.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; JENSEN, M. E. **Environmental requirements of lysimeters**. International Symposium on lysimetry. Honolulu: [s.n.]. 1991.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; JENSEN, M. E. Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements: proceedings. **American Society of Civil Engineers (ASCE)**, New York, p. 170-181, 1991.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL-Surface Energy Balance Algorithms for Land-Advanced Training and Users Manual - Idaho implementation, version 1.0. **Advanced Training and Users Manual**, Idaho, p. 98, agosto 2002. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/Final%20Sebal%20Manual.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2012.

AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J. D. Comparison of methods for estimating potential evapotranspiration, St. Joseph: ASAE, p. 27, 1992.

ANA. **GEO Brasil: recursos hídricos**. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília, p. 60. 2007.

AREVALO, J. GIS4Freedom Blog. **How to install and configure PostGIS Raster on Windows**, 2011. Disponível em: <<http://gis4free.wordpress.com/2011/03/10/how-to-install-and-configure-postgis-raster-on-windows/>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

ATAIDE, K. R. P.; BAPTISTA, G. M. M. Valor de pixel e interação entre vetor e imagens de satélite através da internet. **ANAIS XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, 5 maio 2011. 4368.

ATAIDE, K. R. P.; BEZERRA, W. A. Dados Meteorológicos e Ambientais em PostgreSQL (PostGIS / WKT Raster) e consulta via WEB. **ANAIS do XVI Congresso Brasileiro de**

Meteorologia, Belém, 17 set. 2010. 5. Disponível em: <http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/690_84758.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2012.

BARRETO, A. S. **Teoria e Aplicações com o Programa Estatístico R**. Brasília: [s.n.], 2011.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate**. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Biblioteek, Den Haag. Netherlands, p. 272. 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 213-229, 1998.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environments**, v. 94, p. 321-340, 2003.

BATISTA, J. L. F.; PRADO, P. I. Introdução ao R - Uma apostila on-line. **Apostila on line [Uso da Linguagem R para Análises de dados Ecológicos]**, 2009. Disponível em: <<http://ecologia.ib.usp.br/bie5782>>. Acesso em: 03 Fevereiro 2012.

BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 100, p. 130-138, 1965.

CAMARGO, A. P. **Balanco hídrico no estado de São Paulo, Boletim técnico**. IAC. Campinas, p. 116. 1971.

CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. Prescrição de rega por modelo climatológico. **Fundação Cargill**, Campinas, 1990. 27.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extrível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CHARNET, R. et al. **Análise de Modelos de Regressão Linear com Aplicações**. [S.l.]: Editora da Unicamp, 1999.

CHATTERJEE, S.; PRICE, B. **Regression Analysis by example**. New York: John Wiley, 1991.

CHEN, D. et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standart Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **CLIMATE RESEARCH**, v. 28, p. 123-132, Março 2005.

CNPq-EMBRAPA. Agencia de Informação Embrapa Solo. **Agencia de Informação Embrapa-Bioma Cerrado**, 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_14_911200585231.htm>. Acesso em: 6 jan. 2012.

- COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n. 3, p. 175-183, 1974.
- COOPER, P. I. the absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, Londres, v. 12, n. 3, p. 333-346, 1969.
- COUTINHO, L. M. Aspectos do Cerrado. **aspectos_relevo**, 2000. Disponível em: <http://eco.ib.usp.br/cerrado/aspectos_relevo.htm>. Acesso em: 28 junho 2012.
- DAHM, C. et al. Evapotranspiration at the land/water interface in a semi-arid drainage basin. **Freshwater Biology**, v. 47, p. 831-843, 2002.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT EGON, D. D. P. Relação ente os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, mar-abr 2005.
- DAVDSON, R.; MACKINNON, J. G. **Estimation and inference in Econometrics**. [S.l.]: Oxford University Press, 1993.
- DIAS, B. F. S. Cerrados: uma caracterização. In: DIAS, B. F. S. **Alternativas de desenvolvimento do Cerrado: Manejo e Conservação dos recursos naturais renováveis**. Brasília: IBAMA e FUNATURA, 1992. p. 11-25.
- DOBSON, A. J. **An Introduction to Generalized Linear Models**. 2. ed. [S.l.]: Chapman/CRC, 2002.
- DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, Campina Grande, v. 33, p. 306, 1994.
- DOORENBOS, J.; PRUIT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. ONU-FAO. Roma, p. (Irrigation and Drainage Paper, 24). 1975.
- EITEN, G. Vegetação do cerrado. In: NOVAIS PINTO, M. (). **Vegetação do cerrado**. Cerrado, caracterização, ocupação e perspectiva. ed. Brasília: SEMETEC e UNB, 1990. Cap. 1, p. 9-65.
- ESALQ-LCE. ARQUIVOS DE AULA Site de apoio às disciplinas de Graduação e Pós. **BHseq63.xls**, 2002. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/lce306.html>>. Acesso em: 03 janeiro 2012.
- FALEIRO, F. G. et al. **O simpósio nacional sobre o Cerrado e o simpósio internacional sobre savanas tropicais**. Savanas:Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade,agronegócio e recursos naturais. Planaltina, DF: EMBRAPA CERRADOS. 2008. p. 33-46.
- FARIAS, J. R. B. **Dinâmica da água no sistema solo-água-planta atmosfera: déficit hídrico em culturas**. UNIPAM. Patos de Minas, p. 32-37. 2005.
- FERRI, M. G. Contribuição ao conhecimento da ecologia do Cerrado e da caatinga-estudo comparativo da economia da água de sua vegetação. In: _____ **Tese de concurso Botânica da Faculdade de Filosofia**. São Paulo: [s.n.], 1955. p. 170.

FISHER, R. A. On Mathematical Foundations of Theoretical Statistics. **Philosophical transactions of the royal society of London**, p. 309-368, 1921.

GNU. GNU Operating System. **The GNU General Public License v3.0 - GNU Project - Free Software Foundation (FSF)**, 2007. Disponível em: <<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>>. Acesso em: 16 maio 2012.

GOLLAN, T.; PASSIOURA, J. B.; MUNNS, R. Soil water status effects the stomatal conductance of fully turgid wheat and sunflower leaves. **Australian Journal Plant Physiology**, 1986.

GOODLAND, R.; FERRI, M. G. **Ecologia do Cerrado**. Reconquista do Brasil. ed. São Paulo: Livraria Itatiaia Editora, 1979.

HAFEEZ, M. M. et al. **Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster**. Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications. ANAIS. Ottawa, Canadá. 2002.

HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 120, p. 1132-1139, 1994.

HUETE, A. R. et al. Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440 - 451, 1997.

IBGE; MMA. IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências - Produtos**, 2004. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/biomas.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2012.

IBGE-MAPAS. MAPAS IBGE - MAPAS INTERATIVOS. **MAPAS INTERATIVOS**, 2010. ISSN ISO-8859-1. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_interativos/>. Acesso em: 28 abr. 2012.

IFSC LCE BIOLOGIA. **Introdução à biologia dos vegetais**. São Carlos: Universidade, 2001.

INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Gráficos climatológicos, 2012. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>>. Acesso em: 28 junho 2012.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. **Academic Press**, London, p. 390, 1980.

JUNIOR, O. A. D. C. et al. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 23, n. 2, jun. 2005.

KABACOFF, R. I. Quick-R: Cluster Analysis. **Quick-R: Accessing the power of R**, 2012. Disponível em: <<http://www.statmethods.net/advstats/cluster.html>>. Acesso em: 05 fev 2012.

KELLEY, C. T. Solving Nonlinear Equations with Newton's Method. In: KELLEY, C. T. **Fundamentals of Algorithms**. [S.l.]: SIAM, 2003.

KELLEY, K.; MAXWELL, S. E. Sample Size for Multiple Regression: Obtaining Regression Coefficients That Are Accurate, Not Simply Significant. **Psychological Methods**, v. 8, n. 3, p. 305-321, 2003.

LECHINOSKI ET AL, A. Influência do estresse hídrico nos teores de proteínas e aminoácidos solúveis totais em folhas de Teca (*Tectona grandis* L. f.). **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, p. 927-929, jul 2007.

LEOTTI, V. ; BIRCK, R.; RIBOLDI, J. COMPARAÇÃO DOS TESTES DE ADERÊNCIA À NORMALIDADE KOLMOGOROVSMIRNOV, ANDERSON-DARLING, CRAMER-VON MISES E SHAPIRO-WILK POR SIMULAÇÃO, p. http://www.professores.uff.br/cecilia/disciplinas/Testes_aderencia.pdf, 14 mar. 2005. Disponível em: http://www.professores.uff.br/cecilia/disciplinas/Testes_aderencia.pdf. Acesso em: 18 abr. 2012.

LIST, R. J. **Smithsonian Meteorological Tables**. Smithsonian Institution. Washington. 1971.

LP DAAC-TEAM. MYD09GA-Daily LSG Global 1km and 500m- Surface Reflectance - MODIS Products Table-Products-LP DAAC: ASTER and MODIS Land Products and Services. **USGS-LPDAAC**, 2008. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/surface_reflectance/daily_l2g_global_1km_and_500m/myd09ga. Acesso em: 17 maio 2012.

LP DAAC-TEAM. MYD11A1 | Daily L3 Global 1km | Land Surface Temperature & Emissivity | MODIS Products Table | Products | LP DAAC : ASTER and MODIS Land Data Products and Services. **USGS-LP DAAC**, 2008. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/land_surface_temperature_emissivity/daily_l3_global_1km/myd11a1. Acesso em: 17 maio 2012.

LP_DAAC_TEAM. LP DAAC - Land processes distributed active archive center. **MCD12C1 | Yearly L3 Global 0.05Deg CMG | Land Cover | MODIS Products Table | Products | LP DAAC** : ASTER and MODIS Land Data Products and Services, 2008. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/land_cover/yearly_l3_global_0_05deg_cmg/mcd12c1. Acesso em: 28 abr. 2012.

LPDAAC-TEAM. Get Data | LP DAAC : ASTER and MODIS Land Data Products and Services. **USGS-LPDAAC**, 2008. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/get_data. Acesso em: 17 maio 2012.

LPDAAC-TEAM. MCD12C1 | Yearly L3 Global 0.05Deg CMG | Land Cover | MODIS Products Table | Products | LP DAAC : ASTER and MODIS Land Data Products and Services. **Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG**, 2008. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/land_cover/yearly_l3_global_0_05deg_cmg/mcd12c1. Acesso em: 17 maio 2012.

LPDAAC-TEAM. MODIS PRODUCTS TABLE | LPDAAC:ASTER and MODIS Land Data Products and Services. **LP DAAC**, 2011. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/. Acesso em: 23 mar. 2012.

LPDAAC-TEAM, L. MODIS Overview-Products-LP DAAC:ASTER and MODIS Land Data Products and Services. **MODIS overview**, 2008. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview>. Acesso em: 22 maio 2012.

M., H. M.; M, C. Y. V. D. G. N. B. B. A. Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: _____ **Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications, 2002**. Ottawa, Canadá.: [s.n.].

MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J. A. Algumas considerações em regressão não linear. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1761 - 1770, 2002.

MEDEIROS, A. T. **ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE PENMAN-MONTEITH, DE MEDIDAS LISIMÉTRICAS E DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS EM PARAIPABA, CE**. ESALQ. PIRACICABA, p. 103. 2002.

MILANI, A. **PostgreSQL: guia do programador**. São Paulo: Novatec, v. 1, 2008.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. 1º reimpressão. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MONTEITH, J. L. Evaporation and enviroment. In: FOGG, G. E. **Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms**. NY: [s.n.], v. 19, 1965. p. 205-234.

MOTA, F. S. D. **Meteorologia agrícola**. 376 p. ed. São Paulo: Nobel, 1986.

MUKAMMAL, E.; BRUCE, J. P. I. Evaporation measurements by pan and atmometer. **International Union of Geodesy and Geophysics. Association of Scientific Hydrology**, n. 53, 1960. 408-420.

NAGLER, P. L. et al. Evapotranspiration on western U.S. rives estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy correlation and Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 337-351, 2005.

NETER, J. et al. **Applied Linear Regression Models**. 3. ed. Irwin: Chicago, 1996.

NETER, J. P.; KUTHER, M. H. . N. C. J.; WASSERMAN, W. **Applied Linear Statistical Models**,. **MCGraw-Hill**, n. 4ª, 1996.

OBE, R. O.; HSU, L. S. **PostGIS in Action**. 1. ed. [S.l.]: Manning Publications Co, v. 1, 2011. 425 p. ISBN 9781935182269.

OGP. Geomatics Guidande Note. **OGP Publication 373-7-1**, v. 7, n. 1, p. 41, June 2011. Disponível em: <<http://www.ogp.org.uk/pubs/373-07-1.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2012.

OLIVEIRA, M. R.; BAPTISTA, G. M. M. **Validação do Modelo Espectral de Estimativa de Evapotranspiração na Região de Gilbués, Piauí**. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2011. p. 5925-5932.

- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. 463 p. ed. São Paulo: Agronomica Cares Ltda, 1981.
- OMM. **Drought and agriculture, WMO Tech. Note 138**. ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Geneva, Switzerland, p. 127. 1975.
- OMM., O. M. M.-. La vigilancia meteorológica mundial. **TP 92**, Genebra, n. 183, 1966.
- OSGEO. WKTRaster/SpecificationWorking01 - PostGIS. **PostGIS-Geospatial Objects for PostgreSQL**, 2011. Disponível em: <<http://trac.osgeo.org/postgis/wiki/WKTRaster/SpecificationWorking01>>. Acesso em: 28 abr. 2012.
- PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. **Weatherwise**, v. 21, p. 156-161, 1968.
- PASQUALI, L. Laboratório de Psicologia Ambiental — Environmental Psychology Research Group. **Análise descritiva de dados de pesquisa**, 2011. Disponível em: <<http://www.psi-ambiental.net/pdf/PasqCap02.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil, and grass**. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. London: A193. 1948. p. 120-146.
- PENMAN, H. L. Evaporation: An introductory survey. **Netherlands Journal Agric, Sci.**, 1956. 9-29; 87-97; 151-153.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. Evapotranspiração. **FEALQ**, Praticaba, 1997. 183.
- PIRES, R. C. D. M. et al. Tecnologia & Inovação Agropecuária On-line. **T&IA - Tecnologia & Inovação Agropecuária**, 2008. Disponível em: <http://www.dge.apta.sp.gov.br/publicacoes/t%26ia/T&IAv1n1/Revista_Apta_Artigo_Agricultura.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2012.
- PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (.). **Sensoriamento remoto - reflectância de alvos naturais**. Brasília: UnB / Embrapa Cerrados, 2001. p. 262.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Silva Vieira, 2007.
- PORTUGAL, S. M. **Notas introdutórias sobre o principio de máxima verossimilhança, estimação e teste de hipóteses**. UFRGS. [S.l.]. 2009.
- POSTGIS. PostGIS 2.0.0 Manual. **PostGIS 2.0.0 Manual**, 2012. Disponível em: <<http://postgis.refractor.net/docs/>>. Acesso em: 16 maio 2012.
- RACINE, P. PostGIS WKT Raster Tutorial 1 - Intersecting vector polygons with large raster coverage using PostGIS WKT Raster. **PostGIS-Geospatial Objects for PostgreSQL**, 2011. Disponível em: <<http://trac.osgeo.org/postgis/wiki/WKTRasterTutorial01>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

RESEARCH, R. Refractions Research: Home. **Refractions Research**, 2008. Disponível em: <<http://www.refractions.net/>>. Acesso em: 16 maio 2012.

RITCHIE, J. T.; BURNETT, E.; HENDERSON, R. C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. 3. Soil water influences. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 168-173, 1972.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos; normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133 - 137, 1998.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: _____ **Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**. Washington: [s.n.], v. 1, 1973. Cap. Sec A, p. 309-317.

SALAMONI, A. T. **Apostila de aulas teóricas de Fisiologia Vegetal**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2008.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SATÉLITE-EMBRAPA, M. P. Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Ambiental. **AQUA - Aqua Project Science**, 2007. Disponível em: <<http://www.sat.cnpem.embrapa.br/conteudo/aqua.htm>>. Acesso em: 6 jan 2012.

SEGER/LAIME/CSC-INMET. **Nota técnica nº001/2011**. Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília, p. 11. 2011.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. LCE 306 – Meteorologia Agrícola. **Radiação Solar**, 2009. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula5.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2012.

SHIKI, S.; G. DA S., J.; ORTEGA, A. C. Agricultura, meio ambiente e sustentabilidade do cerrado brasileiro. Uberlândia: EDUFU, 1997. p. 135-167.

SHIKI, S.; GRAZIANO DA SILVA, J.; ORTEGA, A. C. Agricultura, meio ambiente e sustentabilidade do cerrado brasileiro. Uberlândia: EDUFU, 1997. p. 135-167.

SIBCS. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **EMBRAPA-CNPS**, 2005. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/sibcs/>>. Acesso em: 6 jan. 2012.

SILVA, B. B. D.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, SP, v. 14, p. 1-10, 2006.

SILVA, B. B. D.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SINCLAIR, T. R.; LUDLOW, M. M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Australian Journal Plant Physiology**, v. 13, p. 329-341, 1986.

SNEATH, P. H. A. The application of computer to taxonomy. **Journal of General Microbiology**, n. 17, p. 201-226, 1957.

SOBRINHO, J. E. et al. Determinação dos ângulos das relações Terra-Sol para fins de orientação de pomares e poda de árvores em Mossoró-RN. **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Aracaju, 2 jul. 2007. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/159183/1/OPB1311.pdf>.

STRAHLER, A. MODIS Website-Algorithms. **MODIS Land Cover Product Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) versão 5**, 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.

STRAHLER, A. H.;MULLER, J- P.;LUCH, W.; SCHAAF, C. B.; TSANG, T.; GAO, F.;LI, X.;LEWIS, P.;BARNESLEY, M. J. MODIS BRDF / Albedo Product-Algorithm Theoretical Basis Document Version 5. **MODIS Website**, p. 53, 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.

SUTCLIFFE, J. F. **As plantas e a água**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1980.

TEAM, L. D. Get Data | LP DAAC : ASTER and MODIS Land Data Products and Services. **USGS-LPDAAC**, 2008. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/get_data>. Acesso em: 17 maio 2012.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, janeiro 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in climatology**, New Jersey, 1955. 104.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the comite on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. **Transactions of the American Geophysical Unio**, Washington, DC, p. 686-693, 1944.

TIMM, N. H. Applied Multivariate Analysis, New York: Springer, 2002.

UFPR. Tabelas estatísticas, 2006. Disponível em: <[people.ufpr.br/~prbg/public_html/ce050/tabelas 1.pdf](http://people.ufpr.br/~prbg/public_html/ce050/tabelas%201.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2012.

USGS-MRT. MODIS REPROJECTION TOOL. **Land Processes DAAC-USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center**, n. 4.1, p. 69, APRIL 2011. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/content/./mrt41_usermanual_032811.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2012.

VAISALA. **CM6B & CM11 Pyranometers**. Vaisala. [S.l.], p. 2, <http://www.hobeco.net/pdf/CM6B&CM11.pdf>. 2001.

VAISALA. **Vaisala MAWS301: Automatic Weather Station**. Vaisala. www.vaisala.com. Finlândia, p. 8. 2001.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Versão digital. ed. Recife: [s.n.], 2006.

VENTURIERI, A. **Apostila de Curso de Introdução às técnicas de Sensoriamento Remoto**. UFPA. Belem, p. 84. 2007.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 1. ed. Viçosa: UFV - Universidade Federal de Viçosa , 1991.

VIEIRA, L. . P. F. J. **Meteorologia e Climatologia agrícola**. Universidade Estadual de Maringá, Campus do Arenito. Cidade Gaúcha. 2009.

WAGNER, E. **in**: GOEDERT, W.J. Desenvolvimento da região dos cerrados. Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. ed. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1986. 19-31 p.

WAN, Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). **Modis Website Algorithm**, 1999. ISSN ISO-8859-1. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.

ZARCO-TEJADA, P. J.; USTIN, S. L. Estimation of Vegetation Water Content with MODIS data and Radiative. **CSIC ABIERTO**, Espanha, v. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/10628/1/28.pdf>, p. 6, jan 2010. Disponível em: <<http://digital.csic.es/bitstream/10261/10628/1/28.pdf>>. Acesso em: 21 fev 2012.