

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE GEOTECNOLOGIAS EM MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE
SOJA NO ESTADO DO PARANÁ**

JONATHAN RICHETTI

CASCAVEL – 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DE GEOTECNOLOGIAS EM MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE
SOJA NO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação submetida à banca examinadora para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração de Sistema Biológicos e Agroindustriais, com Matemática Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão.

Orientador: Prof. Dr. Jerry Adrian Johann
Co-Orientador: Prof.Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

CASCADEL – 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

R391u

Richetti, Jonathan

Uso de geotecnologias em modelos de estimativa de produtividade de soja no Estado do Paraná./Jonathan Richetti. Cascavel, 2015.

114 p.

Orientadora: Prof. Dr. Jerry Adrian Johann

Coorientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

1. Modelo agrometereológico espectral. 2. Sensoriamento remoto. 3. EVI.
I. Johann, Jerry Adrian. II. Opazo, Miguel Angel Uribe. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

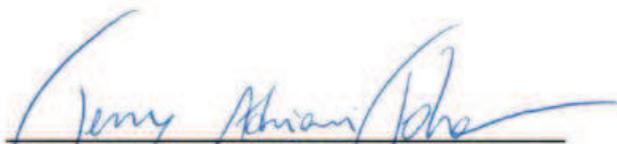
CDD 21.ed. 621.3678

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

JONATHAN RICHETTI

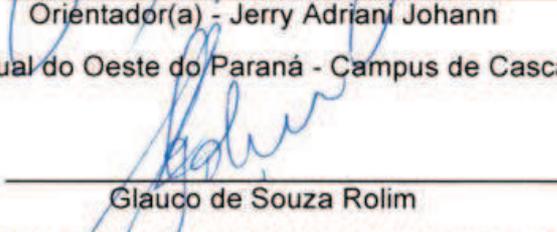
Uso de geotecnologias em modelos de estimativa de produtividade de soja no Estado do Paraná

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas biológicos e agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, estatística espacial e agricultura de precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Jerry Adrian Johann

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Glauco de Souza Rolim

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp (UNESP)



Erivelto Mercante

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 13 de fevereiro de 2015

BIOGRAFIA

Jonathan Richetti, nascido em 26 de janeiro de 1990, natural do município de Cascavel, no Paraná, cursou o ensino fundamental e médio no Colégio Nossa Senhora Auxiliadora, finalizando o ensino médio em 2007. É graduado Engenheiro Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná com Menção Honrosa pela 3ª Colocação Geral entre os Formandos 2012. Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola no ano de 2013 finalizando o mestrado em 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação de mestrado a minha querida e amável esposa, Amanda Bordin Richetti, que sempre esteve ao meu lado, apoiando-me, ajudando-me e dando real sentido a minha vida. Sem ela nada seria possível e nada teria sentido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

À minha esposa, Amanda Bordin Richetti, pelo amor e carinho;

Aos meus pais, Janio Richetti e Maria Aparecida Andriolo Richetti, pela educação desde pequeno;

Aos meus irmãos, Joelson Richetti e Julio Richetti, pela camaradagem;

Ao meu irmão de consideração Guilherme Ireneu Venson, pela amizade de longa data;

A todos os meus verdadeiros amigos que de uma forma ou outra prestaram sua amizade;

A todos os colegas do Laboratório de Estatística Aplicada (LEA), do Laboratório de Estatística Espacial (LEE) e do Laboratório de Geoprocessamento (GEOLAB) da UNIOESTE;

Aos professores doutores Jerry Adriani Johann e Miguel Angel Uribe Opazo, pelas orientações e a amizade;

À CAPES pelo apoio financeiro.

USO DE GEOTECNOLOGIAS EM MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE SOJA NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO: Buscando apresentar uma metodologia objetiva para estimar a produtividade de soja no estado do Paraná, o presente trabalho explorou três diferentes modelos para estimação da produtividade de soja. Um modelo agrometeorológico (modelo FAO), que apresentou quatro estimativas baseadas em dados agrometeorológicos provenientes de sensoriamento remoto (ECMWF) e dados observados a campo; um modelo espectral (modelo GLO-PEM2), que utilizou dados do sensor MODIS para estimar a produtividade de soja no estado; e, um modelo agro-espectral (modelo CASA), que apresentou duas estimativas baseadas em dados agrometeorológicos e dados do sensor MODIS. O trabalho determinou o balanço hídrico e a evapotranspiração real por dois métodos (BHTM e BHFAO). Os dados do solo foram obtidos da EMBRAPA, os dados da cultura provenientes da FAO, as datas de semeadura e colheita foram determinadas por Becker (2013) e os dados agrometeorológicos foram obtidos do ECMWF. Os dados espectrais utilizados foram obtidos do sensor MODIS, plataformas Terra e Aqua. O modelo GLO-PEM2 mostrou-se bastante fraco e deve ser investigado mais profundamente, os modelos CASA e FAO apresentaram bons resultados, superestimando levemente a produtividade, quando comparados com dados oficiais. Logo, o trabalho apresentou uma metodologia objetiva para a estimação da produtividade de soja para o estado do Paraná.

PALAVRAS-CHAVES: modelo agrometeorológico espectral, sensoriamento remoto, EVI.

USE OF GEOTECHNOLOGY ON ESTIMATING MODELS OF SOYBEAN CROP YIELD IN THE STATE OF PARANÁ, BRAZIL

ABSTRACT: In order to propose an objective methodology to estimate soybean crop yield in Western Paraná, the present research explored three different models for estimating soybean crop yield. One agrometeorological model (FAO model), presented four estimates based on agrometeorological data from remote sensing (ECMWF) and data collected in loco; one spectral model (GLO-PEM2 model), which used data from a MODIS sensor to estimate soybean crop yield in the state; and one agro-spectral model (CASA model), which presented two estimates, based in agrometeorological data and MODIS sensor data. The present work determined water balance and real evapotranspiration through two methods (BHTM and BHFAO). The soil data was collected from EMBRAPA, the culture's was from FAO, the dates of planting and harvest were determined by Becker (2013) and the agrometeorological data was obtained from ECMWF. The spectral data utilized was provided by the MODIS sensor, namely Terra and Aqua platforms. The GLO-PEM2 proved to be rather weak and requires further investigation; the CASA and FAO models presented good results, lightly overestimating productivity, while compared to the official data. Therefore, this research presented an objective methodology for estimating soybean crop yeild in the state of Paraná.

KEYWORDS: agrometeorological spectral model, remote sensing, EVI.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xi
Lista de Figuras em Anexo	xiv
Lista de Figuras em Apêndice.....	xvi
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Soja	5
2.1.1 Estádio Fenológicos e exigências agrometeorológicas	7
2.1.2 Calendário Agrícola.....	9
2.3 Características Climáticas Paranaenses	12
2.3.1 Características de Temperatura	14
2.3.2 Características de Evapotranspiração	14
2.3.3 Características de Precipitação	15
2.4 Características de Solo e Relevo Paranaenses	16
2.5 Sensoriamento Remoto	18
2.5.1 Modelo ECMWF.....	18
2.5.2 Índices de Vegetação.....	20
2.6 Balanço Hídrico do Solo.....	20
2.7 Modelos de Estimativa de produtividade	21
2.7.1 Modelos Agrometeorológicos	23
2.7.2 Modelos Espectrais	25
2.7.3 Modelos Agro-espectrais.....	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1 Área em Estudo	28
3.2 Mapeamento e Determinação de Datas da Cultura.....	28
3.3 Determinação da CAD	29
3.4 Estimativa de Produtividade da Soja.....	31

3.5 Balanço Hídrico.....	32
3.5.1 Método do Esgotamento da FAO (BHFAO).....	33
3.5.2 Método de Thornthwaite e Mather (BHTM).....	35
3.6 Índice de Colheita Cc.....	37
3.7 Modelo Agrometeorológico	39
3.5 Modelo Espectral	43
3.6 Modelo Agro-espectral	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Balanços Hídricos	54
4.1.1 Balanço Hídrico pelo Método BHTM	54
4.1.2. Balanço Hídrico pelo Método BHFAO	58
4.2 Índice de Colheita Cc.....	62
4.3 Evapotranspiração Real (ET _a).....	46
4.4 NPP	67
4.3 Produtividade Atingível	70
4.3.1 Modelo Agrometeorológico.....	70
4.3.2 Modelo Espectral	73
4.3.3 Modelo Agro-espectral	73
5. CONCLUSÕES.....	77
6. REFERÊNCIAS	79
7. ANEXOS.....	84
7.1 Anexo A: Temperaturas Médias Mensais.....	84
7.2 Anexo B: Evapotranspiração Mensal	86
7.3 Anexo C: Precipitação Média Mensal.....	88
8. APÊNDICES	90
8.1. Apêndice A: Detalhamento Completo do Balanço Hídrico e ET _a	90
8.2 Apêndice B: Detalhamento Completo do Índice de Colheita Cc	104
8.3 Apêndice C: Detalhamento Completo do Modelo FAO.....	108
8.4 Apêndice D: Detalhamento Completo do Modelo GLO-PEM2.....	113
8.5 Apêndice E: Detalhamento Completo do Modelo CASA	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Capacidade de retenção de água no solo (CAD) para diferentes tipos de solo	30
Tabela 2. Dados de área (ha), data de semeadura, data de colheita e produtividade Yobs (kg ha ⁻¹) das propriedades monitoradas.	38
Tabela 3 Valores de referência para cultura da soja.	40
Tabela 4 Valores de referência ponderados por estágio fenológico das culturas de soja e milho.	40
Tabela 5 Produtos MODIS utilizados para o modelo espectral GLO-PEM2.	43
Tabela 6 Padronização de datas do sensor com os decêndios utilizados.	43
Tabela 7 Produtos MODIS utilizados para o modelo CASA.	45
Tabela 8. Índices de colheita (Cc) e produtividade potencial (Yx) estimados para cada ano e valor de produtividade observada (Yobs) obtida a campo.	63
Tabela 9. Produtividades estimadas e a diferença entre a produtividade observada - Yobs (kg ha ⁻¹) e as produtividades atingíveis estimadas – Ya (kg ha ⁻¹) pelos métodos propostos por BHFAO - Allen et al. (1998) e BHTM - Thornthwaite e Mather (1955).	65
Tabela 10. P-valores para os testes T-Student para comparação de médias de amostras independentes, entre Yobs vs Ya BHFAO; Yobs vs Ya BHTM e Ya BHFAO vs Ya BHTM.	66
Tabela 11 Produtividades atingíveis (Ya) estimadas pelos modelos e produtividade oficial para o estado para o ano-safra 2011-2012.	75
Tabela 12 Estatísticas de produtividade de soja entre os dados oficiais (CONAB, 2013) e os valores estimados dos modelos.	76
Tabela 13 Produções estimadas pelos modelos e produção oficial para o estado.	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Média de produção de soja de 1961 a 2013. Adaptado de: FAOSTAT (2014).	5
Figura 2 Produção de soja brasileira e paranaense, CONAB (2009 e 2013).	6
Figura 3 Área cultivada com soja no Brasil e no Paraná, CONAB (2009 e 2013).	6
Figura 4 Área e Produção Brasileira de soja entre 1961 e 2013 (FAOSTAT, 2014).	7
Figura 5 Estádios fenológicos da soja e sua duração média: Estabelecimento, Vegetativo, Enchimento de Grãos e Senescência. (ALLEN et al., 1998).	8
Figura 6 Valores de k_c para uma cultura qualquer em todos os seus estádios. Adaptado de: (STEDUTO et al., 2012).	9
Figura 7 Zoneamento da Cultura da Soja para os Grupos 1, 2 e 3 no Solo 1 (IAPAR, 2013).	10
Figura 8 Zoneamento da Cultura da Soja para o Grupo 1 no Solo 2 (IAPAR, 2013).	10
Figura 9 Zoneamento da Cultura da Soja para o Grupo 1 no Solo 3 (IAPAR, 2013).	11
Figura 10 Zoneamento da Cultura da Soja para os Grupos 2 e 3 no Solo 2 (IAPAR, 2013).	11
Figura 11 Zoneamento da Cultura da Soja para os Grupos 2 e 3 no Solo 3 (IAPAR, 2013).	12
Figura 12 Mapa do clima do Köppen-Geiger para o estado do Paraná. (Adaptado de Kottek et al., 2006).	13
Figura 13 Classificação climática paranaense segundo Köppen (IAPAR, 2000).	13
Figura 14 Temperatura Média Anual para o estado do Paraná (IAPAR, 2000).	14
Figura 15 Evapotranspiração Anual Média para o estado do Paraná (IAPAR, 2000).	15
Figura 16 Precipitação Média Anual para o estado do Paraná (IAPAR, 2000).	16
Figura 17 Tipos de Solo do Estado do Paraná. Adaptado de EMBRAPA (2009, 2011).	16
Figura 18 Modelo Digital do Terreno Paranaense. (Valeriano, 2004).	18
Figura 19 Distribuição espacial das Estações Virtuais do ECMWF.	19
Figura 20 Balanço hídrico do Solo. Adaptado de Steduto et al. (2012).	21
Figura 21 Mapa de localização dos 399 municípios e das 10 mesorregiões do estado do Paraná.	28
Figura 22 Perfil temporal do índice de vegetação EVI de culturas agrícolas.	29
Figura 23 Área de soja para o ano safra 2011/2012. Adaptado de (SOUZA et al., 2015)	29
Figura 24 Valores de CAD (mm) para o estado do Paraná.	30
Figura 25 Fluxograma geral do trabalho.	31
Figura 26 Distribuição espacial das EV (Estações Virtuais) do ECMWF.	32
Figura 27. Fluxograma do Método do Esgotamento da FAO (BHFAO).	35
Figura 28 Fluxograma do método do Thornthwaite e Mather (BHTM).	37
Figura 29. Propriedades agrícolas monitoradas para a calibração do índice de colheita (Cc) no Estado do Paraná.	38

Figura 30. Fluxograma para a calibração do índice de colheita (C_c) considerando os balanços hídricos obtidos pelos métodos propostos por: (BHFAO) por Allen et al. (1998); (BHTM) por Thorthwaite e Mather (1955).....	39
Figura 31 Profundidade de raízes (Z_r) e coeficiente da cultura (K_c) de soja e milho durante o ciclo das culturas.....	40
Figura 32 Fluxograma geral do modelo FAO.	41
Figura 33 Perfil Temporal de EVI. Fonte: Adaptado de Johann (2012).	42
Figura 34 Fluxograma geral do modelo GLO-PEM2.	44
Figura 35 Fluxograma geral do modelo CASA.	45
Figura 36 Valores de ET_a pelo BHFAO do 3º decêndio de Setembro de 2011 ao 2º decêndio de Novembro de 2011.....	47
Figura 37 Valores de ET_a pelo BHFAO do 3º decêndio de Novembro de 2011 ao 2º decêndio de Janeiro de 2012.	48
Figura 38 Valores de ET_a pelo BHFAO do 3º decêndio de Janeiro de 2012 ao 2º decêndio de Março de 2012.	49
Figura 39 Valores de ET_a pelo BHFAO do 3º decêndio de Março de 2012 ao 1º decêndio de Abril de 2012.....	50
Figura 40 Valores de ET_a pelo BHTM do 3º decêndio de Setembro de 2011 ao 2º decêndio de Novembro de 2011.....	51
Figura 41 Valores de ET_a pelo BHTM do 3º decêndio de Novembro de 2011 ao 2º decêndio de Janeiro de 2012.	52
Figura 42 Valores de ET_a pelo BHTM do 3º decêndio de Janeiro de 2012 ao 2º decêndio de Março de 2012.	53
Figura 43 Valores de ET_a pelo BHTM do 3º decêndio de Março de 2012 ao 1º decêndio de Abril de 2012.....	54
Figura 44 Balanço Hídrico pelo BHTM (mm), do 3º decêndio de Setembro ao 2º decêndio de Novembro de 2011, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	55
Figura 45 Balanço Hídrico pelo BHTM (mm), do 3º decêndio de Novembro ao 2º decêndio de Janeiro de 2011, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	56
Figura 46 Balanço Hídrico pelo BHTM (mm), do 3º decêndio de Janeiro ao 2º decêndio de Março de 2012, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	57
Figura 47 Balanço Hídrico pelo BHTM (mm), do 3º decêndio de Março e o 1º decêndio de Abril de 2012, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	58

Figura 48 Balanço Hídrico pelo BHFAO (mm), do 3º decêndio de Setembro ao 2º decêndio de Novembro de 2011, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	59
Figura 49 Balanço Hídrico pelo BHFAO (mm), do 3º decêndio de Novembro ao 2º decêndio de Janeiro de 2011, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	60
Figura 50 Balanço Hídrico pelo BHFAO (mm), do 3º decêndio de Janeiro ao 2º decêndio de Março de 2012, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	61
Figura 51 Balanço Hídrico pelo BHFAO (mm), do 3º decêndio de Março e o 1º decêndio de Abril de 2012, em que valores positivos são excedentes hídricos e valores negativos são déficits hídricos.....	62
Figura 52. Relação entre a produtividade observada (Yobs) e o índice de colheita Cc BHFAO utilizando o método proposto por Allen et al. (1998).....	64
Figura 53. Relação entre a produtividade observada (Yobs) e o índice de colheita Cc BHTM utilizando o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955).....	64
Figura 54. Relação entre os índices de colheita Cc utilizando os métodos propostos por: BHFAO - Allen et al, (1998); BHTM - Thornthwaite e Mather (1955).	65
Figura 55 NPP do modelo CASA (BHFAO).....	67
Figura 56 NPP do modelo CASA (BHTM).....	68
Figura 57 NPP do modelo GLO-PEM2.	69
Figura 58. Produtividade atingível (Ya) pelo modelo FAO, método BHFAO com C_{CBHFAO}	70
Figura 59. Produtividade atingível (Ya) pelo modelo FAO, método BHFAO com $C_{Cmédio}$	71
Figura 60. Produtividade atingível (Ya) pelo modelo FAO, método BHTM com C_{CBHTM}	71
Figura 61. Produtividade atingível (Ya) pelo modelo FAO, método BHTM com $C_{Cmédio}$	72
Figura 62 Produtividade atingível (Ya) pelo modelo GLO-PEM2.....	73
Figura 63 Produtividade atingível (Ya) pelo modelo CASA, método BHFAO.	74
Figura 64 Produtividade atingível (Ya) pelo modelo CASA, método BHTM.....	75

LISTA DE FIGURAS EM ANEXO

Figura 1 Temperatura Média no mês de Janeiro para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000).	84
Figura 2 Temperatura Média no mês de Fevereiro para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000)	84
Figura 3 Temperatura Média no mês de Março para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000) ...	84
Figura 4 Temperatura Média no mês de Abril para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000).....	84
Figura 5 Temperatura Média no mês de Maio para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000)	84
Figura 6 Temperatura Média no mês de Junho para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000) ...	84
Figura 7 Temperatura Média no mês de Julho para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000)	85
Figura 8 Temperatura Média no mês de Agosto para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000)..	85
Figura 9 Temperatura Média no mês de Setembro para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000).....	85
Figura 10 Temperatura Média no mês de Outubro para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000).....	85
Figura 11 Temperatura Média no mês de Novembro para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000).....	85
Figura 12 Temperatura Média no mês de Dezembro para o estado do Paraná. (IAPAR, 2000).....	85
Figura 13 Evapotranspiração Diária para o mês de Janeiro. (IAPAR, 2000)	86
Figura 14 Evapotranspiração Diária para o mês de Fevereiro. (IAPAR, 2000).....	86
Figura 15 Evapotranspiração Diária para o mês de Março. (IAPAR, 2000).....	86
Figura 16 Evapotranspiração Diária para o mês de Abril. (IAPAR, 2000).....	86
Figura 17 Evapotranspiração Diária para o mês de Maio. (IAPAR, 2000)	86
Figura 18 Evapotranspiração Diária para o mês de Junho. (IAPAR, 2000)	86
Figura 19 Evapotranspiração Diária para o mês de Julho. (IAPAR, 2000)	86
Figura 20 Evapotranspiração Diária para o mês de Agosto. (IAPAR, 2000).....	87
Figura 21 Evapotranspiração Diária para o mês de Setembro. (IAPAR, 2000)	87
Figura 22 Evapotranspiração Diária para o mês de Outubro. (IAPAR, 2000).....	87
Figura 23 Evapotranspiração Diária para o mês de Novembro. (IAPAR, 2000)	87
Figura 24 Evapotranspiração Diária para o mês de Dezembro. (IAPAR, 2000)	87
Figura 25 Precipitação Média para o mês de Janeiro. (IAPAR, 2000).....	88
Figura 26 Precipitação Média para o mês de Fevereiro. (IAPAR, 2000)	88
Figura 27 Precipitação Média para o mês de Março. (IAPAR, 2000)	88
Figura 28 Precipitação Média para o mês de Abril. (IAPAR, 2000)	88
Figura 29 Precipitação Média para o mês de Maio. (IAPAR, 2000).....	88
Figura 30 Precipitação Média para o mês de Junho. (IAPAR, 2000).....	88

Figura 31 Precipitação Média para o mês de Julho. (IAPAR, 2000).....	89
Figura 32 Precipitação Média para o mês de Agosto. (IAPAR, 2000)	89
Figura 33 Precipitação Média para o mês de Setembro. (IAPAR, 2000).....	89
Figura 34 Precipitação Média para o mês de Outubro. (IAPAR, 2000)	89
Figura 35 Precipitação Média para o mês de Novembro. (IAPAR, 2000).....	89
Figura 36 Precipitação Média para o mês de Dezembro. (IAPAR, 2000).....	89

LISTA DE FIGURAS EM APÊNDICE

Figura 1 Área de abrangência de cada estação virtual do ECMWF (quadriculado identificado com o centroide numerado) e decêndios de semeadura (em vermelho) e colheita (em verde) para cada município.....	91
Figura 2 Datas de semeadura e colheita para cada estação virtual (EV) para cada do ECMWF sobre o Paraná.	91
Figura 3 Dados de evapotranspiração de referência (ET_0) em mm, para cada estação virtual (EV) do ECMWF sobre o Paraná.	92
Figura 4 Dados de precipitação pluvial, em mm, para cada estação virtual (EV) do ECMWF sobre o Paraná.....	93
Figura 5 Dados de entrada para cálculo do balanço hídrico de cada estação virtual (EV) do ECMWF sobre o Paraná.	94
Figura 6 Balanço hídrico obtido pelo método proposto por Allen et al. (1998) – BHFAO, calculado para cada estação virtual (EV) do ECMWF sobre o Paraná.	95
Figura 7 Balanço hídrico obtido pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) – BHTM, calculado para cada estação virtual (EV) do ECMWF sobre o Paraná.	96
Figura 8 Detalhe da planilha com os valores de Y_m e C_c pelo modelo FAO, BHTM e BHFAO.	105
Figura 9 Detalhe da planilha com os valores de Y_a para o modelo FAO, BHTM e BHFAO.	106
Figura 10 Resumo das propriedades, anos-safras, produtividades e valores do índice C_c .	107
Figura 11 Quatro estimativas da Produtividade atingível com o modelo FAO.	108
Figura 12 Detalhe na abertura dos valores no ArcGis 10.2.....	111
Figura 13 Detalhe da interpolação por IDW das produtividades.....	112
Figura 14 Multiplicação do mapa de Y_a interpolado (a) pela máscara (b) resultando no mapa de produtividade atingível de soja (c).	112

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
- ECMWF – *European Center for Medium-Range Weather Forecast*
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- GPS – Sistemas de Posicionamento Global
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- MARS – *Monitoring Agriculture with Remote Sensing*
- MCYFS – *Mars Crop Yield Forecasting Systems*
- MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
- JRC – *Joint Research Center*
- SIG – Sistemas de Informações Geográficas
- SEAB – Secretaria de Agricultura e Abastecimento
- FAO – *Food and Agricultural Organization*
- SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*
- NASA – National Aeronautics and Space Administration
- NIMA – *National Imagery and Mapping Agency*
- DOD – *Department of Defense*
- ITCG – Instituto de Terras Cartografia e Geociências

1. INTRODUÇÃO

As duas principais *commodities* agrícolas do Brasil e do estado do Paraná são: a soja e o milho. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás dos EUA. A produção brasileira de soja, no ano agrícola 2012/13, foi de 81,28 milhões de toneladas, superando em 22,4% a safra anterior, de 2011/12. O Paraná foi responsável por 19,5% da produção brasileira numa área plantada de 27,72 milhões de hectares. A produtividade média da soja brasileira foi de 2,93 t ha⁻¹ superior 10% à da safra anterior. O Paraná teve a segunda maior produtividade brasileira de soja (3,34 t ha⁻¹), numa área de 4,75 milhões de hectares (CONAB, 2013).

A cultura da soja, em função da sua alta representatividade para o agronegócio nacional, necessita de tecnologias capazes de monitorar grandes áreas com alta eficiência. Em função das dimensões continentais do Brasil, há necessidade de uso de técnicas que possibilitem um monitoramento em larga escala. Diversas pesquisas (JOHANN, 2012; ADRIANE et al., 2007; FONTANA et al., 2001) têm demonstrado que o uso de imagens de satélite de índices de vegetação possibilitam a realização de estimativas de produtividade de soja. Sendo assim, as geotecnologias vêm proporcionando uma melhor gestão das informações ao se utilizarem de ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) e Sistemas Global de Navegação por Satélite (GNSS) (RIZZI; THEODOR, 2007)

Para tais estimativas, além de imagens de satélites, é necessária a obtenção de dados agrometeorológicos, já que, o principal fator na produção de qualquer cultura é a disponibilidade hídrica. Normalmente utilizam-se dados de superfície proveniente de estações meteorológicas. Porém, os órgãos responsáveis pela coleta e a organização destes dados não os disponibilizam aos usuários em tempo real, numa quantidade (séries históricas) e formato, que possam ser utilizados para análises espaciais (JOHANN, 2012). Uma fonte alternativa para a obtenção de informações de dados agrometeorológicos tem sido o modelo ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*, 2010) que apresenta a possibilidade de obtenção de dados globais e com distribuição gratuita na web.

Trabalhos apresentam resultados promissores para estimativas de safras, como Araújo et al. (2005), que estimaram a produtividade e determinaram zonas de manejo em culturas de grãos. Já Krüger et al. (2007), Rizzi et al. (2005) estimaram a produtividade de grãos da soja no Rio Grande do Sul usando um modelo agrometeorológico-espectral. No Paraná, Coral et al.(2005), Berka et al. (2003) e Johann (2012) estimaram a produtividade da cultura da soja no estado por meio de modelos agrometeorológicos.

Rojas et al. (2005) utilizaram o modelo FAO para estimativa e previsão de milho para a África oriental, prevendo com sucesso a crise de produção da Etiópia e Eritreia quatro meses antes da imprensa internacional. Os pesquisadores concluíram que, apesar

de terem estimado safras de milho, é possível estimar quaisquer outras culturas modificando os coeficientes de cultura.

O monitoramento da produção agrícola no Brasil é realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Estes órgãos oficiais estabelecem suas estimativas através de entrevistas com produtores e cooperativas agrícolas, dados de financiamento agrícola, entre outras fontes. Em função do caráter subjetivo e demorado deste tipo de estimativa, não é possível uma análise quantitativa dos erros envolvidos. Outra limitação é a falta de informação quanto à distribuição espacial da produção, o que vem melhorando desde 2004, com a execução do projeto GeoSafras pela CONAB (JOHANN, 2012).

Neste sentido, existe demanda para melhoria destas estimativas de produção de soja e milho, especialmente, por metodologias mais objetivas, o que tem sido demonstrado que pode ser alcançado por pesquisas que utilizem dados de sensoriamento remoto. Isto representaria uma mudança significativa nas estimativas realizadas oficialmente, contribuindo desta forma, na melhoria do planejamento da cadeia produtiva do país, o que, por consequência, minimizaria as atuais especulações do mercado que normalmente ditam os preços dos produtos agrícolas.

Um exemplo de monitoramento de safras é realizado atualmente pelo *Mars Crop Yield Forecasting Systems* (MCYFS, Sistemas de Previsão de Safra MARS, *Monitoring Agriculture with Remote Sensing*) na Europa. Eles fornecem previsões científicas da produtividade das principais culturas em países da União Europeia (BARUTH et al., 2004).

Neste sentido, pretende-se verificar a possibilidade de adaptar um sistema de estimativa de produtividade de grãos para as condições do estado do Paraná.

1.1 Objetivos

O objetivo geral foi utilizar dados de imagens de satélite e modelos para realização de estimativa de produtividade da cultura de verão, soja, para o estado do Paraná.

Os objetivos específicos ficam elencados como sendo:

- Estimar a evapotranspiração real;
- Determinar o balanço hídrico para cultura da soja;
- Estimar a Produtividade Primária Líquida (NPP – *Net Primary Production*);
- Testar modelos: agrometeorológico, agro-espectral e espectral, para a cultura da soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A construção de modelos para a estimativa de produtividade de soja exige inicialmente o entendimento das fases fenológicas das culturas, bem como sua resposta às condições agrometeorológicas, buscando uma possível explicação matemática para a relação entre estes fatores. Normalmente, os modelos são separados em três categorias: os modelos agrometeorológicos, modelos agro-espectrais e modelos espectrais (GOMMES, 1998).

Segundo Gommès (1998), modelos agrometeorológicos se referem às técnicas que podem ser utilizadas para determinar os efeitos prováveis dos dados agrometeorológicos sobre a produtividade das culturas. Embora as incidências dos fatores agrometeorológicos, como precipitação e evapotranspiração, sobre a cultura estejam confirmadas, isto é, que tais fatores influenciam diretamente no desenvolvimento das culturas, a sua quantificação não é sempre direta, por exemplo: falhas nos dados.

Estudos mostram que modelos agrometeorológicos foram aplicados para o estado do Paraná na estimativa da produtividade de soja (BERKA et al., 2003; CORAL et al., 2005; ARAÚJO et al., 2011; JOHANN, 2012). Berka et al. (2003) aplicaram um modelo agrometeorológico em um SIG e concluíram que o modelo é uma ferramenta poderosa para analisar as variabilidades espaciais e temporais da cultura da soja. Coral et al. (2005) observaram que a disponibilidade hídrica é um fator limitante na produtividade da cultura da soja. Araújo et al. (2011) encontraram dificuldades nas estimativas, pois os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia não possibilitaram a obtenção de estimativas de produtividade estatisticamente satisfatórias com os modelos agrometeorológicos. Johann (2012) realizou estimativas de produtividade de soja, obtidas por meio dos modelos espectrais e modelos agro-espectrais, observando que o desempenho dos modelos melhoram com a inserção de dados agrometeorológicos.

Diversos trabalhos apresentam que o comportamento da planta durante o seu ciclo vegetativo, e também sua produtividade, podem ser sintetizados por um índice de vegetação (JACKSON et al., 1986; FONTANA et al., 2001; PRASAD et al., 2006; ADRIANE et al., 2007; REN et al., 2008). Segundo Mercante et al. (2011), o padrão espectral da soja na região oeste do estado mostra que o acompanhamento da safra por intermédio de índices de vegetação é possível. Sendo assim, os índices de vegetação podem ser utilizados para o desenvolvimento de modelos espectrais.

Os modelos agro-espectrais têm mostrado melhores resultados, pois se utilizam de dados agrometeorológicos e de índices de vegetação para estimativa da produtividade. Fontana e Berlato (1998), Krüger et al. (2007), Rizzi e Theodor (2007) estimaram a produtividade de soja no Rio Grande do Sul com modelos agro-espectrais.

2.1 A Cultura da Soja

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*) é uma planta herbácea, incluída na classe Dicotyledoneae, ordem Rosales, família Leguminosae, subfamília das Papilionoideae, gênero *Glycine L.* e é, atualmente, a cultura mais importante, economicamente, para o Brasil e também para o estado do Paraná.

A cultura da soja ocupa aproximadamente 50% da área total destinada à produção de grãos no mundo e ao longo dos últimos 50 anos, a produção mundial aumentou oito vezes, como resultado do aumento substancial da produtividade média e da expansão da área cultivada. Hoje, a maior parte da soja cultivada comercialmente é destinada para a alimentação animal e a humana, como um alimento rico em proteínas, a produção de óleo (para alimentação e uso industrial), entre outros (STEDUTO et al., 2012).

A soja tem sua origem na China, a partir de plantas rasteiras e selvagens encontradas ao longo do Rio Amarelo no leste asiático. A introdução da soja no Brasil se deu em 1882 via Estados Unidos pelo professor da Escola de Agronomia da Bahia Gustavo Dutra. Seu cultivo como grão rapidamente sufocou o outro foco da cultura até a sua extinção. Assim, a soja grão teve um crescimento exponencialmente tanto nos EUA quanto no Brasil e na Argentina. Historicamente o Brasil aparece como segundo maior produtor de soja do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos (Figura 1).

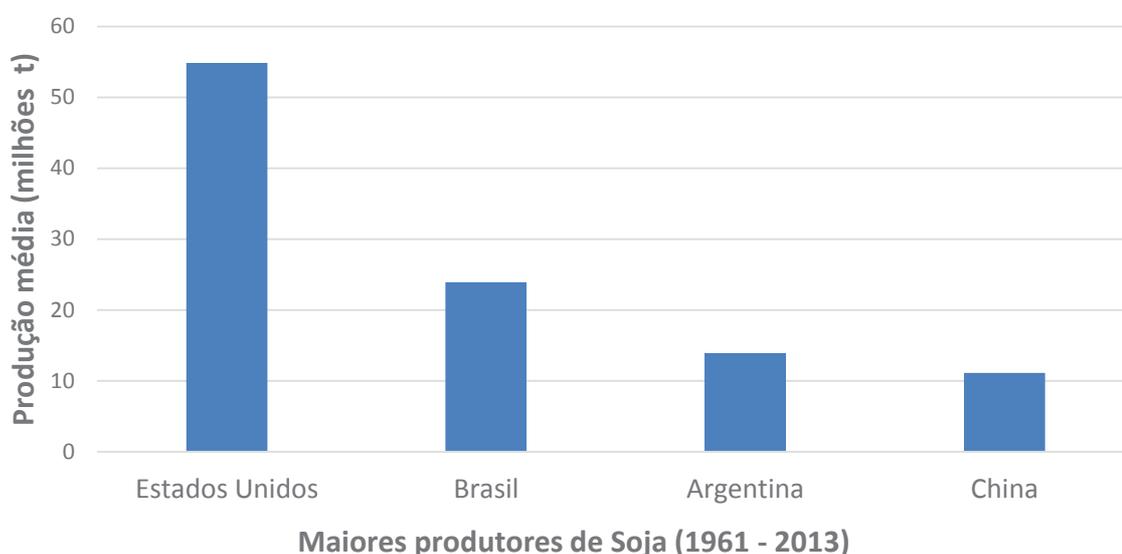


Figura 1 Média de produção de soja de 1961 a 2013. (Adaptado de FAOSTAT, 2014).

No ano de 2013 os EUA foram responsáveis por aproximadamente 32,37% da produção mundial, o Brasil por 29,56%, a Argentina por 17,84%. A China foi responsável por 4,52% da produção mundial (FAOSTAT, 2014). Assim, esses países são responsáveis por 84,29% da produção mundial, restando apenas 15,71% da produção de soja do mundo é dividida entre o resto do mundo.

A produção total de soja no ano safra 2012/13 no Brasil foi de 81.281,4 milhões de toneladas, enquanto no Paraná foi de 15.855,3 milhões de toneladas, a maior nos últimos quatro anos (CONAB, 2013) (Figura 2).

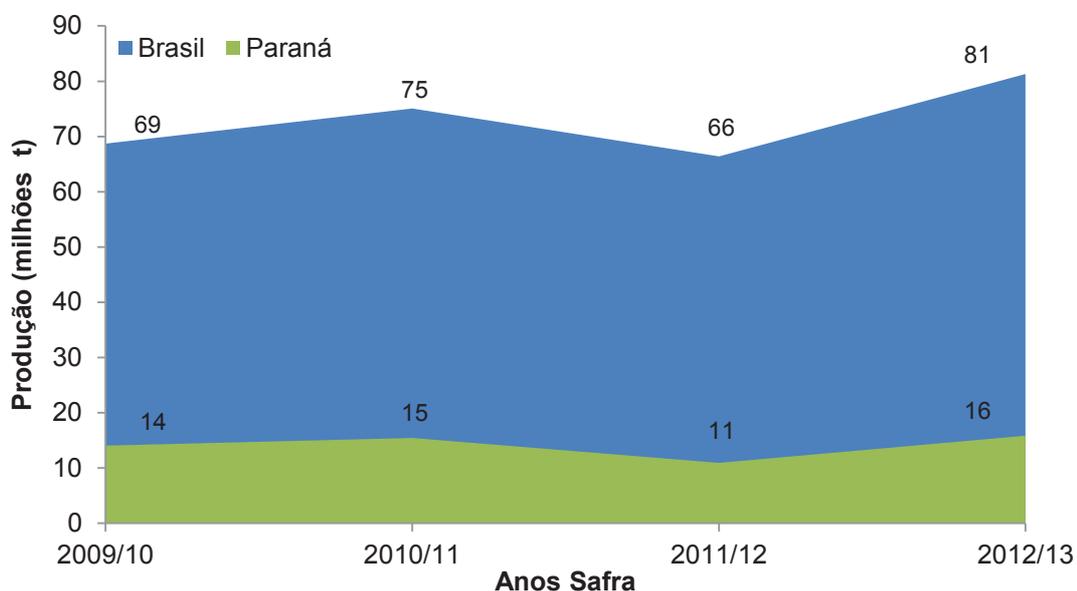


Figura 2 Produção de soja brasileira e paranaense, CONAB (2009 e 2013).

Observa-se que o Paraná no decorrer destes quatro anos apresentou uma pequena variação na área cultivada, enquanto o Brasil apresenta um crescimento constante em sua área cultivada, em função das novas fronteiras agrícolas nos estados do Mato Grosso, Tocantins e Piauí (Figura 3).

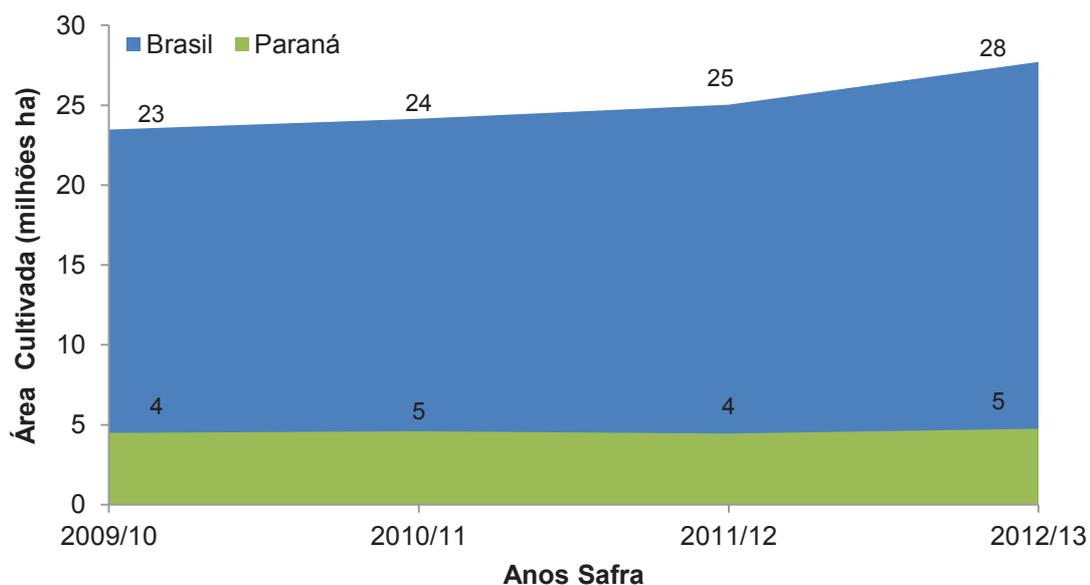


Figura 3 Área cultivada com soja no Brasil e no Paraná, CONAB (2009 e 2013).

Segundo a FAOSTAT (2014), a produção de soja apresentou um crescimento exponencial enquanto sua área apresenta um crescimento bastante elevado, porém menos expressivo (Figura 4). A área cultivada de soja desde o primeiro relatório, em 1961, até 2013, cresceu aproximadamente 115 vezes e a produção de soja cresceu aproximadamente 300 vezes.

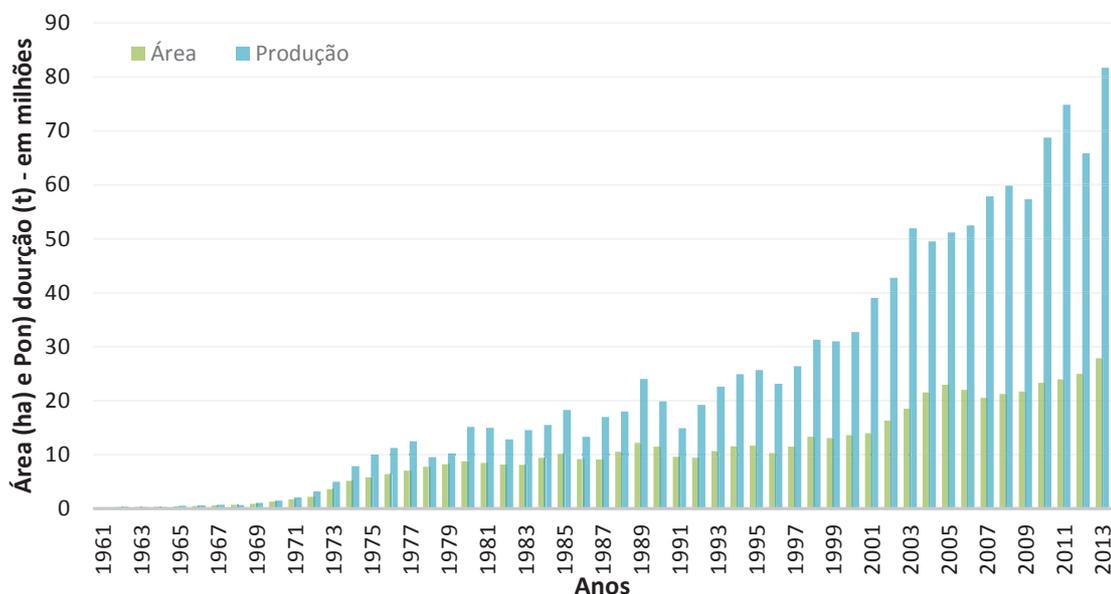


Figura 4 Área e Produção Brasileira de soja entre 1961 e 2013 (FAOSTAT, 2014).

2.1.1 Estádios Fenológicos e Exigência Climato-edáfica

A produtividade da soja é, como de todas as culturas, dependente de alguns fatores, desde a nutrição no solo às faixas de temperatura. Porém o grande fator de penalização para a produtividade é a restrição hídrica. Assim, a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD), juntamente com a precipitação e a necessidade da planta em cada estágio é de fundamental importância para a realização de estimativas de produtividade. Steduto et al.(2012) dividem a cultura em cinco estádios de desenvolvimento: estabelecimento, vegetativo, florescimento, enchimento dos grãos e senescência ou colheita (Figura 5).

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos. A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação e floração, ou seja, no estabelecimento e no enchimento dos grãos (FARIAS et al., 2007). Para relacionar as fases fenológicas da planta e sua necessidade de água, utiliza-se o coeficiente k_c (Figura 5 e Figura 6) das culturas, definido por Doorenbos e Kassam (1979), sendo que a evapotranspiração da cultura é a evapotranspiração potencial multiplicada por esse coeficiente. Logo, quando o valor de k_c é baixo, a cultura é menos suscetível ao

estresse hídrico e quando ele é elevado (estádio de florescimento e enchimento de grãos), a planta tem alta sensibilidade a falta de água. Esta variação de k_c de uma cultura qualquer e seus coeficientes k_c em todos os estádios da planta é observada em todas as culturas e apresentam uma linha de k_c semelhante (Figura 6).

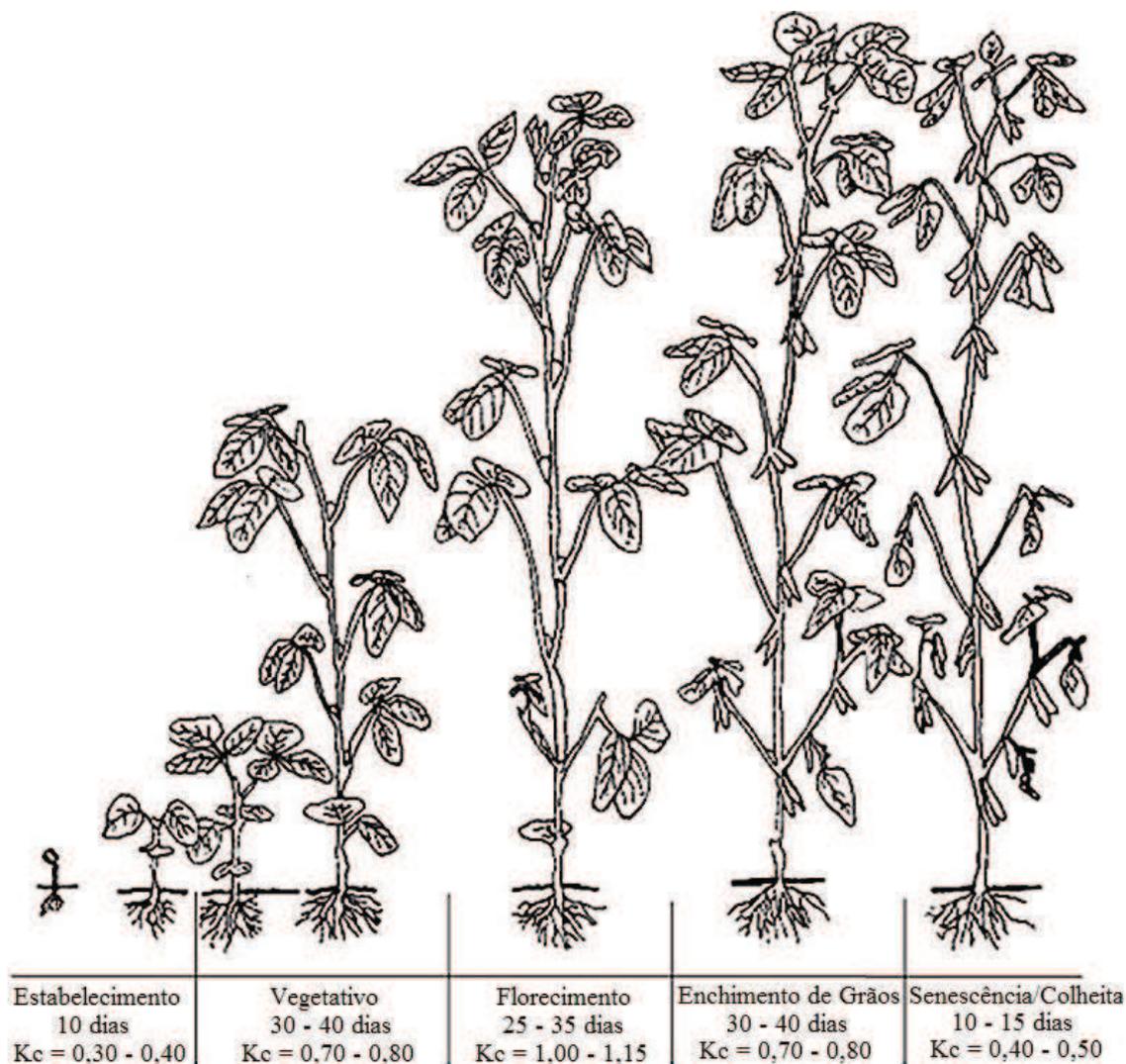


Figura 5 Estádios fenológicos da soja e sua duração média: Estabelecimento, Vegetativo, Enchimento de Grãos e Senescência. (ALLEN et al., 1998).

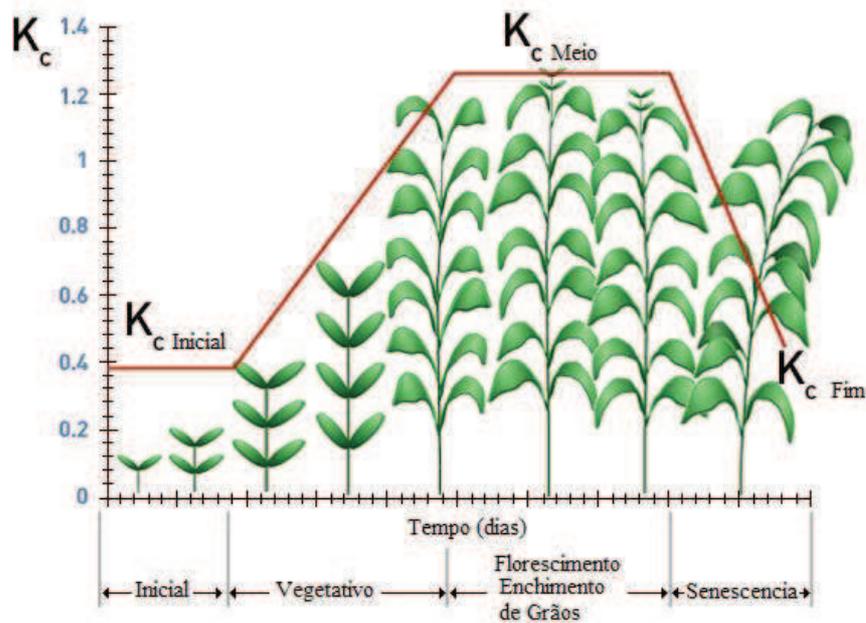


Figura 6 Valores de k_c para uma cultura qualquer em todos os seus estádios. Adaptado de: (STEDUTO et al., 2012).

2.1.2 Calendário Agrícola

As datas de semeadura são definidas de acordo com o clima da região. Assim, o Paraná apresenta diversas datas de semeadura, e a data de colheita é dependente do ciclo da cultura.

Segundo Steduto et al. (2012), existem três tipos de soja, quanto ao ciclo: as de curto período, entre 95 a 115 dias, bastante populares na Índia, Estados Unidos, China e Coreia; cultivares de ciclos médios, entre 120 e 140 dias comuns no nordeste chinês e no planalto de Loess – China. Ainda, as cultivares de ciclo longo são preferidas no Brasil e Argentina por possuírem uma produtividade 20% superior do que as demais cultivares. Contudo, Becker(2013) observou que, para o estado do Paraná, as cultivares com ciclos mais curtos são mais utilizadas.

Segundo o IAPAR (2013), faz-se o zoneamento agrícola dividindo-se em três grupos em três solos; os grupos são separados pelo ciclo da cultura e os solos pela sua CAD. O primeiro grupo (grupo 1) é para ciclos menores do que 115 dias, o segundo grupo (grupo 2) são culturas com ciclo entre 115 e 135 dias e o terceiro grupo (grupo 3) são culturas com ciclos superiores a 135 dias. O primeiro tipo de solo (solo 1) possui CAD de 30 mm, o segundo (solo 2) de 50 mm e o terceiro (solo 3) possui CAD de 75 mm. As recomendações de época de semeadura considerando os grupos de ciclos (curto, médio longo) e de solos (solos 1, 2 e 3) no estado do Paraná são apresentadas separadamente (Figura 7 a Figura 11).

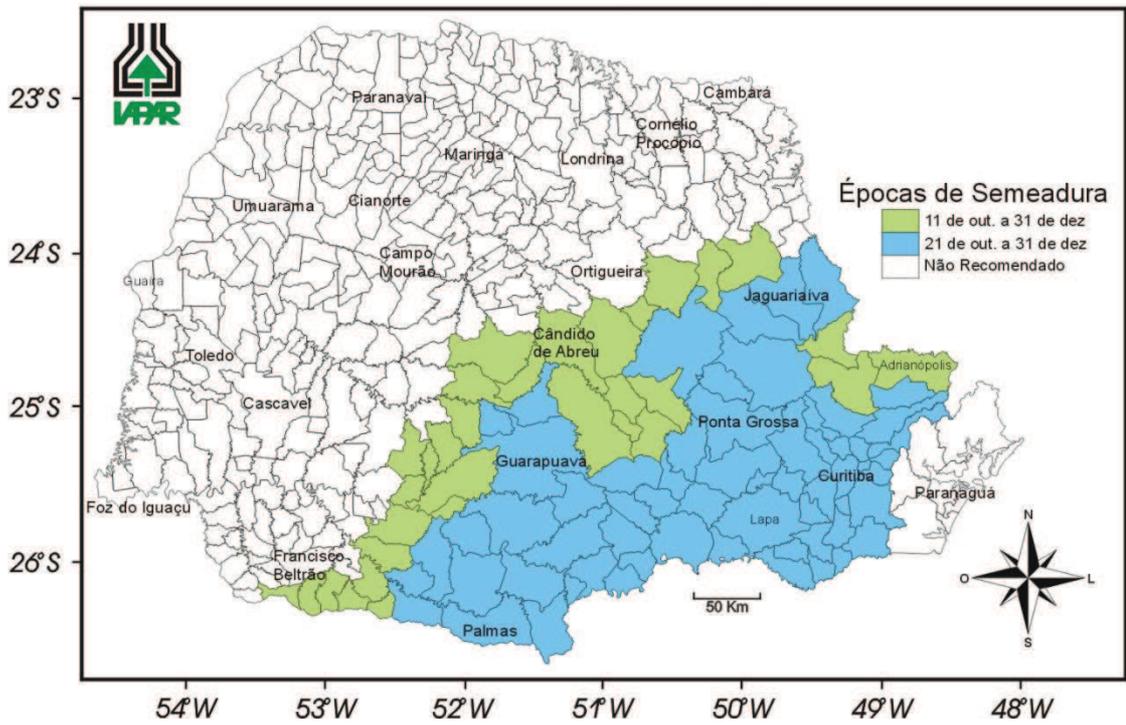


Figura 7 Zoneamento da Cultura da Soja para os Grupos 1, 2 e 3 no Solo 1 (IAPAR, 2013).

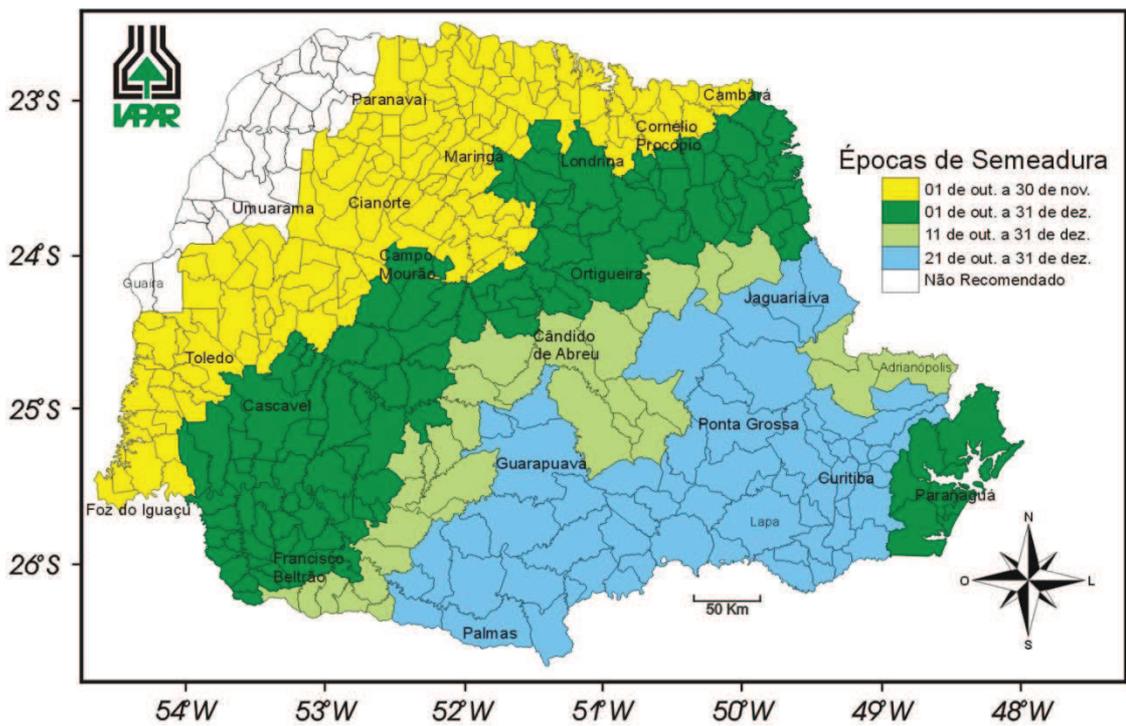


Figura 8 Zoneamento da Cultura da Soja para o Grupo 1 no Solo 2 (IAPAR, 2013).

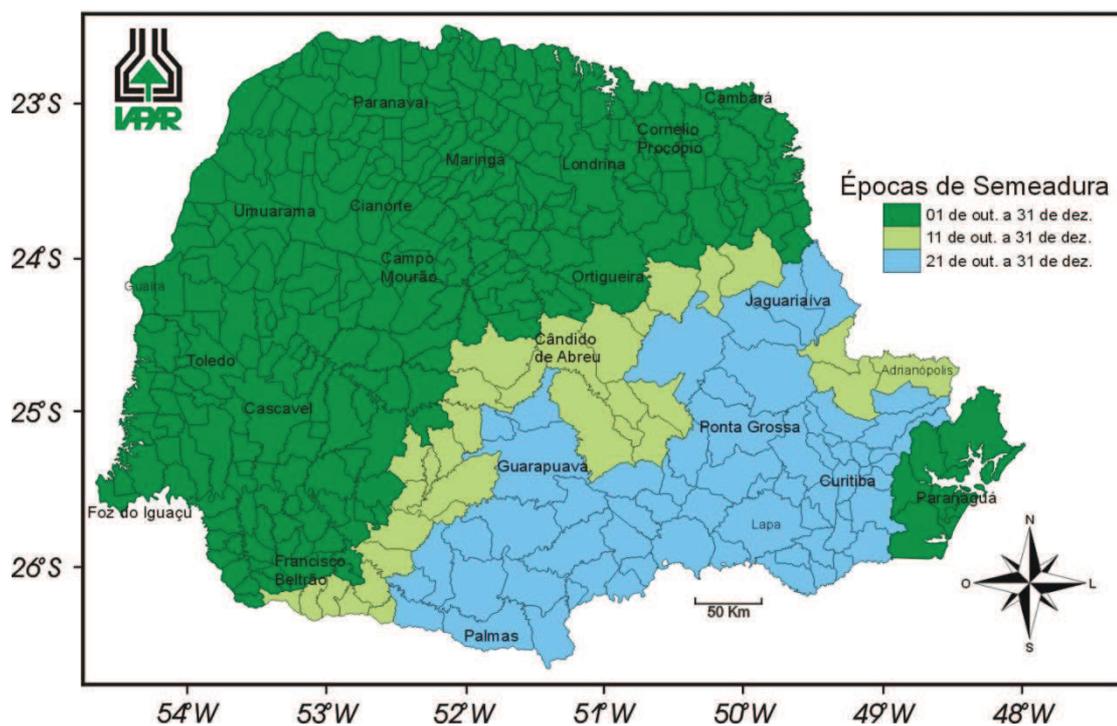


Figura 9 Zoneamento da Cultura da Soja para o Grupo 1 no Solo 3 (IAPAR, 2013).

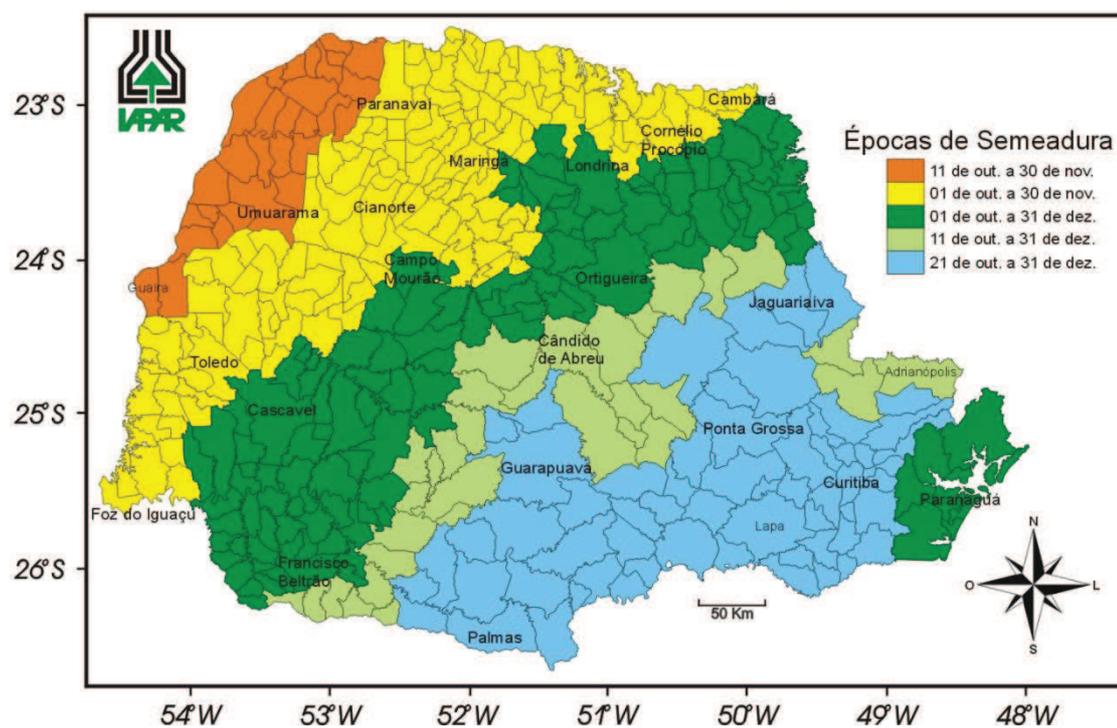


Figura 10 Zoneamento da Cultura da Soja para os Grupos 2 e 3 no Solo 2 (IAPAR, 2013).

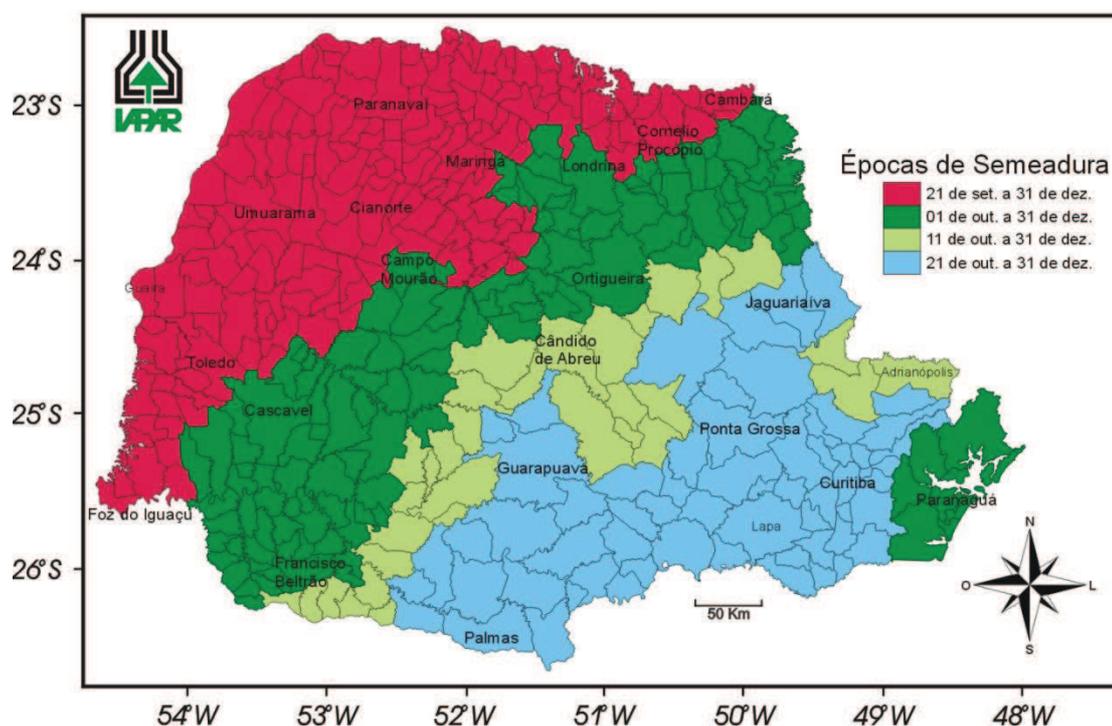


Figura 11 Zoneamento da Cultura da Soja para os Grupos 2 e 3 no Solo 3 (IAPAR, 2013).

2.3 Características Climáticas Paranaenses

A primeira classificação quantitativa do clima mundial foi apresentada por Wladimir Köppen em 1900, e foi atualizado por Rudolf Geiger em 1954 e 1961. Deixou-se, dessa forma, uma lacuna de mais quarenta anos entre as últimas atualizações e dados coletados (KOTTEK et al., 2006). Com o intuito de preencher essa lacuna, Kottek et al. (2006) apresentaram um mapa do mundo digital da classificação Köppen-Geiger, determinado com dados de precipitação e temperaturas atualizados. O resultado desta classificação mostra que o estado do Paraná tem quatro tipos climáticos: Am, Aw, Cfa e Cfb (Figura 12). A seguir, descreve-se o que cada um destes tipos climáticos representa.

O tipo climático Am apresenta precipitação total anual média superior a 1500 mm; precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm, com temperatura média do mês mais frio do ano superior a 18 °C (megatérmico). A estação de inverno é ausente, com forte precipitação anual (superior à evapotranspiração potencial anual).

O tipo Aw trata-se de um clima tropical com estação seca de inverno e chuvas de verão, com temperatura média do mês mais frio do ano superior a 18 °C (megatérmico) e estação de inverno ausente com forte precipitação anual (superior à evapotranspiração potencial anual).

O tipo Cfa é um clima subtropical; temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida.

O tipo Cfb é de clima temperado; temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida.

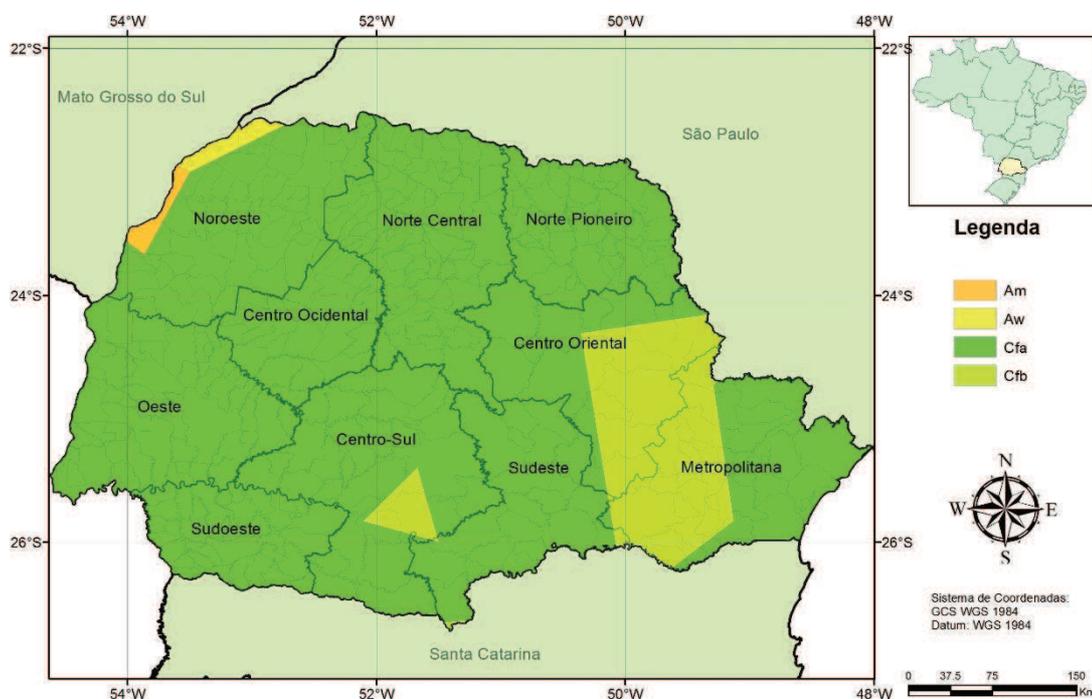


Figura 12 Mapa do clima do Köppen-Geiger para o estado do Paraná. (Adaptado de Kottek et al., 2006)

Já na classificação proposta pelo IAPAR (2000) são identificados apenas dois tipos climáticos: Cfa e Cfb (Figura 13).



Figura 13 Classificação climática paranaense segundo Köppen (IAPAR, 2000).

2.3.1 Características de Temperatura

Os processos biofísicos e bioquímicos que condicionam o metabolismo dos seres vivos e, portanto, seu desenvolvimento, são altamente afetados pelas condições energéticas do ambiente, mais especificamente do solo e da atmosfera. Pode-se dizer que todos os processos que condicionam o desenvolvimento e crescimento das plantas e animais têm a temperatura como um dos fatores fundamentais (IAPAR, 2000). Isto é devido ao fato de que a Evapotranspiração está diretamente relacionada com a temperatura, que quando são estas elevadas, ocasionam elevados valores de evapotranspiração. Observa-se que, para o estado do Paraná, a região noroeste apresenta as maiores temperaturas, e a região sudeste apresenta temperaturas menores (Figura 14). As temperaturas médias mensais estão disponibilizadas no Anexo A.

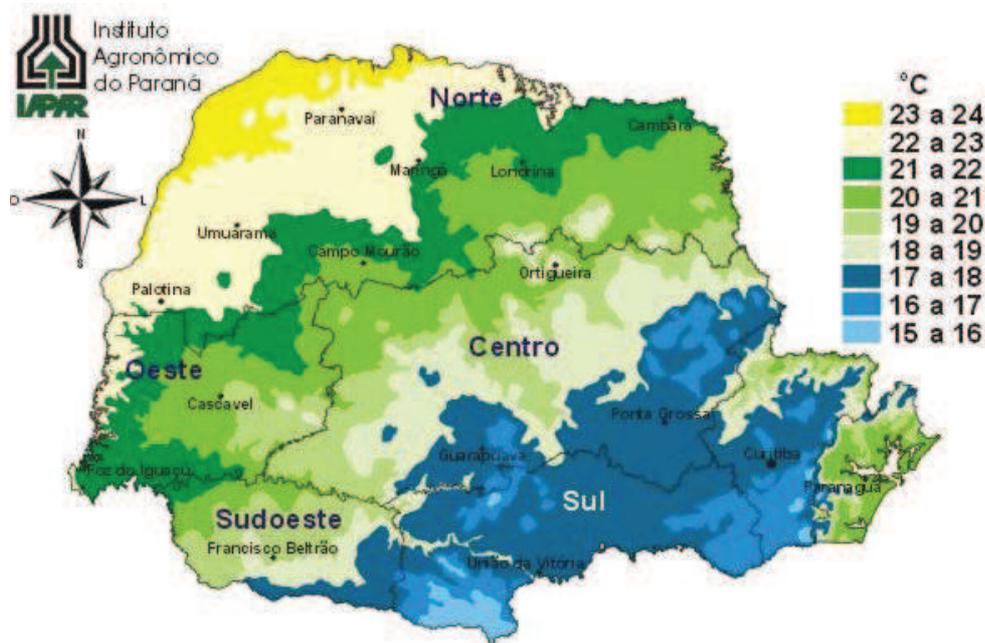


Figura 14 Temperatura Média Anual para o estado do Paraná (IAPAR, 2000).

2.3.2 Características de Evapotranspiração

A evapotranspiração de referência é a base na qual são aplicados os coeficientes da cultura (k_c) para obtenção das quantidades de água que a planta necessita em suas diversas fases fenológicas. Assim, a evapotranspiração é fundamental para se conhecer o balanço hídrico de uma região. A partir da disponibilidade hídrica, pode-se então determinar se essa região é indicada para o cultivo de determinada espécie vegetal ou se é necessário o uso de irrigação (IAPAR, 2000). A evapotranspiração é maior na região noroeste e a região litorânea apresenta as menores médias de evapotranspiração do estado. As evapotranspirações médias diárias para cada mês no estado do Paraná estão disponibilizadas no Anexo B.

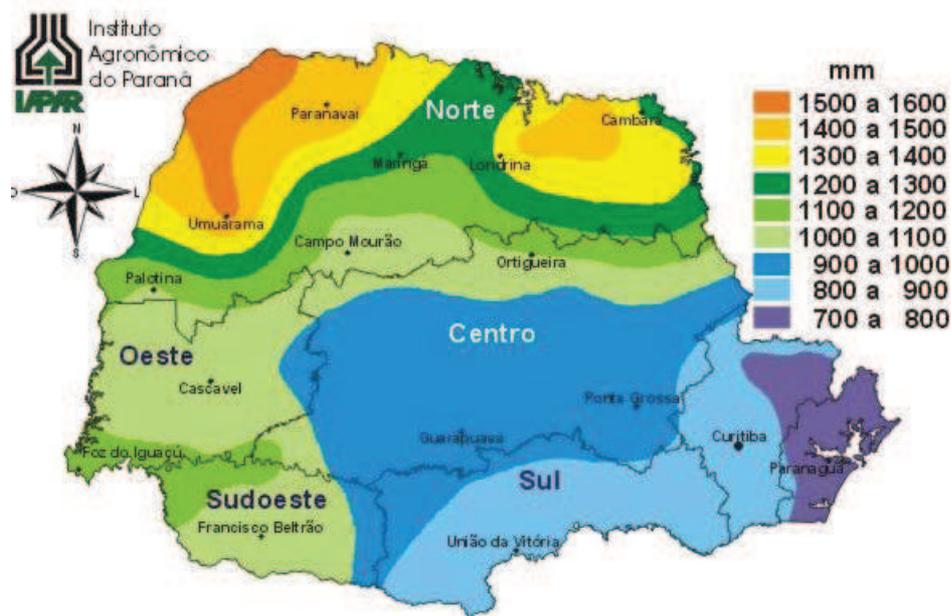


Figura 15 Evapotranspiração Anual Média para o estado do Paraná (IAPAR, 2000).

2.3.3 Características de Precipitação

A precipitação é o elemento que mais afeta a produtividade agrícola em todo o mundo (IAPAR, 2000). Todas as atividades agrícolas, relacionadas com a produção de grãos, são dependentes da precipitação. As datas de plantio, a produtividade, o momento de aplicação de defensivos, entre outros, têm, em maior ou menor grau, relação com o quanto e quando houve a precipitação. Observa-se que em todo o estado as menores precipitações médias são superiores a 1200 mm, chegando até 3500 mm em algumas regiões (Figura 16). Os mapas de precipitação mensal para os meses do ano no estado do Paraná são apresentados no Anexo C.

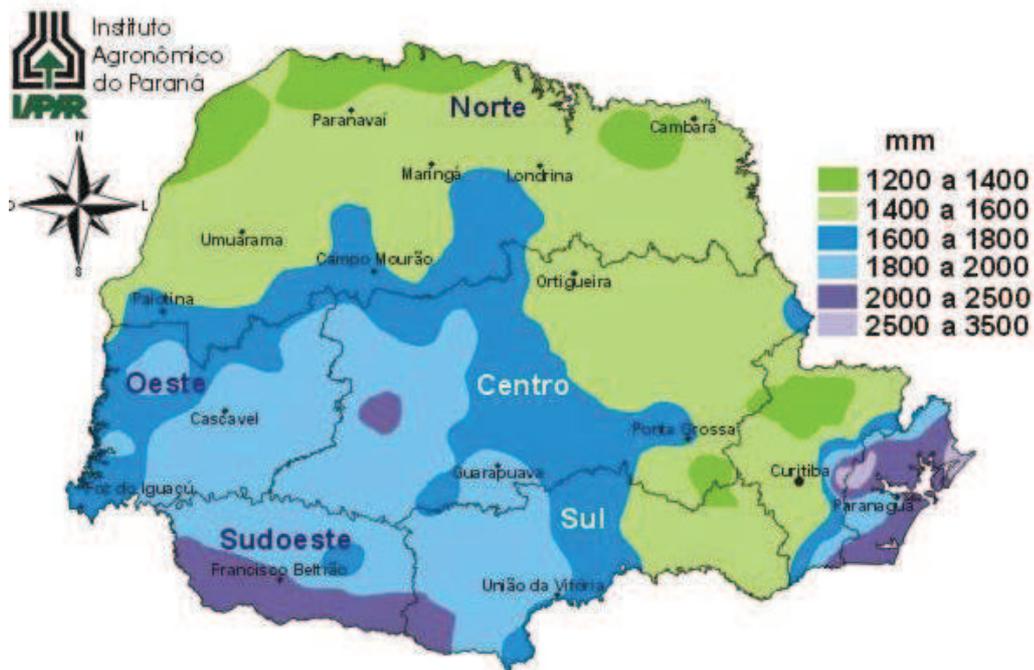


Figura 16 Precipitação Média Anual para o estado do Paraná (IAPAR, 2000).

2.4 Características de Solo e Relevo Paranaenses

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2009), o solo é uma coleção de elementos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, minerais e orgânicos que contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e também podem, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas.

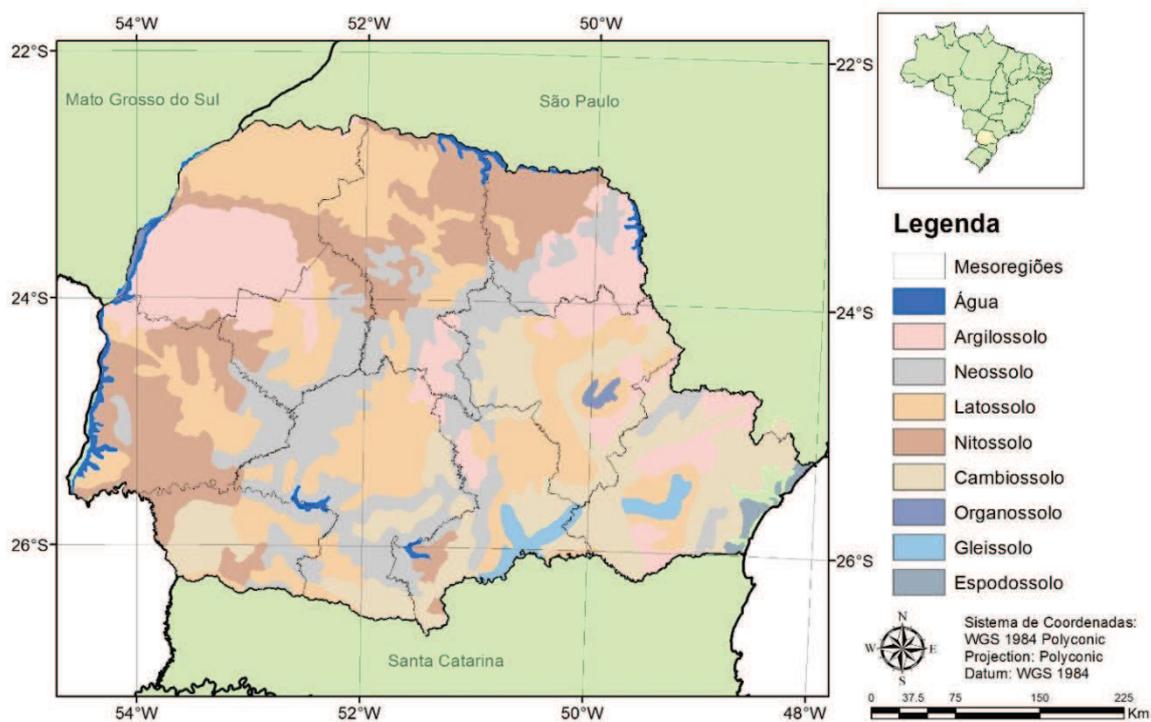


Figura 17 Tipos de Solo do Estado do Paraná. Adaptado de EMBRAPA (2009, 2011).

Os tipos de solo paranaenses (Figura 17) dividem-se em:

- Latossolos: dividem-se em Bruno, Amarelo, Vermelho e Vermelho-Amarelo. São constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura.
- Argissolos: dividem-se em Bruno-Acinzentado, Acinzentado, Amarelo, Vermelho e Vermelho-Amarelo. São solos constituídos por material mineral com argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alumínico e horizonte B textural imediatamente abaixo de horizonte A ou E.
- Neossolos: solos pouco evoluídos, sem horizonte B definido, em via de formação. São divididos em Litólico, Flúvico, Regolítico e Quartzarênico.
- Nitossolos: dividem-se em Bruno, Vermelho e Háplico. São solos com 350 g/kg ou mais de argila, constituídos por material mineral que apresentam horizonte B nítico imediatamente abaixo do horizonte A ou dentro dos primeiros 50 cm do horizonte B, com argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, dentro de 150 cm da superfície do solo.
- Cambissolos: solos pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente em sequência a horizonte superficial de qualquer natureza, inclusive o horizonte A. São subdivididos em Húmico, Flúvico e Háplico.
- Organossolos: divididos em Timórfico, Fólico e Háplico, são solos orgânicos, com predominância de constituintes orgânicos em relação aos minerais.
- Gleissolos: solos com expressiva gleização dentro de 150 cm da superfície, geralmente localizado em locais de flutuação de nível do lençol freático, tendo, assim, excesso de umidade permanente ou periódica. Podem ser classificados em Timórfico, Sáfico, Melânico e Háplico.
- Espodossolos: dividido em Humilúvico, Ferrilúvico, Ferrihumilúvico, são solos que apresentam o horizonte B espódico, imediatamente abaixo de horizonte E ou A, dentro de 200 cm da superfície do solo.

A altitude obtida do Modelo Digital de Elevação (VALERIANO, 2004) foi gerada a partir do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que possui dados topográficos de cerca de 80% da superfície terrestre do planeta. O projeto advém de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do DOD (*Department of Defense*) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália. Com isso, tem-se dados de altitude com resolução espacial de 30m para o estado do Paraná (Figura 18).

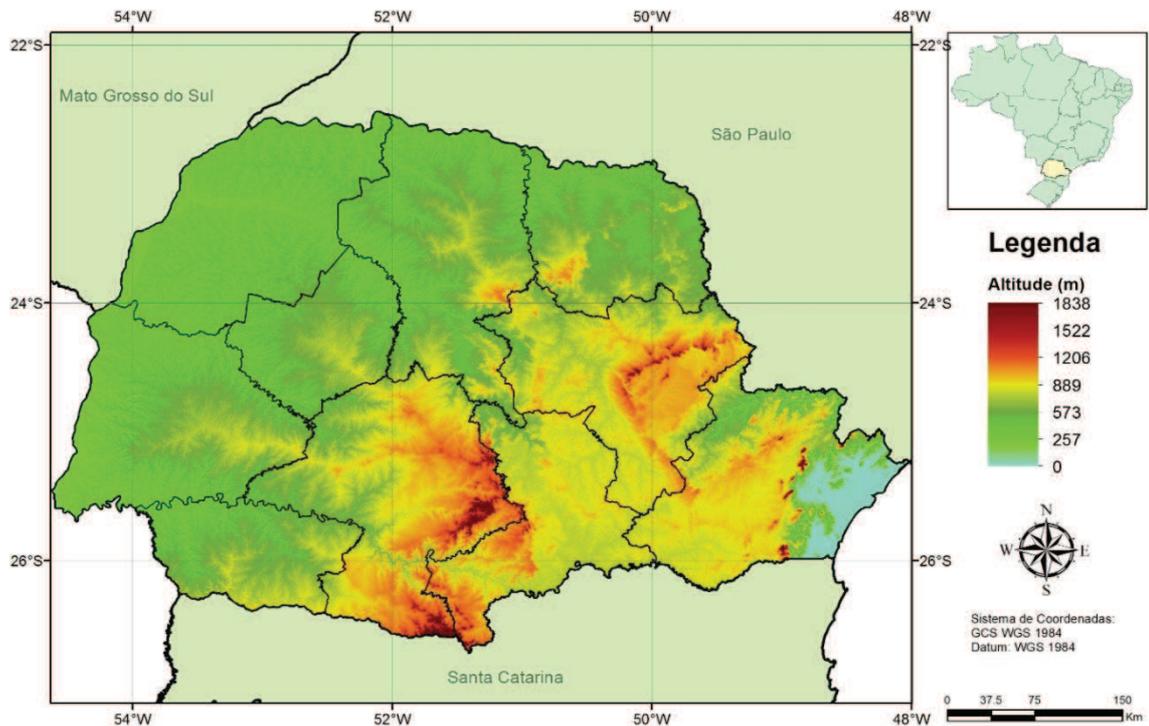


Figura 18 Modelo Digital do Terreno Paranaense. (VALERIANO, 2004).

2.5 Sensoriamento Remoto

Campbell e Wynne (2011) definem sensoriamento remoto como sendo a prática de obter informações sobre as superfícies terrestre e aquática da Terra, utilizando imagens obtidas a partir de uma perspectiva elevada, usando radiação eletromagnética em uma ou mais regiões do espectro eletromagnético, refletida ou emitida a partir da superfície da Terra.

A utilização de sensoriamento remoto na agricultura já está deveras consolidada. Desde a coleta de informações diretas de localização, altitude a índices de vegetação, proporcionam a obtenção de informações indiretas, que são normalmente disponibilizadas em forma de imagens de satélite.

2.5.1 Modelo ECMWF

O ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) é o Centro de Previsão do Tempo de Médio alcance Europeu. Trata-se de uma organização intergovernamental com 34 países, e com base em Reading, no oeste de Londres – Reino Unido (WOODS, 2006). Os objetivos do centro são, em vias gerais, desenvolvimento e operação de modelos globais e assimilação de sistema de dados dinâmicos, termodinâmicos e composição dos fluídos da terra e a interação das partes do sistema-Terra, de modo a preparar previsões, contribuir para o monitoramento das partes relevantes do planeta, realizar pesquisas técnicas e científicas para melhorar a qualidade das previsões e coletar e armazenar dados.

Os dados são coletados por meio de um sistema que engloba dados de estações meteorológicas espalhadas pelo mundo, radares meteorológicos, satélites, entre outras fontes. Estes dados são coletados a cada 6 horas. Os dados globais, em uma resolução espacial de um grau de longitude e latitude são obtidos, processados e depois organizados em forma de uma grade de 25 km ($0,25^\circ$), sendo disponibilizados gratuitamente no *website* do JRC (*Joint Research Center*) (JRC, 2009) em formato Shape. Os dados desde 1989 estão disponíveis no modelo ERA INTERIN, que é modelo de reanálise em escala reduzida, isto é, com a grade de $0,25^\circ$ no lugar da antiga grade de um grau.

As variáveis agrometeorológicas disponíveis no sistema são: temperatura média ($^\circ\text{C}$), temperatura máxima ($^\circ\text{C}$), temperatura mínima ($^\circ\text{C}$), precipitação total (somatório, mm), evapotranspiração total sobre a água (somatório, mm), evapotranspiração total sobre o solo (somatório, mm), evapotranspiração de Penman-Monteith (somatório, mm), radiação global total (somatório, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$), média de profundidade da neve (cm), profundidade mínima de neve (cm), profundidade máxima de neve (cm), balanço hídrico climatológico (somatório, mm), velocidade média do vento (média, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e pressão de vapor água médio (média, hPa) – além dos campos adicionais, como Latitude, Longitude, Ano, Mês, Decêndio e data da aquisição dos dados.

Dada a quantidade de informações numa resolução espacial densa, quando comparada a estações meteorológicas, o ECMWF é uma base de dados confiável, gratuita e de fácil acesso na web. Como exemplo, apresenta-se a distribuição espacial das Estações Virtuais (EV) proveniente do ECMWF para o oeste do Paraná (Figura 19).



Figura 19 Distribuição espacial das Estações Virtuais do ECMWF.

2.5.2 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação (IVs) tem por objetivo avaliar a biomassa ou vigor vegetativo de plantas. É gerado a partir de várias combinações de valores espectrais que são somados, divididos ou multiplicados de um modo a produzir um valor único que indica a quantidade biomassa ou o vigor vegetativo dentro de um pixel. Altos valores do IV identificam pixels cobertos por proporções substanciais de vegetação saudável. A forma mais simples de um IV é a razão entre dois valores digitais a partir de bandas espectrais distintas. Algumas razões entre bandas são definidas aplicando conhecimentos de comportamento espectral da vegetação viva (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Assim, diversos tipos de IV são apresentados na literatura, sendo que praticamente todas se baseiam nas diferenças de resposta apresentadas pela vegetação nas bandas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP).

O índice de vegetação melhorado EVI (*Enhanced Vegetation Index*) é mais sensível à variação na estrutura do dossel e foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de proporcionar o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (HUETE et al., 1999). O EVI pode ser calculado por meio da Equação 1.

$$EVI = G * \frac{IVP - V}{L + IVP + C_1 * V - C_2 * A} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que A é a refletância no azul, C_1 e C_2 são os coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis na atmosfera, L é o fator de ajuste do solo e G é o fator de ganho ajustado. Segundo Justice et al. (1998), os valores dos coeficientes utilizados para o EVI são L igual a 1, $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$ e $G = 2,5$.

2.6 Balanço Hídrico do Solo

O balanço hídrico do solo permite determinar o nível de água no solo na zona de raízes em uma base temporal, diária, decenal ou mensal (STEDUTO et al., 2012). Sendo possível determinar se a cultura está sofrendo um estresse hídrico ou não, prejudicando, ou não, seu desenvolvimento. Um estresse hídrico acentuado culminará em uma quebra de produção ou, até, uma perda total da safra.

Para determinar o balanço hídrico utiliza-se de dados agrometeorológicos, dados da cultura e também dados do solo, tendo entradas (Irrigação, Precipitação), saídas (Evapotranspiração), armazenamento hídrico (Armazenamento – ARM) e esgotamento hídrico (D_r) (Figura 20). Assim, o balanço hídrico é a variação da água armazenada ou do esgotamento dessa água.

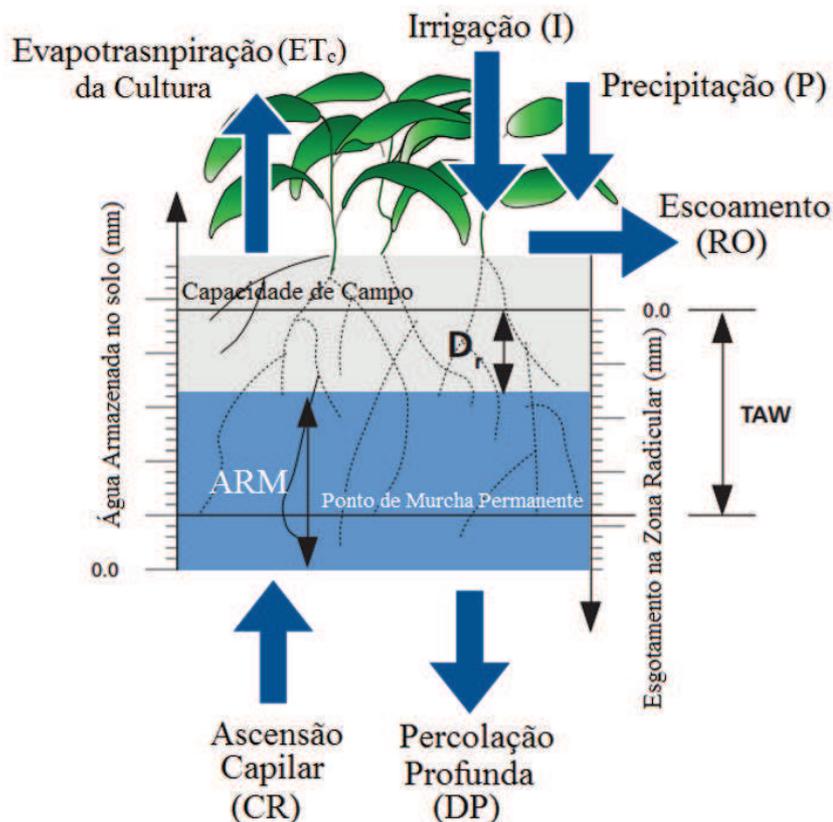


Figura 20 Balanço hídrico do Solo. (Adaptado de Steduto et al., 2012).

Logo, a determinação do balanço hídrico é fundamental para o entendimento da relação solo-planta e, claramente, é essencial para estimar a produtividade das culturas. Existem diversas formas de determinar essa necessidade hídrica da cultura. Neste trabalho, apresentam-se dois métodos para o cálculo do balanço hídrico: o apresentado por Allen et al., (1998), doravante BHFAO, e o apresentado por Thornthwaite e Mather (1955), doravante BHTM. Os detalhes são mostrados no capítulo Material e Métodos.

Richetti et al. (2014) geraram dados do balanço hídrico, BHFAO, do solo para a cultura da soja utilizando-se de dados agrometeorológicos para o oeste do Paraná, propondo seu uso para estimativas de produtividade no Paraná. Rojas (2007) utilizou-se do BHFAO para determinação de estresse hídrico e ET_a para a cultura do milho no Quênia, utilizando-se deles, também, para a estimativa da produtividade de milho no país.

2.7 Modelos de Estimativa de produtividade

A estimativa de produtividade é de suma importância para o norteamento de políticas agrícolas, em seu gerenciamento e planejamento. A estimativa da produtividade pode ser realizada diretamente, coletando amostras antes da colheita no período de maturação de acordo com calendário, ou indiretamente pela utilização de ferramentas, métodos e técnicas de previsão como modelos (DELÉCOLLE et al., 1992).

Existem diversas maneiras para classificar os modelos matemáticos em diversas áreas do conhecimento, considerando os princípios utilizados no seu desenvolvimento (SIROTENKO, 2009).

Segundo Delécolle et al. (1992), existem três tipos de modelos de estimativa: modelos estatísticos, modelos de crescimento e modelos semi-empíricos.

Os modelos estatísticos utilizam relações empíricas, em que os fatores ambientais são inseridos em equações de regressão para prever a produtividade.

Os modelos de crescimento utilizam características fisiológicas da planta que são transformadas em modelos matemáticos para descrever as funções biológicas primárias no crescimento de uma cultura. Tais modelos utilizam de variáveis agrometeorológicas juntamente com índices que remetem a características da cultura, como o índice de área foliar (LAI - *leafarea index*). Estes modelos possuem três características distintas:

- São dinâmicos, pois operam com entrada de dados ordenada no tempo;
- Contêm parâmetros, que permitem um esquema geral de equações que podem ser adaptadas para incluir comportamentos de crescimento específicos para culturas ou espécies diferentes;
- Permitem descrever o desenvolvimento fisiológico da cultura.

Os modelos semi-empíricos, possuem uma estrutura mista, ou seja, uma união dos modelos de simulação e estatísticos. São modelos que apresentam como características principais: uso da informação temporal e condensação dos efeitos do ambiente em equações simples; utilizam aproximação empírica, porém consideram a escala fisiológica em vez do calendário agrícola na determinação dos estádios fenológicos das culturas.

Já para Sirotenko (2009), os modelos podem ser separados em:

- Modelos Empíricos e Mecanísticos: a principal função dos modelos empíricos é descrever enquanto os modelos mecânicos explicam o que foi descrito. O desenvolvimento de um modelo empírico sempre permanece em um nível único de organização hierárquica, onde os parâmetros inerentes são conectados com um nível do sistema.
- Modelos Estáticos são modelos matemáticos que não envolvem a variável tempo.
- Modelos Dinâmicos: nestes o tempo é uma variável analisada, de modo que o modelo toma representações em equações diferenciais.
- Modelos Determinísticos, cuja principal distinção reside no fato que qualquer previsão ou estimativa é formulada como um número e não em forma de distribuição probabilística.
- Modelos Estocásticos, introduzidos por conta da heterogeneidade de elementos biológicos. Elementos estocásticos são introduzidos em modelos determinísticos em

diversos casos, por exemplo, para considerar as incertezas da previsão do tempo em estimativas de produtividade.

Além dessas classificações, utilizadas em outros ramos da ciência, os modelos utilizados para a previsão de safras são normalmente divididos em três tipos, modelos agrometeorológicos, modelos espectrais e modelos agro-espectrais.

2.7.1 Modelos Agrometeorológicos

São aqueles que utilizam os dados agrometeorológicos para penalizar a produtividade, avaliando, por exemplo, a água disponível para a planta. Segundo Doorenbos e Kassam (1994), podemos estimar matematicamente a produtividade de uma cultura utilizando dados de temperatura, radiação solar, precipitação, evapotranspiração e duração do período de crescimento da cultura.

2.7.1.1 Modelo FAO

O modelo utilizado pela FAO propõe uma equação simples em que a redução relativa da produtividade está relacionada com a correspondente redução relativa da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Especificamente, a resposta da produtividade é expressa pela Equação 2:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad \text{Eq. (2)}$$

em que:

Y_x e Y_a são os valores, respectivos, de produtividade potencial e produtividade atingível, ($t \text{ ha}^{-1}$);

ET_c e ET_a são os valores máximo e atual de evapotranspiração (mm);

K_y é o fator de produtividade de que representa a sensibilidade da produtividade da cultura a estresses hídricos (adimensional).

O fator K_y captura a essência das complexas relações entre a produtividade de uma cultura e sua necessidade de água, em que diversos processos biológicos, químicos e físicos estão envolvidos (STEDUTO et al, 2012), e é o fator de sensibilidade ao estresse hídrico da cultura. São específicos para cada cultura e variam de acordo com o estágio da cultura, sendo que:

- $K_y > 1$: a cultura é muito sensível ao déficit hídrico com reduções de produtividade proporcionais ao estresse hídrico sofrido;
- $K_y < 1$: a cultura é tolerante ao déficit hídrico, recuperando-se parcialmente de estresses hídricos sofridos, sendo, assim, apresentam reduções de produtividade menores proporcionalmente em relação a redução de água disponível;

- $K_y = 1$: a produtividade é diretamente proporcional ao déficit hídrico.

Para se determinar o valor máximo de produtividade, também chamado de produção bruta de matéria seca da cultura padrão (Y_x , kg ha⁻¹) utiliza-se o método de Kassam (1977), que se baseia em níveis de radiação, temperatura e dias nublados e limpos. Determina-se a produtividade potencial pelo somatório das produtividades potenciais brutas (PPR , kg ha⁻¹) para a cultura (Equação 3).

$$Y_x = \sum PPR \quad \text{Eq. (3)}$$

A produtividade potencial bruta para a cultura é determinada pela produtividade potencial bruta para cultura padrão ($PPBp$, kg ha⁻¹, Equação 4) e o índice de colheita (Cc , adimensional). Este índice de colheita é responsável pela calibração do modelo na região em estudo.

$$PPR = 0,265455 * Cc * PPBp \quad \text{Eq. (4)}$$

O valor de $PPBp$ é a produtividade potencial bruta para dias nublados ($PPBn$, Equação 5) somada à produtividade potencial bruta para dias limpos ($PPBc$, Equação 6)

$$PPBn = (31,7 + 0,219 * Q_0) * ctn * 0,6 \quad \text{Eq. (5)}$$

$$PPBc = (107,2 + 0,36 * Q_0) * ctc * 0,6 \quad \text{Eq. (6)}$$

As produtividades potenciais são dependentes das correções de temperatura, para dias nublados (ctn , Equação 7) e para dias limpos (ctc , Equação 8), e da radiação no topo da atmosfera (Q_0 , Equação 9).

$$ctn = \begin{cases} 0,583 + 0,014 * T + 0,0013 * T^2 - 0,000037 * T^3, & \text{se } 16,5 \leq T \leq 37 \\ -0,0425 + 0,035 * T + 0,00325 * T^2 - 0,0000925 * T^3, & \text{se } 16,5 > T > 37 \end{cases} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$ctc = \begin{cases} -0,0425 + 0,035 * T + 0,00325 * T^2 - 0,0000925 * T^3, & \text{se } 16,5 \leq T \leq 37 \\ -1,085 + 0,07 * T + 0,0065 * T^2 - 0,000185 * T^3, & \text{se } 16,5 > T > 37 \end{cases} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$Q_0 = 97,3 * DR * \left(\frac{\pi}{180} * hn + \text{sen}(lat) * \text{sen}(\delta) \right) + \cos((\delta) + \cos(lat)) * \cos(\delta) * \text{sen}(hn) \quad \text{Eq. (9)}$$

em que:

Q_0 é a radiação no topo da atmosfera ($MJ m^{-2}$);

DR é a distância relativa Sol-Terra (UA, Equação 10);

lat é a latitude do local (°);

hn é a hora do nascer do sol (°, Equação 11);

δ é a declinação solar ($^{\circ}$, Equação 12);

$$DR = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360}{365 * \delta}\right) \quad \text{Eq. (10)}$$

$$hn(^{\circ}) = \text{acos}\left(-\tan((lat) * \tan(\delta)) * \frac{180}{\pi}\right) \quad \text{Eq. (11)}$$

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 * \text{sen}\left(\frac{360}{365} * (DJ - 80)\right) \quad \text{Eq. (12)}$$

em que:

DJ é o dia Juliano.

2.7.2 Modelos Espectrais

Estes modelos utilizam dados espectrais da cultura para estimarem a produtividade de uma área, por meio de imagens de satélites. Para Tao et. al. (2005), o cobertura espacial e temporal das imagens providas de sensoriamento remoto as tornam ferramentas atrativas para avaliar os efeitos das variações climáticas interanuais na produção de alimentos e fibras. Esta avaliação é feita de modo indireto, por exemplo, por índices de vegetação.

2.7.2.1 Modelo GLO-PEM2

O modelo GLO-PEM2 é apresentado por Goetz et al. (1999) e utiliza uma estimação de NPP (*Net Primary Production* – Produtividade Primária Líquida) (Equação 13). Assim, é possível estimar a produtividade da cultura (Equação 18).

$$NPP = GPP - R_a \quad \text{Eq. (13)}$$

em que:

GPP é a produtividade primária bruta (gC m^{-2});

R_a é a perda de carbono pela respiração autotrófica (gC m^{-2});

A perda de carbono da cultura pela sua respiração autotrófica (Equação 14) é modelada utilizando uma relação semi-empírica da biomassa (W , Kg ha^{-1} , Equação 15), ajustada pela resposta exponencial da respiração pela temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) (GOETZ et al., 1999).

$$R_a = 0,53 \left(\frac{W}{W+50}\right) e^{0,5 \left(\frac{T_c - T}{25}\right)} \quad \text{Eq. (14)}$$

em que:

$$W = 7166,1(\rho_{min}^{-2,6}) \quad \text{Eq. (15)}$$

T_c é a temperatura média histórica ($^{\circ}\text{C}$);

T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

ρ_{min} é o menor valor da refletância do vermelho no período.

Assim, estima-se a produtividade atingível (Y_a) por meio da Equação 16.

$$Y_a = \frac{NPP \cdot AR \cdot Cc}{1 - m_0} \quad \text{Eq. (16)}$$

em que:

AR é a razão de biomassa sobre o solo e biomassa total. (0,45 TAO et al., 2005));

Cc é o índice de colheita;

m_0 é a umidade contido nos grãos (0,13 para soja).

2.7.3 Modelos Agro-espectrais

Também conhecidos como agro-espectrais são aqueles que utilizam tanto características espectrais e dados de sensoriamento remoto das condições onde a cultura está implantada, como, também, utilizam as características agrometeorológicas do local.

2.7.3.1 Modelo CASA

O modelo CASA (*Carnegie-Ames-Stanford-Approach*) apresentado por Potter et al. (2012), também utiliza o NPP (Equação 17) para a determinação da produtividade.

$$NPP = RAD * EVI * e * T * W_s \quad \text{Eq. (17)}$$

em que:

RAD é radiação solar ($MJ \ m^{-2}$);

e é a eficiência do uso da luz (*light use efficiency – LUE*) ($g \ MJ^{-1}$), considerada igual a $0,55 \ g \ MJ^{-1}$ (POTTER et al., 2003);

T é a temperatura superficial ($^{\circ}C$);

W_s é penalizada devida à umidade do solo. (Equação 18, adimensional).

$$W_s = 0,5 + 0,5 \frac{ET_a}{ET_c}$$

Eq. (18)

Assim, estima-se a produtividade atingível (Y_a) por meio da Equação 16.

Diversos autores utilizaram modelos agrometeorológicos, agrometeorológicos espectrais e espectrais para a estimativa da produtividade de soja.

Berka et al. (2003) utilizaram o modelo agrometeorológico para a estimativa de soja no Paraná, obtendo bons resultados a nível estadual e municipal. Sugawara (2002) utilizou imagens NOAA-AVHRR em um modelo agrometeorológico espectral, concluindo que as imagens não se mostraram satisfatórias, devido à inadequada resolução espacial para uso ao nível municipal; conseqüentemente, as estimativas de produtividade foram sempre superestimadas. Mercante et al. (2010) utilizaram um modelo de regressão espectral com

dados do Landsat 5 e NDVI, concluindo que em macrorregiões os modelos apresentam um bom custo benefício para a estimativa e previsão de safras.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área em Estudo

A área de estudo compreenderá os 399 municípios do estado do Paraná, localizado na região Sul do Brasil, situado entre os paralelos 22°29'S e 26°43'S e os meridianos 48°2'W e 54°38'W (Figura 21). O estado é cortado pelo Trópico de Capricórnio, que estabelece o limite meridional das culturas agrícolas tropicais. Como resultado das diferentes formações topográficas e características geológicas, o clima no estado do Paraná apresenta três tipos distintos, todos correspondentes a clima úmido, apresentando-se mais ameno na região norte e temperado no sul, onde os invernos podem ser rigorosos.



Figura 21 Mapa de localização dos 399 municípios e das 10 mesorregiões do estado do Paraná.

3.2 Mapeamento e Determinação de Datas da Cultura

Para o mapeamento da cultura de soja, foi utilizada a máscara de soja do ano-safra 2011-2012 proposta por Souza et al. (2015). Esta foi a máscara utilizada neste trabalho; contudo, a metodologia pode ser aplicada em outras máscaras de soja.

Logo, as determinações de balanço hídrico (BHFAO e BHTM) e as estimativas de produtividade (FAO, CASA e GLO-PEM2) apenas nas áreas com cultivo de soja (Figura 23).

Além disso, foram utilizados dados de data de semeadura, de máximo desenvolvimento vegetativo e de colheita médios por município (Figura 22) obtidos a partir de séries espectro-temporais do índice de vegetação EVI, gerados por Becker (2013) e

Grzegozewski et al. (2013), para a determinação dos decêndios para realização dos balanços hídricos e estimativas de produtividades.

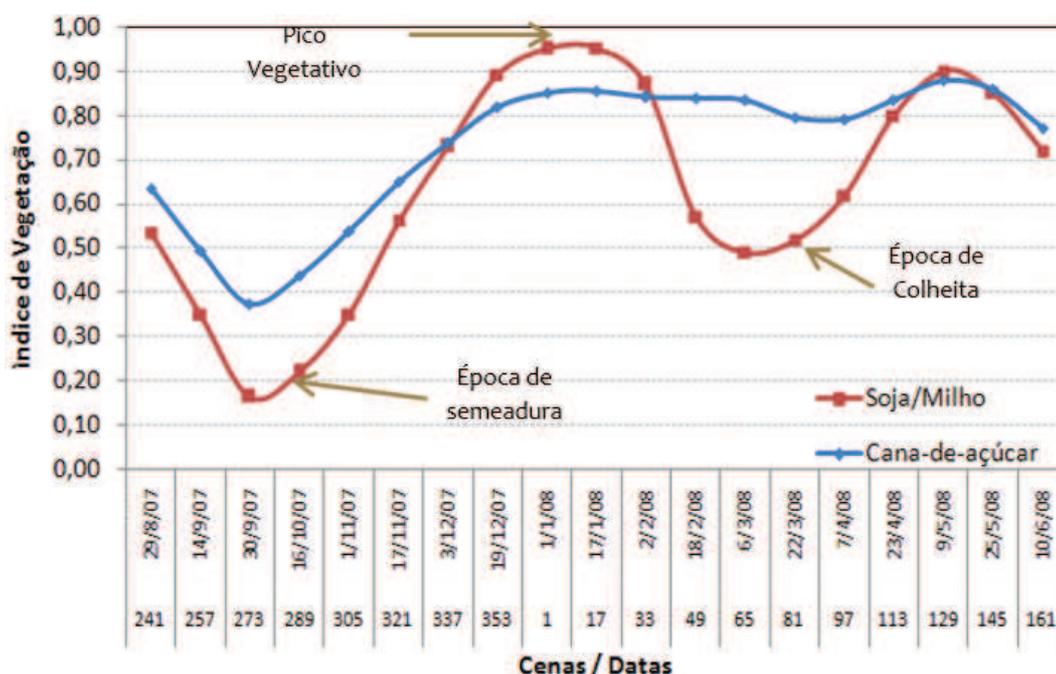


Figura 22 Perfil temporal do índice de vegetação EVI de culturas agrícolas.

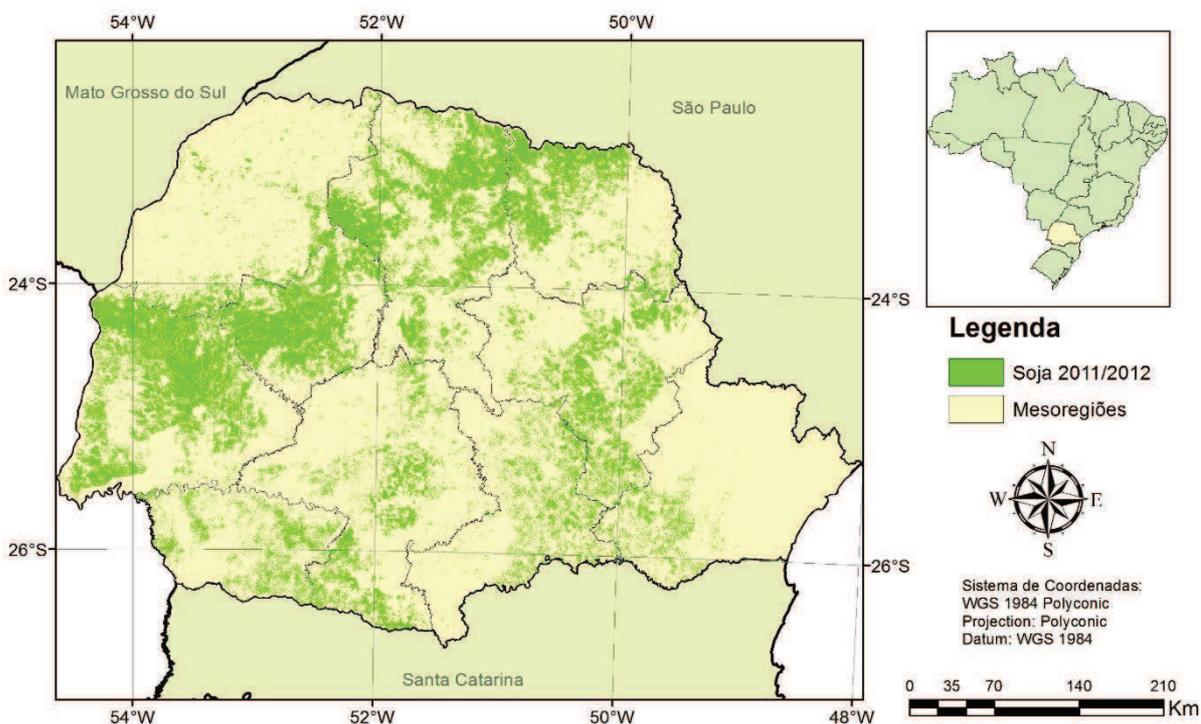


Figura 23 Área de soja para o ano safra 2011/2012. (Adaptado de Souza et al., 2015)

3.3 Determinação da CAD

A CAD é o intervalo de umidade do solo entre a capacidade de campo (CC%) e o ponto de murcha permanente (PMP%). Tais dados dependem do tipo de solo de cada região. Assim, foram utilizadas informações da capacidade de armazenamento de água do

solo (CAD) geradas, conforme Farias et al. (2000) (Tabela 1), a partir dos tipos de solo obtidos do Novo Mapa de Solos do Brasil (EMBRAPA, 2011), determinando, assim, o valor de CAD para o estado do Paraná (Figura 24).

Tabela 1 Capacidade de retenção de água no solo (CAD) para diferentes tipos de solo

Tipo de Solo	CAD (mm)
Neossolo Quartzarênico	50
Neossolo Flúvico de textura arenosa.	
Latossolo Vermelho-Amarelo	70
Latossolo Vermelho (menos de 35% de argila)	
Neossolo Litólico	100
Luvisolos	
Argissolos	
Nitossolos	
Latossolos (exceto Latossolo Vermelho com menos de 35% de argila)	
Cambissolos	
Neossolo Flúvico de textura média a argilosa.	

FONTE: Adaptada de Embrapa (1999); Farias et al. (2000).

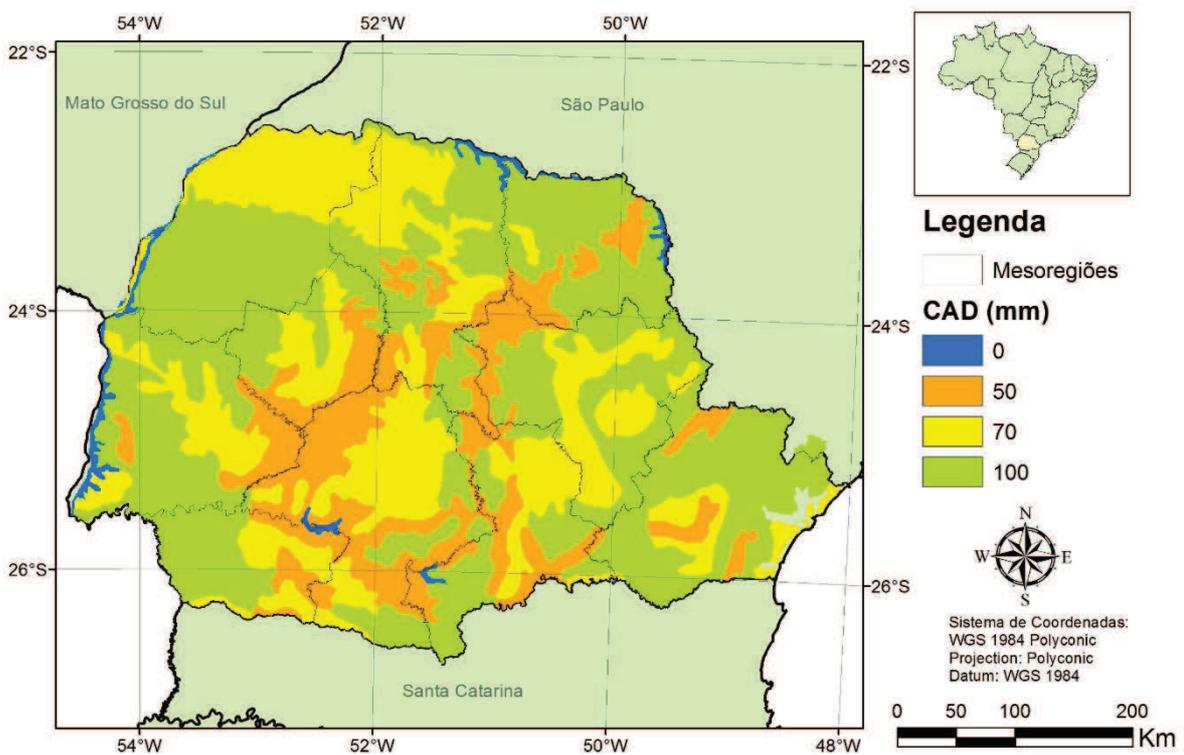


Figura 24 Valores de CAD (mm) para o estado do Paraná.

3.4 Estimativa de Produtividade da Soja

Foram realizadas estimativas de produtividade média de soja para o Paraná através de modelos agrometeorológicos, espectrais e agro-espectrais (Figura 25).

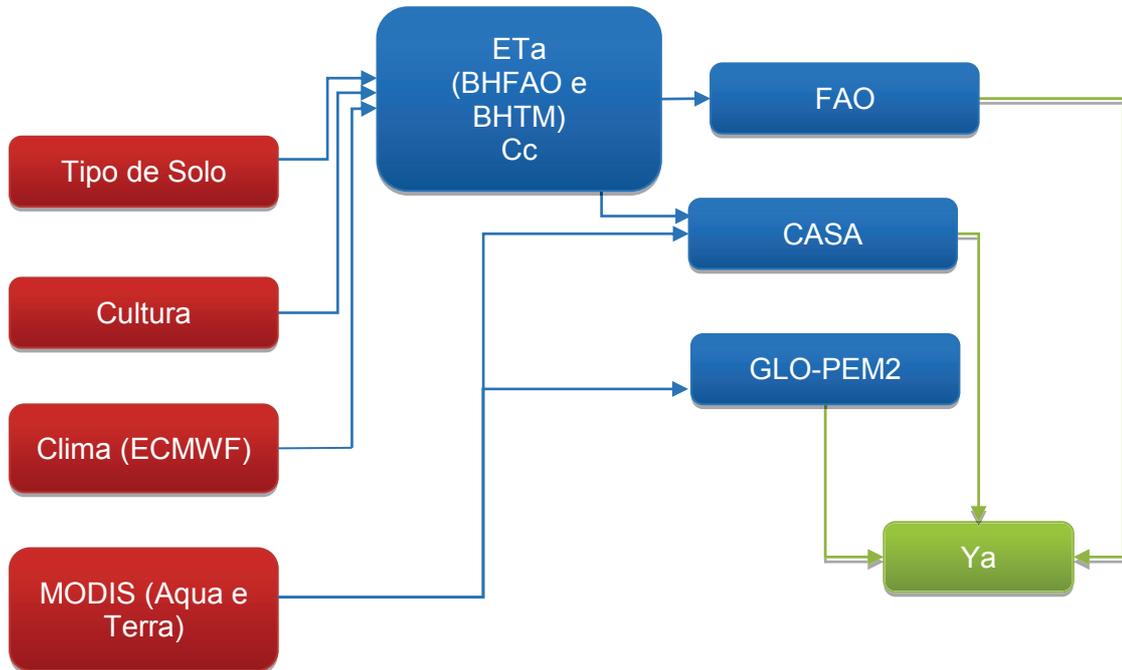


Figura 25 Fluxograma geral do trabalho.

Foram utilizados os seguintes dados de entrada nos modelos agrometeorológicos, espectrais e agro-espectrais:

- Dados agrometeorológicos
 - Precipitação pluvial (mm);
 - Temperatura média do ar (°C);
 - Evapotranspiração de referência (ET_0 , mm);
- Características da Cultura
 - Fases fenológicas das culturas;
 - Profundidade do sistema radicular;
 - Coeficientes k_c e k_y ;
- Dados de Sensoriamento Remoto
 - EVI do satélite MODIS;
 - GPP do satélite MODIS;
 - Temperatura média do ar (°C) do sensor MODIS;
- Características do Solo
 - Tipos de solo;
 - Capacidade de armazenamento de água do solo - CAD (mm);
 - Balanço hídrico;

- Características da Produção
 - Índices de colheita de referência;
 - Como dados de saída obteve-se:
- Produtividade estimada ($t\ ha^{-1}$);
- Balanço Hídrico (mm);
- Evapotranspiração Real (mm);

Os dados agrometeorológicos decendiais foram obtidos do modelo ECMWF numa grade quadrada de 25 km. Para contemplar o estado do Paraná, foram utilizados 297 pontos (EV); portanto, uma quantidade muito superior ao número de estações meteorológicas do estado (total de 68).

3.5 Balanço Hídrico

A determinação do Balanço Hídrico, tanto pelo método de esgotamento da FAO (BHFAO, ALLEN et al., 1998), quanto o método de Thornthwaite e Mather (1955) (BHTM), foi realizada em cada uma das Estações Virtuais (EV, Figura 26) decendialmente. Após suas determinações, os BH foram interpolados e multiplicados pela máscara da cultura da soja, de forma que o cálculo fosse realizado apenas onde há cultura. Os dados dos balanços hídricos foram utilizados, posteriormente, para a estimativa de produtividade. O detalhamento completo encontra-se no Apêndice A.

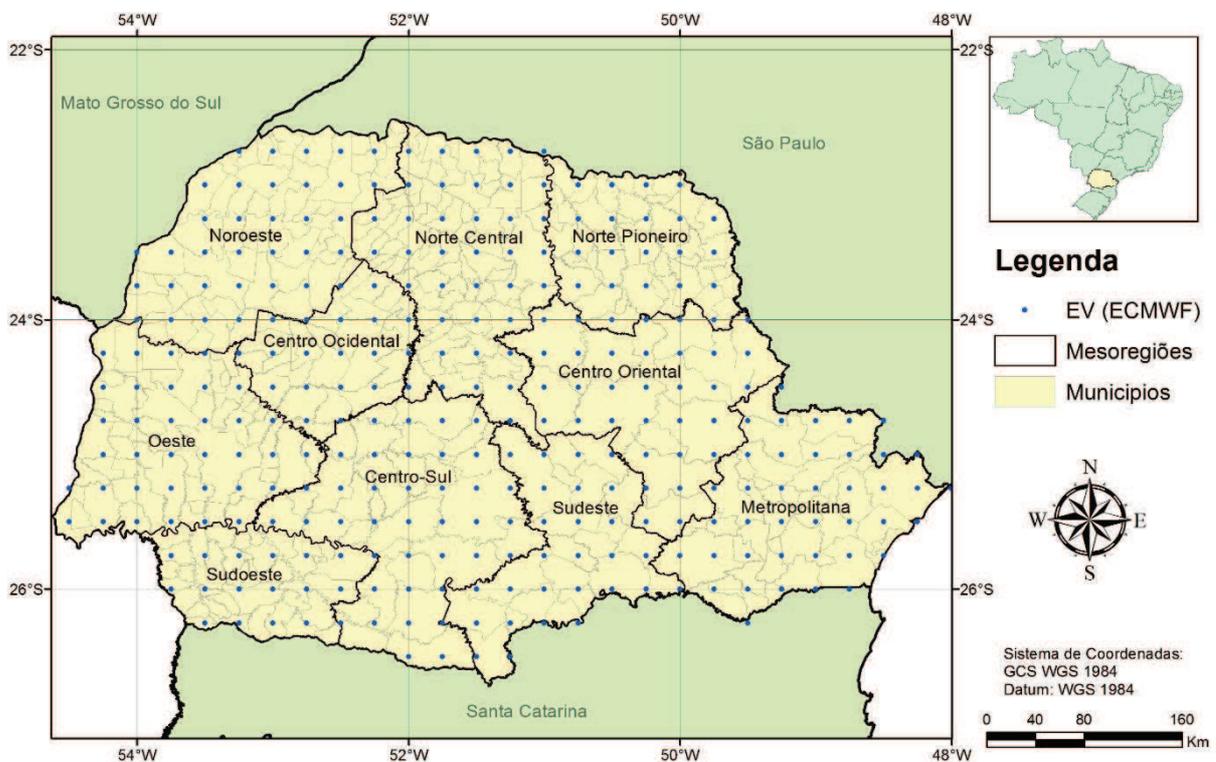


Figura 26 Distribuição espacial das EV (Estações Virtuais) do ECMWF.

3.5.1 Método do Esgotamento da FAO (BHFAO)

O método BHFAO (ALLEN et al., 1998) determina o balanço hídrico pelo esgotamento hídrico na zona radicular. Assim, considera-se um sistema formado por determinada camada de solo e analisam-se as entradas e saídas de água deste sistema. Basicamente, o esgotamento hídrico é a quantidade de água que falta no solo para atingir-se a capacidade de campo (Equação 19). Portanto, é a diferença entre entradas e saídas. valor resultante dessa diferença é a quantidade água faltante no sistema em determinado período de tempo; logo, quanto maior o esgotamento, maior o estresse hídrico.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad \text{Eq. (19)}$$

Em que:

$D_{r,i}$ é o esgotamento na zona radicular no final do período i (mm);

$D_{r,i-1}$ é o esgotamento na zona radicular no período anterior $i-1$ (mm);

P_i é precipitação no período i (mm);

RO_i é o Escoamento superficial no tempo i (mm);

I_i é a irrigação no tempo i (mm);

CR_i é a ascensão capilar do solo no tempo i (mm);

$ET_{c,i}$ é a evapotranspiração da cultura no tempo i (mm);

DP_i é a percolação profunda para fora da zona radicular no tempo i (mm).

Os valores de ascensão capilar (CR), percolação profunda (DP), escoamento superficial (RO) e irrigação (I) são desconsiderados neste trabalho. Os primeiros, ascensão capilar, percolação profunda e escoamento superficial, pela impossibilidade de determinar tais valores, e a irrigação, pois as áreas não possuem sistema de irrigação.

Para determinar-se da evapotranspiração da cultura (ET_c) utiliza-se os valores de K_c , dependente da cultura e os valores de evapotranspiração de referência (ET_0) (Equação 20).

$$ET_c = K_c ET_0 \quad \text{Eq. (20)}$$

em que:

ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm);

K_c é o fator da cultura (adimensional);

ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm).

Os valores da evapotranspiração real (ET_a) são difíceis de serem determinados. Entretanto, podem ser medidos utilizando-se um tanque classe A, ou por outras formas. As características climáticas de cada local influenciam nos valores médios da

evapotranspiração atual. Uma das formas de se calcular a ET_a é por meio do fator k_s de estresse hídrico da cultura (Equação 21). O fator k_s quantifica a redução da evapotranspiração em relação à disponibilidade hídrica do solo (Equação 22).

$$ET_a = k_s ET_c \quad \text{Eq. (21)}$$

em que:

ET_a é a evapotranspiração real (mm);

k_s é o fator de estresse hídrico da cultura.

$$k_s = \begin{cases} 1 & \text{se } D_{r,i} < RAW \\ \frac{TAW - D_{r,i}}{TAW - RAW} & \text{se } D_{r,i} \geq RAW \end{cases} \quad \text{Eq. (22)}$$

em que:

TAW é o total de água disponível em determinada profundidade do solo (mm);

RAW é a água prontamente disponível para a cultura (mm).

O total de água disponível no solo (TAW) é a capacidade de armazenamento de água do solo multiplicada pela profundidade desejada, ou seja, a capacidade de água disponível (CAD) multiplicada pela profundidade efetiva das raízes da cultura (Equação 23).

$$TAW = CAD * Z_r \quad \text{Eq. (23)}$$

O valor do esgotamento ($D_{r,i}$) é dependente do valor da TAW e do valor do esgotamento anterior, $D_{r,i-1}$ (Equação 24).

$$D_{r,i} = \begin{cases} TAW, & \text{se } D_{r,i-1} > TAW. \\ D_{r,i-1}, & \text{se } D_{r,i-1} \leq TAW \end{cases} \quad \text{Eq. (24)}$$

Já a água prontamente disponível (RAW) representa a quantidade de água em que a planta não necessita nenhum esforço para sua utilização, e é calculada multiplicando-se o valor de TAW pelo coeficiente p ($p = 0,5$), que é o coeficiente de esgotamento que representa essa dificuldade que a planta sofre conforme a quantidade de água no solo não está prontamente disponível.

Com esses dados, foi possível calcular o esgotamento na zona radicular no final do tempo. Desta forma, tendo todos os parâmetros necessários para a realização do cálculo do balanço hídrico para a cultura da soja (BHFAO, Equação 25), é o valor oposto do esgotamento na zona radicular no final do tempo.

$$BHFAO = D_{r,i} * (-1) \quad \text{Eq. (25)}$$

Assim, determina-se o BHFAO para o período determinado, no caso, o ciclo da cultura da soja (Figura 27).

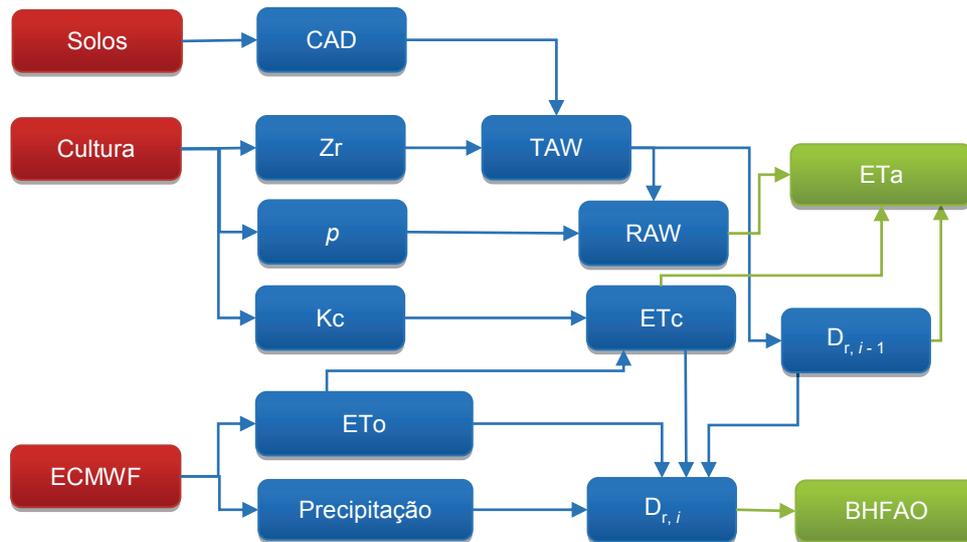


Figura 27 Fluxograma do Método do Esgotamento da FAO (BHFAO).

3.5.2 Método de Thornthwaite e Mather (BHTM)

O método BHTM calcula o balanço hídrico de forma diferente, porém, utilizando-se dos mesmos dados. Primeiramente determina-se a diferença (*DIF*, mm) entre a precipitação e a evapotranspiração da cultura, preservando os sinais positivos e negativos dos valores (Equação 26).

$$DIF = P - ET_c \quad \text{Eq. (26)}$$

Com isto, calcula-se, simultaneamente, o negativo acumulado (*NAc*, mm) (Equações 27) e o armazenamento de água no solo (*ARM*, mm) (Equação 28). O negativo acumulado é o somatório da sequência de valores negativos dos meses em que *DIF* for um valor negativo, o que mostra que precipitou menos do que o solo perde durante o período, neste caso decendialmente, indicando o potencial de ressecamento do solo.

$$NAc = \begin{cases} P - ET_c, & \text{se } P - ET_c < 0 \\ CAD * \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right), & \text{se } P - ET_c \geq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (27)}$$

$$ARM = \begin{cases} ARM_{i-1} + (P - ET_c), & \text{se } P - ET_c \geq 0 \\ CAD * e^{\left(\frac{Neg.Acum}{CAD}\right)}, & \text{se } P - ET_c < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (28)}$$

O valor da CAD pode ser multiplicado pela profundidade radicular, para considerar apenas a capacidade. Assim, todos os valores de CAD podem ser substituídos pelos valores de *TAW*. Determinado o armazenamento, é possível verificar a alteração de água no solo

(ALT , mm, Equação 29) que se refere à diferença dos ARM , sempre mantendo os sinais positivos e negativos, o que mostra se houve ou não aumentou na quantidade de água no solo.

$$ALT = ARM_i - ARM_{i-1} \quad \text{Eq. (29)}$$

A evapotranspiração real (ET_a , mm, Equação 30), é calculada em relação à alteração de água no solo e nunca será um valor negativo.

$$ET_a = \begin{cases} ET_c, & se\,ALT \geq 0 \\ P + |ALT|, & se\,ALT < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (30)}$$

Com a ET_a é possível verificar se houve deficiência hídrica (DEF , mm, Equação 31), ou seja, o DEF indica o quanto faltou de evapotranspiração para a cultura.

$$DEF = ET_c - ET_a \quad \text{Eq. (31)}$$

O método apresenta também o excedente hídrico (EXC , mm, Equação 32) que é a quantidade de água que se perde em períodos chuvosos, podendo ser determinado de duas formas: quando o ARM for menor que a CAD , o que mostra que houve um abastecimento de água no solo; e quando ARM estiver igual a CAD , mostrando que o solo está armazenando sua capacidade máxima de água.

$$EXC = \begin{cases} 0, & se\,ARM > CAD \\ (P - ET_c) - ALT, & se\,ARM \leq CAD \end{cases} \quad \text{Eq. (32)}$$

Assim, o balanço hídrico é a diferença entre o excedente hídrico e o déficit apresentado no período determinado.

Para tanto, tem-se que os dados agrometeorológicos, juntamente com os dados de solo e os coeficientes da FAO, apresentados por Allen et al. (1998), que são utilizados para o cálculo do BHTM (Figura 28).

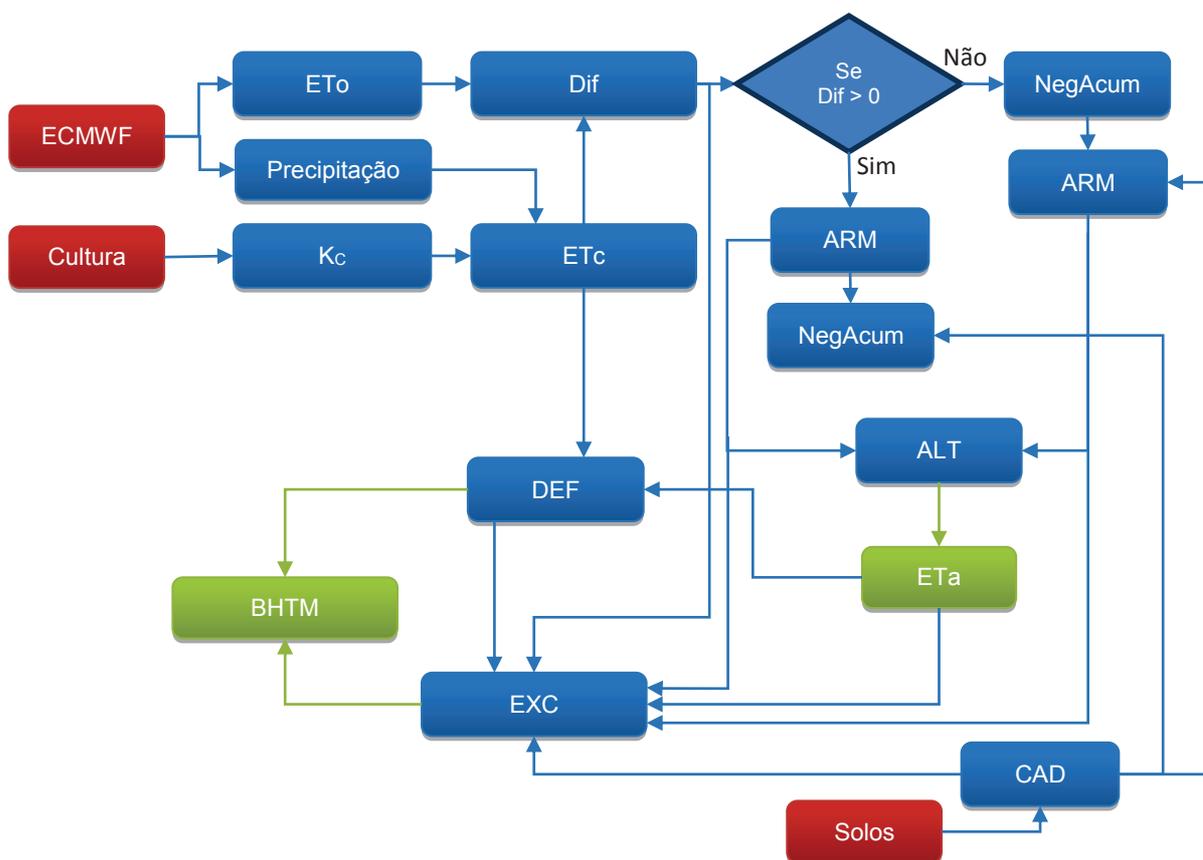


Figura 28 Fluxograma do método do Thornthwaite e Mather (BHTM).

3.6 Índice de Colheita Cc

Para a determinação dos índices de colheita foi necessário estimar a produtividade potencial, que foi calculada pelo método de Kassam (1955). Utilizando-se de dados de áreas monitoradas, foi possível determinar o valor do índice de colheita Cc. Para esta calibração, foram utilizadas oito propriedades com dados reais de produtividade, produtividade observada (Yobs), no estado do Paraná (Tabela 2 e Figura 29) entre os anos-safras 2007/2008 e 2012/2013.

Eventuais datas, de semeadura e colheita, não foram registradas pelos produtores; logo, foi necessária a obtenção de tais datas para determinação do balanço hídrico da cultura da soja. O método utilizado foi apresentado por Becker (2013) e Grzegozewski et al. (2013) que demonstraram que por meio do perfil temporal de EVI é possível determinar o ciclo da cultura; data de semeadura, pico vegetativo e data de colheita.

Para o cálculo de ETa foram utilizados dois métodos: (BHFAO) método do balanço hídrico do esgotamento (FAO), apresentado por Allen et al. (1998), e (BHTM), o método do balanço hídrico apresentado por Thornthwaite e Mather (1955).

Assim, foi possível trilhar o caminho inverso (Figura 30), determinando, dessa forma, os valores do índice de colheita (Cc) de maneira tal que o valor obtido na estimativa de Y_a fosse igual ao valor da produtividade observada das propriedades monitoradas.

Tabela 2 Dados de área (ha), data de semeadura, data de colheita e produtividade Yobs(kg ha⁻¹) das propriedades monitoradas

Propriedades	Área (ha)	Data de Semeadura	Data de Colheita	Yobs (kg ha ⁻¹)
1	53	08/10/2007*	10/02/2008*	3389
1	53	29/09/2008*	10/02/2009*	1892
1	53	30/09/2009	10/02/2010	3515
1	53	30/09/2010	26/02/2011	3353
1	53	30/09/2011	10/02/2012	1250
1	53	05/10/2012	22/01/2013	3713
2	162	30/09/2007*	17/01/2008*	2995
2	162	13/09/2008*	17/01/2009*	2385
2	162	16/10/2010	18/02/2011	3563
2	162	22/09/2011	02/02/2012	2203
2	162	07/10/2012	25/01/2013	3252
3	110	06/11/2012	02/03/2013	3395
4	22	18/01/2013	27/04/2013	2459
5	23	18/01/2013	24/04/2013	2362
6	71	07/11/2012	18/03/2013	3973
7	73	16/11/2012	19/03/2013	4332
8	81	16/11/2012	25/03/2013	4159

* Datas obtidas por perfil temporal de EVI

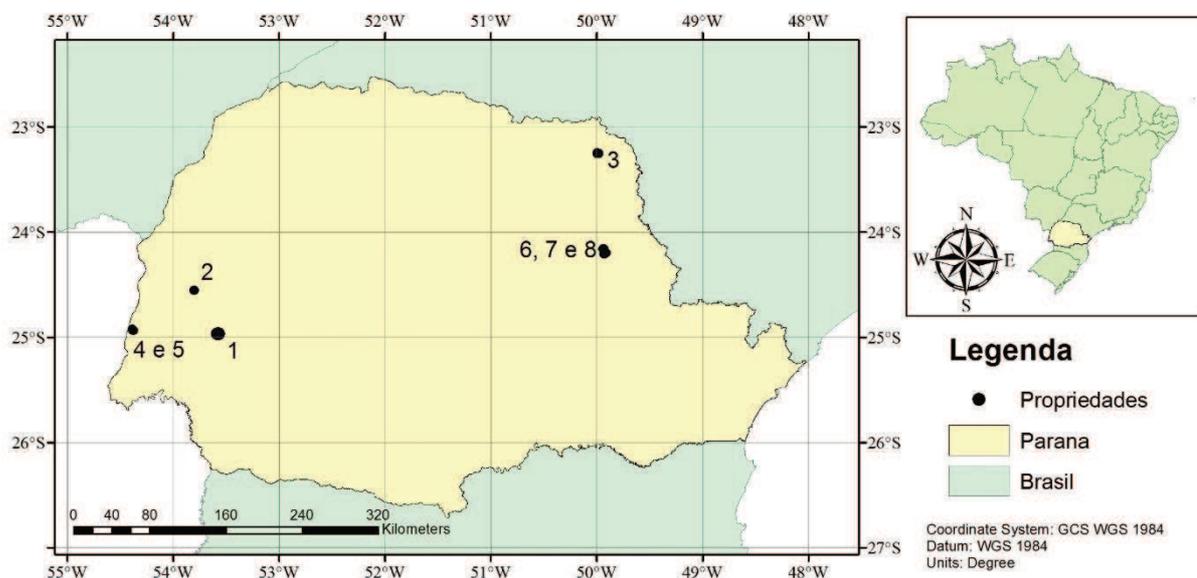


Figura 29 Propriedades agrícolas monitoradas para a calibração do índice de colheita (Cc) no estado do Paraná.

Obtendo, dessa forma, os índices de colheita C_{CBHFAO} e C_{CBHTM} , e a média entre eles ($C_{cmédio}$), os métodos BHFAO e BHTM apresentam, obviamente, os mesmos valores de ETC e valores diferentes na estimação da evapotranspiração real, obtendo as estimativas ET_{aBHFAO} e ET_{aBHTM} , sendo todos dados de entrada nos modelos FAO e CASA.

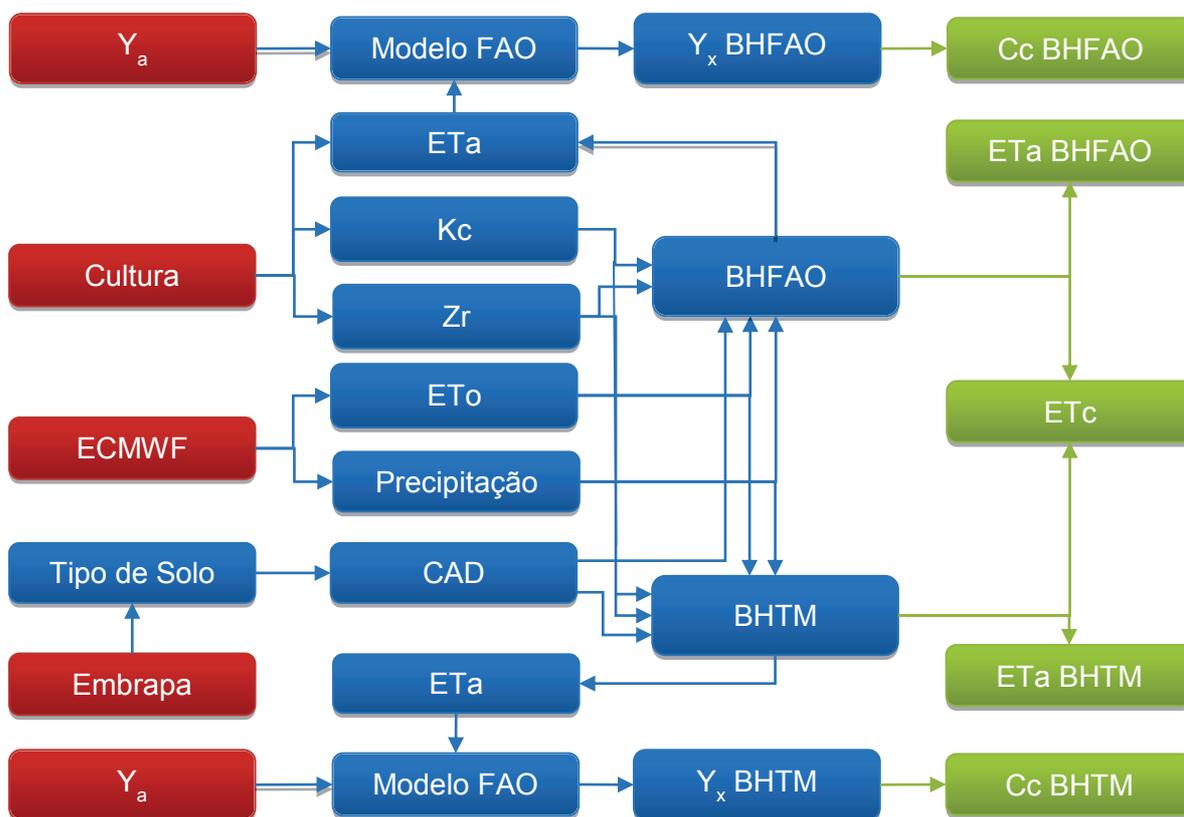


Figura 30 Fluxograma para a calibração do índice de colheita (C_c) considerando os balanços hídricos obtidos pelos métodos propostos por: (BHFAO) por Allen et al. (1998); (BHTM) por Thorthwaite e Mather (1955).

Por fim foram estimados os valores de produtividade atingível baseados nos valores médios de C_c pelas duas metodologias (

Tabela 9). Após isso, foram realizados testes T-Student para comparação de médias de amostras independentes entre os valores de Y_a por ambos os métodos e valores de Y_{Real} com nível de significância de 5%. Um detalhamento completo encontra-se no Apêndice B.

3.7 Modelo Agrometeorológico

Os dados da cultura da soja, como profundidade do sistema radicular e coeficientes da cultura (k_c , k_y , p) foram obtidos do boletim nº 56 da FAO (ALLEN et al., 1998). Além disto, foram utilizados dados de data de semeadura e de colheita, obtidos a partir de séries espectro-temporais do índice de vegetação EVI, conforme a metodologia apresentada por Becker (2013).

A cultura da soja foi considerada como padrão, conforme descrita e caracterizada por Allen et al. (1998) (Tabela 3). Os coeficientes da cultura (k_c) são apresentados para o estágio inicial, médio e final. Já o coeficiente de produtividade (k_y), de profundidade máxima das raízes (Z_r , em metros) e o fator de esgotamento p são fixos para todo ciclo da cultura.

Tabela 3 Valores de referência para cultura da soja

Culturas	K_c inicial	K_c médio	K_c final	Z_r max	K_y	ρ
Soja	0,40	1,15	0,50	0,60	0,80	0,50

Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998).

Os valores de k_c e Z_r (Tabela 4 e Figura 31) utilizados foram atribuídos de acordo com o estágio fenológico de desenvolvimento da cultura, conforme metodologia apresentada por Johann (2012). Desta forma, considera-se que a cultura possui características diversas em suas diferentes fases, ou seja, a cultura possui maiores necessidades em seu florescimento do que em seu estabelecimento.

Tabela 4 Valores de referência ponderados por estágio fenológico das culturas de soja e milho

Cultura	Estádio de desenvolvimento das culturas				
	Estabelecimento	Vegetativo	Florescimento	Enchimento de Grãos	Colheita
Soja	K_c				
	0,40	0,80	1,15	0,80	0,50
Soja	Z_r				
	0,10	0,25	0,60	0,60	0,60

Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998).

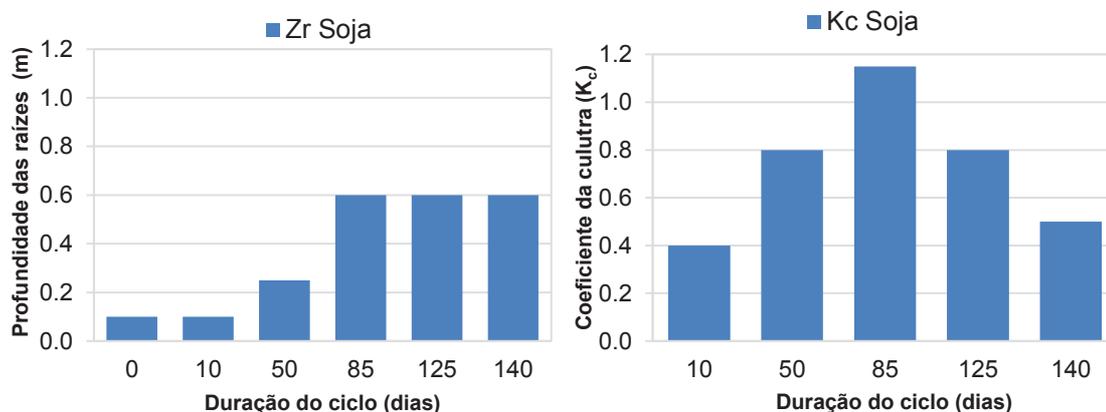


Figura 31 Profundidade de raízes (Z_r) e coeficiente da cultura (K_c) de soja e milho durante o ciclo das culturas.

Os dados de entrada no modelo estão separados em dados: de tipo de solo, da cultura, agrometeorológicos e obtidos ao campo. Assim, para cada tipo de solo verifica-se o valor da CAD (mm) e com isso calcula-se o total de água disponível no solo e a água prontamente disponível no solo. Os fatores da cultura, como ciclo, profundidade de raiz (Z_r), coeficiente da cultura (k_c) e os dados de evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação, são necessários para determinação dos balanços hídricos, BHFAO e BHTM, que, por sua vez, determinam os valores de evapotranspiração real (ET_a por BHFAO e ET_a por BHTM). Juntamente com isso, foram utilizados os valores dos índices de colheita, sendo uma para cada método de balanço hídrico e um valor médio ($CC_{médio}$, CC_{BHFAO} e CC_{BHTM}).

Logo, calcula-se a produtividade atingível utilizando-se da evapotranspiração real pelo BHFAO e pelo BHTM, obtendo, assim, quatro estimativas de produtividade atingível. Duas pelo BHFAO, com $Cc_{médio}$ e Cc_{BHFAO} , outras duas estimativas pelo BHTM, com $Cc_{médio}$ e Cc_{BHTM} (Figura 32). O detalhamento completo encontra-se no Apêndice C.

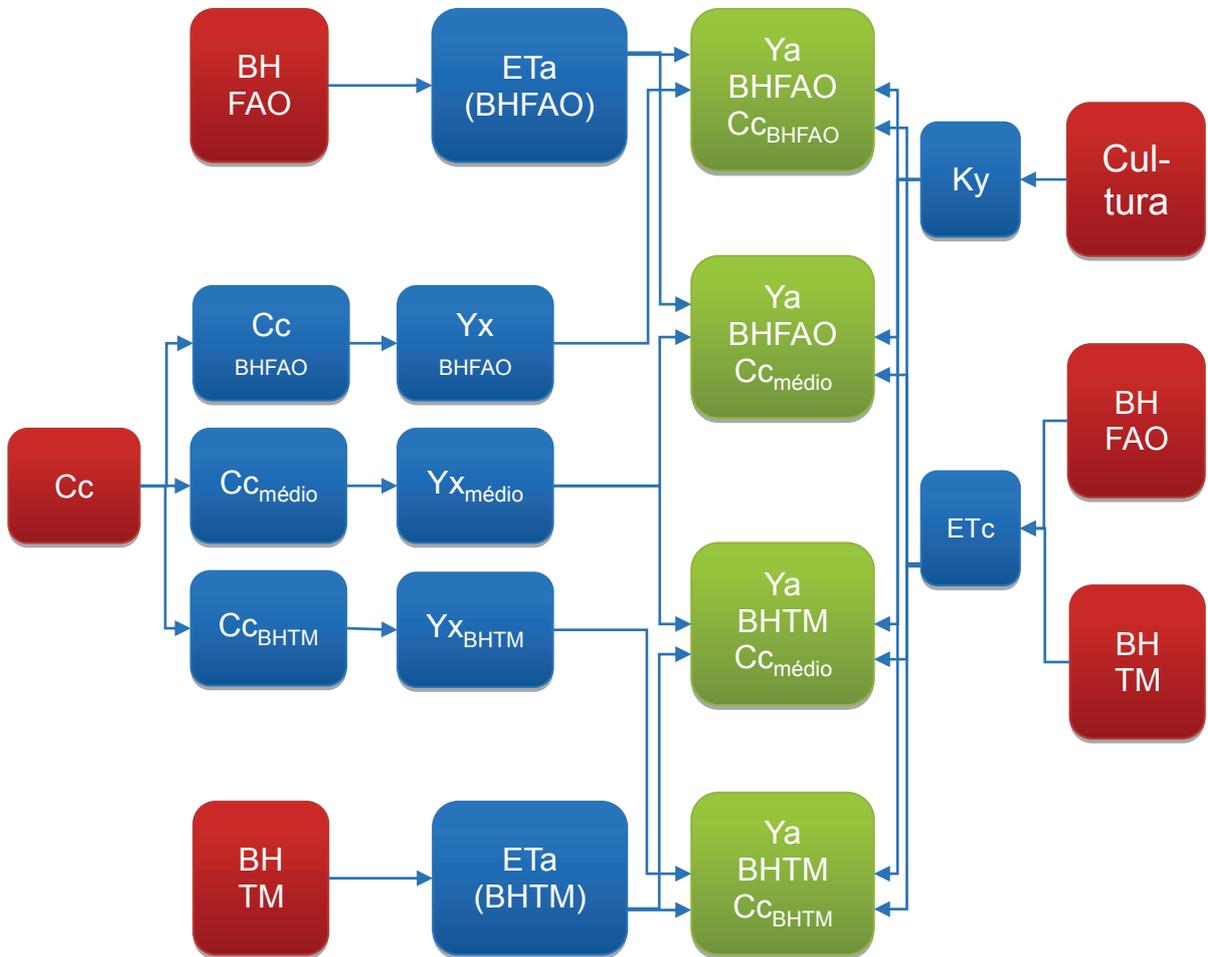


Figura 32 Fluxograma geral do modelo FAO.

Já a determinação do ciclo da cultura, datas de semeadura, colheita e duração do ciclo foi realizada conforme a metodologia apresentada por Becker (2013), que, utilizando o *software* TIMESAT, identificou no perfil temporal de EVI as datas de semeadura, colheita e pico vegetativo. Um exemplo de um perfil temporal de EVI em que diversas informações podem ser obtidas conforme listadas e representadas no perfil temporal (Figura 33):

- Data e valor do índice de vegetação (IV) do início do ciclo da cultura;
- Data e valor do IV do final do ciclo da cultura;
- Valor do IV na fase de crescimento do perfil, que corresponde a um nível de 80%;
- Valor do IV na fase de decréscimo do perfil, que corresponde a um nível de 80%;
- Data e valor do IV do pico vegetativo da cultura;
- Amplitude do perfil do IV;

g) Ciclo da cultura (duração);

h) Área que representa o efeito acumulado do crescimento da vegetação ao longo do ciclo da cultura, em termos de IV, contado a partir da linha imaginária (ponto de início do ciclo (a) ou ponto do final do ciclo (b));

i) Área que representa o efeito acumulado do crescimento da vegetação ao longo do ciclo da cultura, em termos de IV, contado deste o eixo x do gráfico.

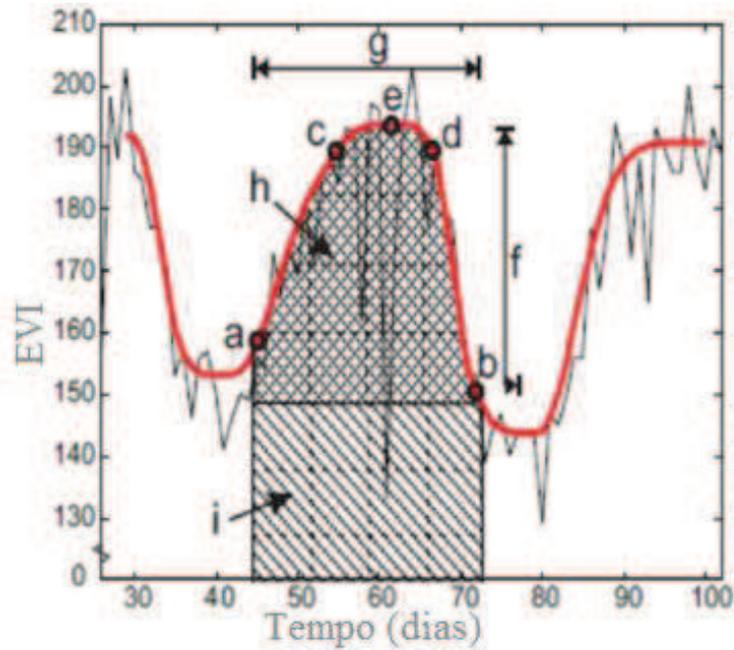


Figura 33 Perfil Temporal de EVI.
Fonte: Adaptado de Johann (2012).

3.5 Modelo Espectral

Para o modelo espectral foi utilizado o modelo GLO-PEM2 (GOETZ et al., 1999), que considera: a produtividade primária bruta (GPP, gC m⁻²), a banda do vermelho e a temperatura de superfície para a determinação da produtividade. Para estes dados espectrais foram utilizados os produtos MODIS, plataformas Terra e Aqua (Tabela 5).;

Tabela 5 Produtos MODIS utilizados para o modelo espectral GLO-PEM2

Nome do Produto	Plataforma	Dados do Produto MODIS	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal
MOD17A2	Terra	<i>Gross Primary Productivity</i>	1000m	8 dias
MYD17A2	Aqua	<i>Gross Primary Productivity</i>	1000m	8 dias
MOD11A2	Terra	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000m	8 dias
MYD11A2	Aqua	<i>Land Surface Temperature & Emissivity</i>	1000m	8 dias

FONTE: Adaptado de USGS (2014).

Para compatibilização e padronização das datas, de forma que todos os modelos apresentassem variações decêndias, foi determinado que os valores seriam referenciados de acordo com suas datas. Assim, as cenas, datas por dias julianos foram alocadas conforme suas datas fossem ao encontro das datas decêndias (Tabela 6), seguindo as datas de semeadura e colheita de cada localidade, conforme Becker (2013).

Tabela 6 Padronização de datas do sensor com os decêndios utilizados

Sensor: Dia Juliano	→	Decêndio (ano-mês-decêndio)
Terra MOD: 257	→	2011-09-3
Terra MOD: 273	→	2011-10-1
Aqua MYD: 281	→	2011-10-2
Terra MOD: 289	→	2011-10-3
Terra MOD: 305	→	2011-11-1
Aqua MYD: 313	→	2011-11-2
Terra MOD: 321	→	2011-11-3
Aqua MYD: 329	→	2011-12-1
Aqua MYD: 345	→	2011-12-2
Terra MOD: 353	→	2011-12-3
Terra MOD: 001	→	2012-01-1
Aqua MYD: 009	→	2012-01-2
Terra MOD: 017	→	2012-01-3
Aqua MYD: 025	→	2012-02-1
Aqua MYD: 041	→	2012-02-2
Terra MOD: 049	→	2012-02-3
Aqua MYD: 057	→	2012-03-1
Terra MOD: 065	→	2012-03-2
Terra MOD: 081	→	2012-03-3
Aqua MYD: 089	→	2012-04-1

Com estes dados foi estimado o valor de NPP para o estado. Com isso, foi estimada a produtividade atingível da soja (Figura 34), sendo um modelo bastante simples em sua execução. Um detalhamento completo, passo a passo, encontra-se no Apêndice D.

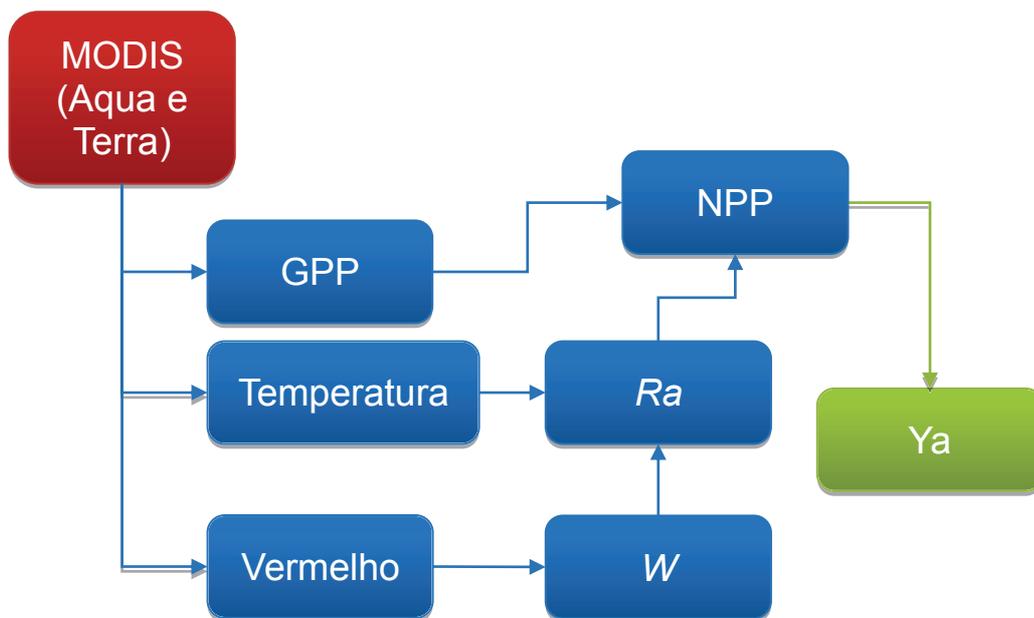


Figura 34 Fluxograma geral do modelo GLO-PEM2.

3.6 Modelo Agro-espectral

Para o modelo agro-espectral foi utilizado o modelo CASA (POTTER et al., 2012). Este se utiliza de dados espectrais de EVI e temperatura média e dados agrometeorológicos ET_c e ET_a . As informações espectrais foram obtidas dos produtos MODIS, plataformas Aqua e Terra (Tabela 7), já as informações agrometeorológicas foram obtidas pelos métodos BHFAO e BHTM.

Tabela 7 Produtos MODIS utilizados para o modelo CASA

Nome do Produto	Plataforma	Dados do Produto MODIS	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal
MOD13Q1	Terra	Vegetation Indices	250m	16 dias
MYD13Q1	Aqua	Vegetation Indices	250m	16 dias
MYD11A2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	1000m	8 dias
MOD11A2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	1000m	8 dias

FONTE: Adaptado de USGS (2014).

Logo, o modelo apresentará duas estimativas de produtividade (Figura 35), devido aos dois métodos diferentes BHFAO e BHTM para determinação da ET_a . O modelo também apresentará duas estimativas de NPP, sendo que estas, juntamente com a estimativa de NPP do modelo espectral GLO-PEM2, serão comparadas. Um detalhamento completo, passo a passo, do modelo CASA encontra-se no Apêndice E.

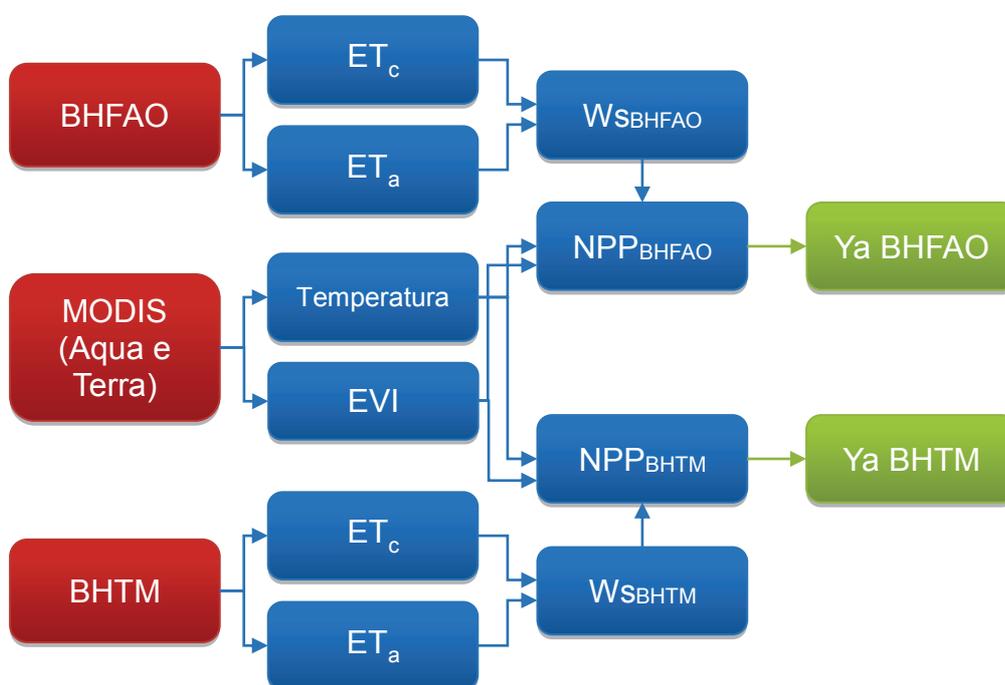


Figura 35 Fluxograma geral do modelo CASA.