

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO<sub>2</sub> E NDVI EM  
CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL**

**Kamila Cunha de Meneses**  
Engenheira Agrônoma

**2018**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO<sub>2</sub> E NDVI EM  
CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL**

**Kamila Cunha de Meneses**

**Orientador: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim**

**Coorientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

**2018**

M543f Meneses, Kamila Cunha de  
Fluorescência induzida pelo sol, Xco<sub>2</sub> e NDVI em cana-de-açúcar do Centro-Sul do Brasil / Kamila Cunha de Meneses. -- Jaboticabal, 2018  
xix, 84 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018

Orientador: Glauco de Souza Rolim

Coorientador: Newton La Scala Junior

Banca examinadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra, Jansle Vieira Rocha

Bibliografia

1. Fenologia. 2. MODIS. 3. NASA/POWER. 4. OCO-2. 5. Produtividade. 6. Sacarose I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4: 633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO<sub>2</sub> E NDVI EM CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL

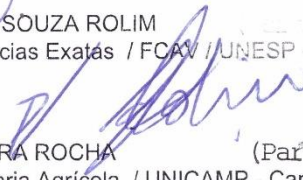
**AUTORA: KAMILA CUNHA DE MENESES**

**ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM**

**COORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. JANSLE VIEIRA ROCHA (Participação por Videoconferência)  
Faculdade de Engenharia Agrícola / UNICAMP - Campinas/SP

  
Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 28 de fevereiro de 2018

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**Kamila Cunha de Meneses** – Filha de Francisco Feitosa de Meneses e Maria dos Milagres dos Santos Cunha, nasceu em Alcântara, Maranhão, no dia 06 de novembro de 1991. cursou Agronomia pela Universidade Federal do Maranhão – Câmpus IV, de Chapadinha – MA, de 2009 a 2013. Foi bolsista de extensão da PROEX-UFMA, no período de 2011 a 2013, voluntária de projetos de iniciação científica e monitora das disciplinas Hidráulica Agrícola e Irrigação e Drenagem. Em 2013 e 2014, foi Assistente da Equipe de pesquisa da empresa ECODIMENSÃO, na área de meio ambiente e produção para coleta de dados e auxílio na elaboração de Relatórios Antropológicos de quatro comunidades remanescentes de Quilombo, no Estado do Maranhão. Em 2014 e 2015, participou da Equipe Técnica da Cooperativa de Trabalho e Serviços Técnicos – COOSERT, desenvolvendo atividades de Assistência Técnica e Extensão Rural, no âmbito do contrato INCRA/COOSERT/CRT-MA N° 25.000/2014. Em 2015, foi professora de matemática e física da Casa Familiar Rural do município de Chapadinha - MA. Em agosto de 2016, ingressou no Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. É Integrante dos grupos de pesquisa: i) “Group of Agrometeorological Studies” (GAS); ii) Caracterização de Aspectos Diversos da Emissão de CO<sub>2</sub> do Solo, ambos da Unesp – Câmpus de Jaboticabal, e iii) Manejo Sustentável de Sistemas Agropecuários da UFMA – Câmpus IV. Em fevereiro de 2018, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*

***Arthur Schopenhauer***

## **DEDICO**

A Deus, pela força, coragem, saúde e sabedoria para não desistir de meus sonhos.

Aos meus pais, Maria dos Milagres dos Santos Cunha e Francisco Feitosa de Meneses, que são meus maiores exemplos de simplicidade, humildade e amor incondicional.

## **OFEREÇO**

À minha família, por ser meu porto seguro e aconchego.

À professora Maryzélia Furtado de Farias, pelo apoio e incentivo incondicional na continuação de meus estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, acima de tudo pelo dom da vida e por ter mantido acesa minha fé, pela reabilitação de minha saúde para a continuação desta jornada e por estar sempre presente em minhas orações, acalmando meu coração nos momentos de saudades. A meus pais, Francisco Feitosa de Meneses e Maria dos Milagres dos Santos Cunha, por todo apoio e pelos esforços que realizaram durante esta jornada. Sinto-me honrada pela alegria de vocês perante minhas conquistas. Muito obrigada e amo muito vocês!

Ao professor Glauco de Souza Rolim, meu orientador, pela competência científica, amizade, dedicação, ensinamentos e por possibilitar a realização de mais uma etapa de minha vida. Por ser esse “líder” que incentiva em seguir em frente e por fazer toda diferença em minha vida.

Ao professor Newton La Scala Júnior, meu coorientador, pela competência científica, pela disponibilidade de orientação, ensinamentos, amizade e dedicação demonstrados nesta jornada. Obrigada pelo incentivo e pelo apoio de sempre!

Aos professores membros da banca de qualificação, Marcílio Vieira Martins Filho e Cristiano Zerbato, por terem aceitado fazer parte da banca e pelas contribuições que engradeceram este estudo e aos professores membros da banca de defesa, Teresa Cristina Tarle Pissara e Jansle Vieira Rocha. Muito obrigada!

A meus irmãos, Klara Cunha de Meneses, Matheus Cunha de Meneses e Anderson Cunha de Meneses, pela torcida e pelo apoio durante esta jornada. Sou grata por vocês serem meus irmãos!

A meus primos de coração, Sérgio Ercílio Simões Machado e Pietro Bittencourt Almeida Simões, Emília Victória Simões Cabral Coimbra e Antônio Cabral Coimbra Júnior, pelos momentos de diversão durante as férias.

À Maria das Graças Ribeiro Simões (mamãe dois), Keillany Ribeiro Simões, Kelly Cristina Ribeiro Simões e Elizângela Ribeiro Simões, pelo carinho e pelo cuidado comigo durante todos estes anos.

Ao Osvaldo da Costa Simões Segundo e Aída Maria Bittencourt Almeida Simões pelo apoio, pela amizade e pelo cuidado nesta jornada. Muito obrigada!



A todos os meus familiares que me apoiaram nesta jornada com palavras de incentivo, mesmo distantes, em especial a meus avós.

À Katharine Viana Batista, “roommate” e amiga, pela amizade e pelos cuidados durante esta jornada.

Ao Gustavo André de Araújo Santos e à Camila Vieira da Silva, pela amizade, pelos momentos de descontração e pelos convites aos melhores almoços, em estilo maranhense.

A meus amigos e parceiros científicos, Tayanara Tuany Borges Valeriano, José Reinaldo da Silva Cabral de Moraes, Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido, Víctor Brunini Moreto e João Trevizoli Esteves, pelo aprendizado, pelo carinho e pelos momentos de descontração, por nunca terem poupado esforços para me auxiliar durante esta etapa. Vocês são feras!

Ao Grupo de Pesquisa em Agrometeorologia da Unesp – GAS, por todo suporte e contribuição em meu crescimento profissional.

À Bruna de Oliveira Silva e Ludhanna Marinho Veras, pela amizade e pelos convites que quase sempre eu “furava”, mas com o término desta pesquisa tenho a certeza de que eu aceitarei.

A meus amigos e colegas de departamento, Luiz Fernando Favacho Morais Filho, Thiago de Andrade Águas, Maria Elisa Vicentini, Paulo Alexandre da Silva, Deise Cristina Santos Nogueira, Aline Moreno Ferreira, Kárita Almeida Silva, Valter Barbosa dos Santos e Clariana Valadares Xavier, pelo carinho, pelos cuidados, pelo apoio e pelos conselhos nesta jornada.

À Mara Regina Moitinho, ao Daniel de Bortoli Teixeira e Diego Silva Siqueira, pela amizade e por compartilhar ensinamentos e experiências, que enriqueceram tanto minha vida profissional como pessoal.

Aos professores do Departamento de Ciências Exatas, em especial, aos professores Gener Tadeu Pereira, Euclides Braga Malheiros, Ademar Sanches, Antônio Sérgio Ferraud e Alan Rodrigo Panosso, pelos ensinamentos, pelo convívio e pelas palavras de incentivo.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Maria José Servidone Trizólio, Shirley Aparecida Martineli de Sousa, Adriana Elisabete Takakura e Norival

Ignácio, pela amizade, pelo profissionalismo, pela recepção e pelos cuidados que sempre tiveram comigo.

Aos funcionários da Estação Meteorológica da FCAV/Unesp, Vanessa Sayury Souza e Carlos Alberto Santa Capita (Carlão), pelo apoio e pela amizade de sempre.

À Simone da Silva Gomes e Nélide Elizabeth Quiñonez Silvero, pela amizade, pelo companheirismo e por me ensinarem a apreciar e a preparar um bom tereré.

À Juliana Mariano Carvalho, por ser essa pessoa querida, amiga e cuidadosa comigo.

À Ana Carolina Lobo, Jéssica Brito e Geziel Silva, pela amizade, pelo carinho e por deixarem minhas férias mais animadas.

A todos os amigos que eu fiz durante estes anos, obrigada por vocês compreenderem minha ausência, pelas mensagens, pela torcida e pelo carinho que vocês sempre demonstraram por mim.

À Milene Moara e Elizabeth Kazama, ao Reginaldo Oliveira e Laércio Santos, pela amizade e apoio.

À dona Marisa, pelo acolhimento e pelos cuidados que prestou nas primeiras semanas em que cheguei a Jaboticabal.

Ao fisioterapeuta Pedro Luiz Franchini e suas assistentes, Isabel e Cláudia, pelos cuidados, amizade, profissionalismo e pelas tardes agradáveis de fisioterapia.

À neurologista Iara Grisi Souza e Silva, por cuidar de meu caso, pela esperança em mim depositada e pelo incentivo em continuar a lutar por este meu sonho.

Aos professores da Universidade Federal do Maranhão – Câmpus IV, pelos ensinamentos, pelo incentivo e por despertar meu interesse pela pesquisa e pelo ensino.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade em cursar o mestrado e por utilizar uma ferramenta de comunicação via Internet, nas entrevistas, assim diminuindo as barreiras dos candidatos com pouco poder aquisitivo e de regiões distantes em participar de todas as etapas do processo seletivo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa para a condução deste estudo.

**A vocês, minha Gratidão!**

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO 1 – Considerações gerais</b> .....	<b>19</b>
<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>19</b>
1.1 A importância da cultura da cana-de-açúcar.....	19
1.2 Cana-de-açúcar e os aspectos climáticos.....	21
1.3 Modelos de Circulação Geral – GCMs.....	24
1.4 Satélite Observatório do Carbono Orbital 2 - OCO-2.....	25
1.5 Dados orbitais para a compreensão da dinâmica fotossintética.....	26
1.5.1 Fluorescência da clorofila induzida pelo Sol - SIF.....	26
1.5.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI.....	31
1.5.3 Coluna média de CO <sub>2</sub> – Xco <sub>2</sub> .....	34
1.6 Objetivo geral.....	35
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 2 – Satellite-based Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, NDVI, and column-averaged CO<sub>2</sub> concentration over sugarcane areas in South-Central Brazil</b> .....	<b>54</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>54</b>
2.1 Introduction.....	55
2.2 Material and methods.....	56
2.2.1 Location and Description of the Study Area.....	57
2.2.2 Meteorological data, SIF, Xco <sub>2</sub> , and NDVI.....	58
2.2.3 Analysis of Results.....	60
2.3 Results.....	60
2.4 Discussion.....	72
2.4.1 Temperature and precipitation.....	72
2.4.2 Hydric balance.....	72
2.4.3 Sugarcane yield and quality.....	73
2.4.4 SIF, XCO <sub>2</sub> , and NDVI.....	73

2.4.5 Principal Component Analysis (PCA) .....	74
2.5 Conclusion.....	76
<b>References</b> .....	<b>77</b>

## FLUORESCÊNCIA INDUZIDA PELO SOL, XCO<sub>2</sub> E NDVI EM CANA-DE-AÇÚCAR DO CENTRO-SUL DO BRASIL

**RESUMO** - O sensoriamento remoto é uma ferramenta importante no monitoramento e na previsão da qualidade e da quantidade de cultivos. Nos últimos anos, surgiram satélites com melhores resoluções espaciais, temporais e, principalmente, novos produtos, como a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF), a coluna média de CO<sub>2</sub> atmosférico (XCO<sub>2</sub>), além do Índice da Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). A cana-de-açúcar é o principal cultivo para a produção de açúcar e bioenergia no mundo. A hipótese deste estudo é que o SIF e o XCO<sub>2</sub> têm correlação com a taxa fotossintética, e o NDVI avalia o vigor do dossel ligado à biomassa verde. O estudo teve como objetivo analisar a relação entre SIF, XCO<sub>2</sub> e NDVI com a produtividade e o nível de açúcar da cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em locais representativos de uma das principais regiões de produção de cana-de-açúcar do mundo, na região Centro-Sul do Brasil. Quatro locais de estudo foram identificados para representar a região, sendo Pradópolis, Araraquara e Itacemópolis, no Estado de São Paulo, e Quirinópolis, no Estado Goiás, Brasil. Os dados foram coletados no período de 2015 a 2016, em sistemas de dados orbitais. Para as análises meteorológicas, foram utilizados dados diários ajustados na escala mensal. Os dados de toneladas de cana por hectare (TCH, em t ha<sup>-1</sup>) e o açúcar total recuperável (TSR, em kg t<sup>-1</sup>) foram coletados de talhões de cana-de-açúcar de empresas da região e estratificados por nível de município, no período entre abril e novembro dos anos agrícolas de 2015/2016 e 2016/2017. Foram observadas fortes correlações lineares negativas entre os valores médios de SIF e XCO<sub>2</sub>, provavelmente devido à forte taxa fotossintética associada à cultura da cana-de-açúcar. Ocorreram correlações negativas entre SIF e NDVI, devido à natural senescência das folhas em talhões maduros, compreendendo um grande período no ciclo da planta. O período de maturação também resultou numa correlação positiva entre XCO<sub>2</sub> e NDVI devido à diminuição de atividade fotossintética em talhões. Houve relação de SIF, XCO<sub>2</sub> e NDVI com a produtividade e a quantidade de açúcar em cana-de-açúcar. O aumento de SIF correspondeu ao crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, os valores de XCO<sub>2</sub> indicaram o estabelecimento e a colheita do cultivo, e o NDVI, a fase de maturação da área. Foi possível estabelecer padrões sazonais de SIF, XCO<sub>2</sub> e NDVI para o desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar. Esses resultados indicam o potencial da SIF, XCO<sub>2</sub> e NDVI na previsibilidade e no monitoramento de cultivos agrícolas.

**Palavras-chave:** fenologia, MODIS, NASA/POWER, OCO-2, produtividade, sacarose

## **SOLAR-INDUCED FLUORESCENCE, XCO<sub>2</sub> AND NDVI IN SUGARCANE IN THE SOUTH-CENTRAL OF BRAZIL**

**ABSTRACT** - Remote sensing is an important tool for monitoring and forecasting the quality and quantity of crops. In recent years, satellites with better spatial and temporal resolutions and, mainly, new products, such as the Solar-induced chlorophyll Fluorescence (SIF), the average column of atmospheric CO<sub>2</sub> and normalized difference vegetation index. The Sugarcane is the main crop for sugar and bioenergy production in the world. Our hypothesis is that SIF and Xco<sub>2</sub> have a correlation with the photosynthetic rate and NDVI evaluate the canopy vigor, linked to the green biomass of crops. Thus, the objective of this study was to analyze the relationship between SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI with sugarcane yield and sugar level. The study was conducted in representative locations of one of the main regions of sugarcane production in the world, in the Center-South region of Brazil. Four study locations were identified to represent the region being, Pradópolis, Araraquara, and Iracemópolis in the São Paulo (SP) state and Quirinópolis in the Goiás (GO) state, Brazil. The data were collected in the period from 2015 to 2016 in orbital data systems. The meteorological analyses were used daily data adjusted in the monthly scale. The data of tons of cane per hectare (TCH, in t ha<sup>-1</sup>) and total sugar recovery (TSR, in kg t<sup>-1</sup>) were collected from sugarcane plots of companies in the region and stratified by level of the municipality in the period between April and November of the growing seasons 2015/2016 and 2016/2017. We observed strong negative linear correlations between the mean values of SIF and Xco<sub>2</sub>, probably due to the strong photosynthetic rate associated with the sugarcane crop. Negative correlations occurred between SIF and NDVI, due to the natural senescence of the leaves in mature plots comprising a large period in the vegetative cycle of the plant. The maturation period also resulted in a positive correlation between Xco<sub>2</sub> and NDVI due to the decrease of photosynthetic activity in plots. There was a relationship of SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI with the yield and sugar quantity in sugarcane. The increase of SIF corresponded to the vegetative growth of the sugarcane, the values of Xco<sub>2</sub> indicated the establishment and harvest of the crop and NDVI, the maturation phase of the area. It was possible to establish seasonal patterns of SIF, Xco<sub>2</sub> and for the development of sugarcane crop. These results indicate the potential of SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI in the predictability and monitoring of agricultural crops.

**Keywords:** phenology, MODIS, NASA/POWER, OCO-2, yield, sucrose

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% - Porcentagem

°C – Grau Celsius

**A – train** – Afternoon Constellation

**AET** – Actual evapotranspiration

**APAR** – Absorbed photosynthetically active Radiation

**CAD** – Capacidade de Água Disponível

**CANASAT** – Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélite

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de carbono

**DEF** – Deficiência hídrica

**EOS** - Earth Observing System

**EVI** - Índice de Vegetação Melhorado

**EXC** – Excedente hídrico

**FQY** - Rendimento Quântico de Fluorescência

**GAS** - Group of Agrometeorological Studies

**GCMs** - Modelos de Circulação Geral

**GEOS-5** - NASA Goddard's Global Modeling and Assimilation Office, version 5

**GOME-2** - Global Ozone Monitoring Experiment–2

**GOSAT** - Greenhouse gases Observing SATellite

**GPP** - Produtividade Primária Bruta

**ha** - Hectare

**Kg t<sup>-1</sup>** – Quilograma por tonelada

**Km** – Quilômetro

**Lat** - Latitude

**LIF** - Fluorescência Induzida por Laser

**Long** - Longitude

**LUE** - Eficiência energética

**MCRs** – Modelos de Circulação Regional

**MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>** - Megajoule por metro quadrado por dia

**mm** - Milímetro

**MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

**MODIS / AQUA** - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo do satélite Aqua (EOS PM-1)

**MODIS / TERRA** – Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo do satélite Terra (EOS AM-1)

**NASA** – National Aeronautics and Space Administration

**NASA / GIOVANNI** – Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure

**NASA / POWER** – NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources

**NDVI** – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

**nm** – NANÓMETRO

**OCO-2** – Orbiting Carbon Observatory 2

**P** - Precipitação

**PC1** - Principal Component 1

**PC2** - Principal Components 2

**PCA** - Principal Component Analysis

**PET** - Potential Evapotranspiration

**PIB** – Produto Interno Bruto

**ppm** - Partes por Milhão

**Qg** - Global Solar Radiation

**r** - Coeficiente de correlação de Pearson

**R<sup>2</sup>** - Coeficiente de determinação

**RH** - Relative Humidity

**SATveg** – Sistema de Análise Temporal da Vegetação

**SCIAMACHY** - SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography

**SIF** - Fluorescência da Clorofila Induzida pelo Sol

**STO** - Water storage in the soil

**T** - Temperatura

**TCCON** - Total Carbon Column Observing Network

**TCH** – Tons of Sugarcane per Hectare

**TRMM** - Tropical Rainfall Measuring Mission

**TRS** – Total Recoverable Sugars

**u<sub>2</sub>** - Wind speed

**W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> μn<sup>-1</sup>** - Watt por metro quadrado por esterradiano por micrómetro

**XCO<sub>2</sub>** - Coluna média de CO<sub>2</sub> atmosférico



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1. (Capítulo 1)</b> - Área de expansão da cana-de-açúcar durante 2003-2014 no Centro-Sul do Brasil. ....	20
<b>Figura 2. (Capítulo 1)</b> - Excitação da molécula da clorofila isolada. ....	27
<b>Figura 3. (Capítulo 1)</b> - Linhas de Fraunhofer no espectro. ....	29
<b>Figura 4. (Capítulo 1)</b> - Análise bibliométrica da “Solar-Induced chlorophyll Fluorescence”, pesquisada na Scopus, em dezembro de 2017. ....	31
<b>Figura 5. (Capítulo 1)</b> - Os efeitos da absorção e da reflectância nas plantas e os princípios básicos e valores do NDVI. ....	33
<b>Figure 1. (Capítulo 2)</b> - Main sugarcane-producing regions in Brazil and localities used in this study. ....	57
<b>Figure 2. (Capítulo 2)</b> - Average temperature (°C) and precipitation (mm) in a monthly period of 2015 - 2016 in localities: a) Araraquara–SP, b) Iracemópolis – SP, c) Pradópolis–SP and d) Quirinópolis–GO. ....	61
<b>Figure 3. (Capítulo 2)</b> - Surplus (EXC) (mm) e monthly water deficit (DEF) (mm) in localities: a) Araraquara – SP, b) Iracemópolis – SP, c) Pradópolis – SP, and d) Quirinópolis – GO in period de 2015 – 2016, estimated by Thornthwaite and Mather model (1955) with available water capacity equal to 100 mm. ....	62
<b>Figure 4. (Capítulo 2)</b> - Monthly Average Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) in relation to the analyzed localities: Araraquara-SP, Iracemópolis-SP, Pradópolis-SP, and Quirinópolis-GO in the 2015-2016 period. ....	63
<b>Figure 5. (Capítulo 2)</b> - Monthly average of tons of sugarcane per hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) in the localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemópolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO in the 2015-2016 period. ....	64
<b>Figure 6. (Capítulo 2)</b> - Monthly average of SIF-757nm, Xco <sub>2</sub> , and NDVI of four sugarcane producing localities between 2015 and 2016. P= Planting, B= Budburst, T= Tillering, D= Development, M= Maturation, H= Harvest. ....	65

<b>Figure 7. (Capítulo 2)</b> - Monthly moving averages of solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF 757nm), Column-Averaged CO <sub>2</sub> (Xco <sub>2</sub> ) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemópolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO, between 2015 and 2016. ....	68
<b>Figure 8. (Capítulo 2)</b> - Principal components analysis with variables. NDVI= Normalized Difference Vegetation Index, Xco <sub>2</sub> = Column-Averaged CO <sub>2</sub> , SIF= Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, EXC= Water Surplus, P= Precipitation, TCH= Tons of Sugarcane per Hectare, T= Temperature, TRS= Total Recovered Sugars, DEF= Water deficit, PC1= Principal Components 1, and PC2= Principal Components 2. ....	69
<b>Figure 9. (Capítulo 2)</b> - Response surface for Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) estimation in function Column-Averaged CO <sub>2</sub> (Xco <sub>2</sub> ) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). ....	70
<b>Figure 10. (Capítulo 2)</b> - Response surface for Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) estimation in function of Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF), Column-averaged CO <sub>2</sub> (XCO <sub>2</sub> ) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). a) TCH in function with NDVI and SIF, b) TRS in function with NDVI and SIF, c) TCH in function with SIF and Xco <sub>2</sub> , d) TRS in function with Xco <sub>2</sub> and SIF, e) TCH in function with Xco <sub>2</sub> and NDVI, and f) TRS in function with Xco <sub>2</sub> and NDVI. ....	71

## **CAPÍTULO 1 – Considerações gerais**

### **1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA**

#### **1.1 A importância da cultura da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é originária do Sudeste Asiático, especificamente na região da Indonésia e Guiné. Essa gramínea é da família das Poáceas e cultivada em áreas tropicais do planeta, principalmente nos países em desenvolvimento da África, do Sudeste Asiático e da América Latina (FAGUNDES; SILVA; BONFIM-SILVA, 2014; SILVA et al., 2014).

Historicamente, a primeira muda de cana-de-açúcar foi trazida ao Brasil em 1532 por Martim Affonso de Souza, iniciando seu cultivo na Capitania de São Vicente, período que ficou conhecido como Ciclo da Cana. Nesse lugar, ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar. No entanto, foi na região Nordeste do Brasil que os engenhos de açúcar se multiplicaram, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia (UDOP, 2017). A produção canieira foi responsável por uma transformação no quadro nacional, principalmente nos aspectos políticos, sociais e econômicos.

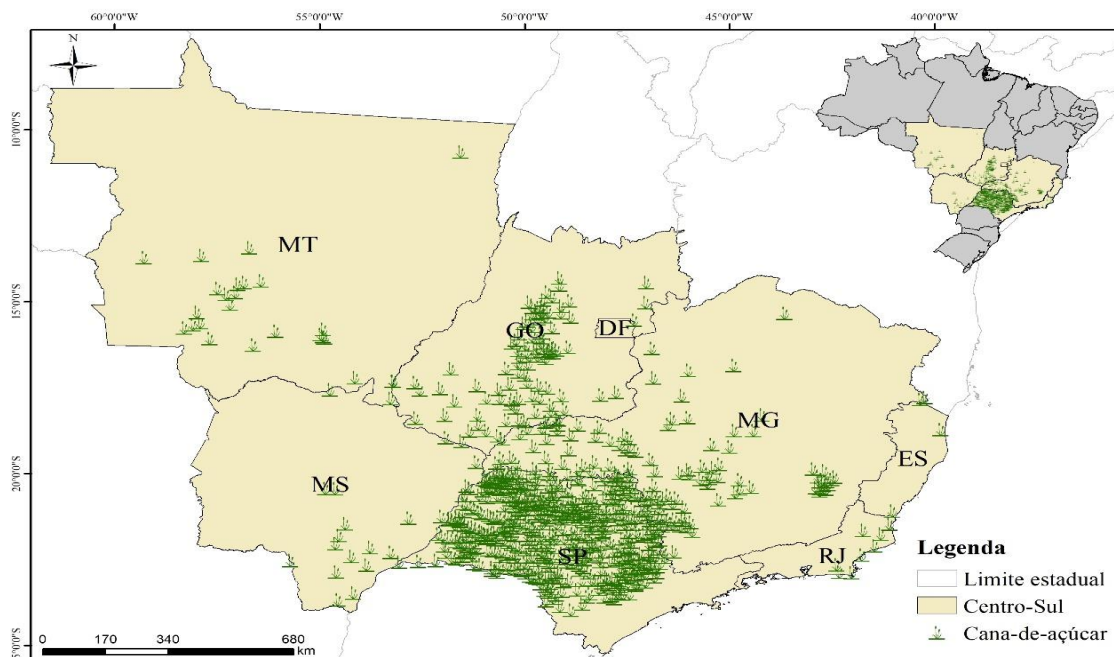
Atualmente, a cana-de-açúcar é a principal cultura produtora de açúcar e bioenergia no mundo, fornecendo cerca de 75% do açúcar produzido mundialmente para o consumo humano (MARIN et al., 2013; PHAN et al., 2016). A demanda de energia mundial para 2035 será de 41%, e os sistemas de produção de energia precisam aumentar sua produção anual em 6,4%. As fontes renováveis serão a principal forma para suprir essa demanda, que terá aumento em sua participação no consumo global de energia, de cerca de 2 a 7%, representando 3% dos combustíveis líquidos utilizados no mundo (VEIGA et al., 2018).

A cana-de-açúcar é cultivada em mais de 90 países, incluindo regiões de clima tropical e subtropical (SANTOS et al., 2015). O Brasil é o líder na produção de cana-de-açúcar devido a suas condições climatoedáficas e sua experiência acumulada ao longo dos anos (BORDONAL et al., 2018). Cerca da metade da produção total de cana-de-açúcar do Brasil é utilizada para produção de biocombustível (GUEVARA et al., 2017). Com isso, o Brasil é líder mundial na produção mundial de etanol oriunda de cana-de-açúcar.

A substituição da gasolina pelo etanol de cana-de-açúcar no Brasil tem contribuído, significativamente, na redução das emissões de gases de efeito estufa no setor energético, contribuindo, assim, para a mitigação dos efeitos associados às mudanças climáticas (BORDONAL et al., 2017).

O setor sucroenergético teve um dos maiores PIBs do agronegócio brasileiro no ano de 2015, com uma expansão de 5%, elevando a renda estimada de R\$ 107,87 bilhões para R\$ 113,27 bilhões, embora a economia do País tivesse uma desaceleração de 3,8% no PIB (CEPEA, 2017). A produção de cana-de-açúcar no Brasil, na safra de 2015/2016, foi de 657,7 milhões de toneladas, em uma área de 8.995,5 mil hectares. O Estado de São Paulo é responsável por 52% desta produção, e em segundo lugar o Estado de Goiás, com 10,1% (CONAB, 2016). Entre os anos de 1990 e 2016 houve a expansão da área plantada de cana-de-açúcar de 4,32 para 10,50 Mha, uma vez que a expansão das áreas de cana-de-açúcar dobrou nos últimos 10 anos, ultrapassando 10 milhões de hectares em 2016 (IBGE, 2017).

O cultivo da cana-de-açúcar nessas regiões ocorre principalmente sob condições de sequeiro, e esse aumento da produção do cultivo pode ser atribuído, principalmente, pela expansão para novas áreas (Figura 1).



**Figura 1.** Área de expansão da cana-de-açúcar durante 2003-2014 no Centro-Sul do Brasil, Fonte: CANASAT, 2018.

A cana-de-açúcar tem grande importância nas economias regionais, sendo exemplo Quirinópolis, localizado no Estado de Goiás, quando houve o estabelecimento de usinas nessa nova área. O município aumentou o número de empregos formais, salários médios e PIB, tornando atrativo para várias outras indústrias a uma taxa superior à média nacional (NEVES et al., 2014; VEIGA et al., 2018).

Diante desse contexto, há necessidade da elaboração de estudos para gerar estimativas de áreas plantadas em diferentes sistemas de manejo (VICENTE et al., 2012).

## **1.2 Cana-de-açúcar e os aspectos climáticos**

As mudanças climáticas no planeta envolvem fatores internos e externos ao sistema solo-atmosfera que podem afetar, drasticamente, a produtividade da cana-de-açúcar, além de outras culturas (SILVA et al., 2013). O Brasil, como outros países dependentes dos recursos naturais e exportadores de commodities podem sofrer os impactos dos eventos extremos, de modo mais pronunciado do ponto de vista econômico e social (ANACHE et al., 2018; OLIVEIRA; MIRANDA; COOKE, 2018; PEREIRA et al., 2018; VERMA; SRIVASTAVA; SINGH, 2018). É fundamental o conhecimento da influência dos fatores climáticos no crescimento e no desenvolvimento dos cultivos, uma vez que estão diretamente ligados a vários processos metabólicos da planta (FERREIRA JUNIOR et al., 2012).

O clima e a disponibilidade hídrica no solo são os fatores de maior importância para a produtividade dos cultivos (SILVA et al., 2013; VIANNA; SENTELHAS, 2014). Para que ocorra o crescimento e o desenvolvimento das plantas, é necessário que os elementos do clima, tais como radiação solar, precipitação pluvial e temperatura média do ar, atendam às exigências do cultivo (VICENTE et al., 2012). De forma geral, a cana-de-açúcar se desenvolver-se-á bem quando ocorrer período quente e úmido para proporcionar a germinação, o perfilhamento e o desenvolvimento vegetativo, seguida por outro frio e seco para promover o acúmulo de sacarose nos colmos (maturação).

A radiação solar tem influência direta no crescimento e no desenvolvimento das culturas, pois está diretamente relacionada com a fotossíntese das plantas. Essa capacidade das plantas de interceptar a radiação solar ocorre com a atenuação da luz em seu dossel, que varia de acordo com suas características morfológicas, como o índice de área foliar, o arranjo e a inclinação das folhas, em relação à luz incidente (TEIXEIRA; STONE; HEINEMANN, 2015).

Por isso, a maioria dos modelos matemáticos de estimativas do crescimento da cana-de-açúcar considera a radiação solar como a variável principal de entrada, pois é fonte de energia para a fixação do CO<sub>2</sub> atmosférico. Entretanto, apenas uma porcentagem da radiação solar é utilizada na fotossíntese, que corresponde à parte da energia da faixa do espectro solar entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nanômetros (FERREIRA JUNIOR et al., 2012).

A cana-de-açúcar, por ser uma gramínea C<sub>4</sub>, tem elevada taxa fotossintética e alta eficiência no resgate e na utilização de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Além disso, propicia a taxa de crescimento e de eficiência do uso da água duas a três vezes mais que as plantas de ciclo C<sub>3</sub> (SEGATO et al., 2006; PINTO, 2015).

Para o crescimento adequado da cana-de-açúcar em uma determinada região, é necessária receber de 18 a 36 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> de energia solar, pois a longa duração do dia e a alta luminosidade influenciam positivamente no perfilhamento, enquanto os dias curtos e nublados afetam de forma inversa. O fotoperíodo entre 10 e 14 horas promove o aumento do crescimento do colmo. Já o aumento do índice de área foliar está entre o terceiro e o quinto mês, simultaneamente com a fase de perfilhamento. Porém, alcança seus valores máximos durante a fase de crescimento dos colmos (MONTEIRO, 2012).

A produtividade de cultivos depende da quantidade, da distribuição e da intensidade das chuvas. A precipitação média anual a partir de 1.000 mm e bem distribuída torna-se suficiente para promover elevadas produções, sem a utilização da irrigação (ALMEIDA et al., 2008; SILVA et al., 2009).

A deficiência hídrica interfere negativamente na fotossíntese e no crescimento vegetativo da planta. Entretanto, a restrição hídrica moderada beneficia a maturação, uma vez que existindo restrição ao crescimento

vegetativo sobram mais fotoassimilados para o acúmulo de sacarose nos colmos (ROBERTO et al., 2015).

As chuvas, a irrigação e as ascensões capilares dos lençóis são as principais fontes para disponibilidade de água no solo (PINHEIRO; CRUZ; SIMÕES, 2015). A irrigação e a precipitação correspondem ao fornecimento médio de 35% e 65%, respectivamente, para a produção de alimentos no mundo (BELLO; WALKER, 2016).

A cana-de-açúcar, sob condições de seca, tem uma resposta primária com o fechamento dos estômatos para que não ocorra a perda de água através da transpiração foliar, conseqüentemente essa reação da planta reduz a disponibilidade de CO<sub>2</sub> para a fotossíntese, inibindo a produção de biomassa. Contudo, há uma diminuição no conteúdo de clorofila na folha (SIQUEIRA NETO et al., 2016), como exemplificado por Silva et al. (2014). O mesófilo e a bainha do feixe são os dois tipos de tecidos onde ocorre a fotossíntese nas plantas do ciclo C4, enquanto nas plantas C3, apenas o tecido mesófilo está envolvido nesse processo. Sendo assim, as plantas C4 atingem maiores níveis de fotossíntese em relação aos níveis atuais de CO<sub>2</sub> ambiente (STOKES et al., 2016).

Cardozo e Sentelhas (2013) verificaram que as baixas temperaturas do ar podem não ser suficientes para afetar a maturação da cana-de-açúcar nas regiões tropicais, porém não há consenso entre os parâmetros térmicos da mesma. No entanto, por ser essencialmente uma planta tropical, produz bem em áreas onde a temperatura do ar é entre 18 e 38 °C (TEODORO et al., 2015). Além disso, as baixas temperaturas do ar favorecem a concentração da sacarose porque reduzem o crescimento da planta devido à diminuição de seu metabolismo. Contudo, as baixas temperaturas do ar influenciam mais a paralisação do crescimento da cana-de-açúcar que o estresse hídrico (ARAÚJO et al., 2016).

Outro fator limitante para a produtividade de cana-de-açúcar são as geadas em regiões de altitudes médias entre 400 e 500 metros. Entretanto, nas menores altitudes, têm menores impactos devido a terem maior radiação solar e transporte do ar frio das maiores altitudes, amenizando, assim, a intensidade das geadas nesses locais (DEMARCHI; PIROLI, 2015).

A temperatura do ar influencia diretamente a evapotranspiração e a eficiência do uso de água que são, por sua vez, reguladas pela disponibilidade de água no solo, no cultivo de cana-de-açúcar, em regiões tropicais (SILVA et al., 2013). Os estádios críticos pela alta demanda hídrica na formação desta cultura são nas fases de perfilhamento e de rápido crescimento, os quais ocorrem entre 60 e 150 dias após o plantio (MACHADO et al., 2009; JAIN et al., 2015). Conforme os autores Esteves et al. (2014), a evapotranspiração total obtida no ciclo de cultivo foi de 1.088 mm.

### **1.3 Modelos de Circulação Geral – GCMs**

A previsão de tempo durante a Segunda Guerra Mundial e, mais recentemente, as mudanças climáticas impulsionaram um esforço global para a criação de modelos realistas que descrevem as variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, e conjuntos de dados climáticos melhorados. Com isso, os Modelos de Circulação Geral (GCMs) têm sido muito utilizados em estudos globais recentes para avaliar os impactos das alterações climáticas e apoiar políticas possíveis para reduzi-los, devido a esses modelos serem ferramentas do sistema climático da terra para o estudo dos impactos das mudanças climáticas com base nos efeitos radiativos de CO<sub>2</sub> e outras ações antropogênicas (BAO; MCINERNEY; STEIN, 2016; TIWARI et al., 2016).

Os GCMs têm uma razoável fidelidade para simular a variabilidade em grande escala (TIWARI et al., 2016). Dessa forma, podem ser extrapolados para diferentes regiões e fornecem estimativas específicas do local sob diversos cenários de emissão de gases com efeito estufa, quando as observações de confiança da variável climática de interesse estão disponíveis (WANG et al., 2016).

Ainda há poucos relatos na literatura sobre um conjunto de vários Modelos de Circulação Regional – MCRs, que afetariam os impactos probabilísticos de forma diferente a partir de um conjunto de GCMs (VANUYTRECHT; RAES; WILLEMS, 2016). Porém, diferentes impactos simulados com modelo regional contra projeções de modelo climático global foram verificados em trabalhos para o milho e o sorgo (FRONZEK; CARTER, 2007) e para o trigo e o milho (EASTERLING et al., 2001).



Segundo Jones, Singels e Ruane (2015), as projeções GCM da mudança de temperatura são muito mais consistentes do que projeções de mudanças de precipitação. Assim, concluíram que pequenos conjuntos de dados são suficientes para os estudos de avaliação do impacto da mudança climática em cana irrigada.

Vanuytrecht, Raes e Willems (2016) verificaram que o modelo climático regional da determinação sub-GCM-grid processou melhor e pode ser mais adequado para as avaliações de impacto local. Além disso, os autores sugerem que os conjuntos GCM podem ser utilizados em avaliações onde a temperatura e a precipitação são centrais, como para a produção agrícola. Portanto, estudos utilizando séries de saída de GCM com foco principal nos impactos das mudanças climáticas sobre as demandas de irrigação estão tornando-se mais aceitos nos últimos anos (REHANA; MUJUMDAR, 2013).

#### **1.4 Satélite Observatório do Carbono Orbital 2 - OCO-2**

O “Orbiting Carbon Observatory” - 2 (OCO-2) é o primeiro satélite da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA) projetado para medir o dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) com precisão, resolução e cobertura necessárias para quantificar fluxos do CO<sub>2</sub> (fontes e dissipação) nas escalas regionais em todo o mundo. O OCO-2 foi lançado com sucesso em 2 de julho de 2014 e reúne mais de 2 anos de observações (ELDERING et al., 2017).

Além disso, o OCO-2 é um grande avanço na detecção remota de Fluorescência da clorofila induzida pelo solo (SIF) (SUN et al., 2017). Frankenberg et al. (2014) estudaram as perspectivas do instrumento OCO-2 para a detecção por satélite da fluorescência da clorofila, e concluíram que o instrumento tem ótimo desempenho e fornece fluorescência da clorofila induzida por energia solar em 755 nm (SIF<sub>755</sub>), com precisão simples de medição de cerca de 0,3-0,5 Wm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>μm<sup>-1</sup> e precisão superior a 0,05 Wm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup> e, no solo, com tamanhos de um pixel (1,3 × 2,25 km<sup>2</sup>) muito menores quando comparado ao GOSAT. Além disso, o OCO-2 reduz em grande parte a incerteza devido ter cerca de 50 vezes mais dados do que o GOSAT.

O satélite OCO-2 fornece dados de SIF que têm uma relação direta com as medidas de fluxo de covariância meteorológica e eddy registradas em torres de fluxo devido a sua capacidade de realizar múltiplas medidas em pequenas áreas e tem uma resolução espacial relativamente fina. Outra relação direta que este satélite tem é com o MODIS/Aqua, pois voam conjuntamente na constelação A-train e, com isso, podem complementar-se nas medições sobre os aspectos das vegetações (VERMA et al., 2017). A constelação A-train significa a operação de vários satélites de observação da Terra na mesma faixa orbital.

Sun et al. (2017) comentaram sobre a importância de esforços para compreender o potencial da dinâmica das características climáticas e vegetais, em função dos dados de SIF do OCO-2, pois levará às estimativas mais precisas sobre as fontes e sumidouros de carbono e a uma compreensão mais detalhada dos feedbacks de carbono-clima. Com isso, esse dado orbital torna-se necessário para o planejamento e as tomadas de decisão nos agroecossistemas (WOOD et al., 2017).

A vantagem dessa observação de CO<sub>2</sub> está mais ligada ao fluxo de carbono líquido para a atmosfera, ou seja, não se limita a um mecanismo de emissão específico, como a queima de biomassa (PATRA et al., 2017).

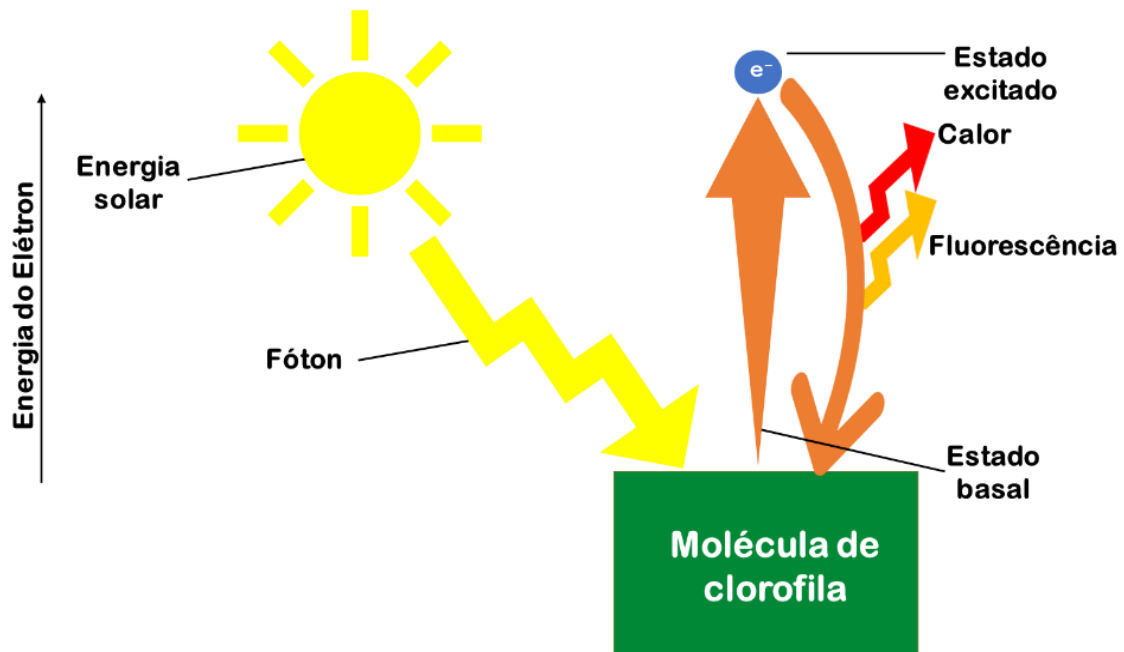
## **1.5 Dados orbitais para a compreensão da dinâmica fotossintética**

### **1.5.1 Fluorescência da clorofila induzida pelo Sol - SIF**

Na última década, a detecção de Fluorescência da Clorofila induzida pelo Sol, por meio de sensoriamento remoto, mostrou avanços devido à criação de satélites, com melhores resoluções espaciais, temporais e espectrais (FRANKENBERG et al., 2011; GUANTER et al., 2014; JOINER et al., 2014); assim, promete ser uma nova era na pesquisa global sobre a fotossíntese (SUN et al., 2017).

Na fotossíntese, a luz solar é capturada pelas clorofilas, pigmentos verdes presentes nos cloroplastos (Figura 2). Essa energia solar é transferida para os centros de reação, sendo liberada através de quatro caminhos, que são: fotoquímica, transferência de energia para outra molécula de clorofila,

excitação em calor para retornar seu estado inicial e uma pequena fração remitada como fluorescência da clorofila (TAIZ; ZEIGER, 2013; YANG et al., 2017). Esse estado excitado da molécula é por períodos muito curtos (1 bilionésimo de segundo =  $10^{-9}$ ) (STREIT et al., 2005; REECE et al., 2015).



**Figura 2.** Excitação da molécula da clorofila isolada.

O princípio básico da relação entre o rendimento quântico da fluorescência e a fotossíntese é relativamente simples. Pois o rendimento quântico da fluorescência é definido como a razão entre a energia da fluorescência emitida total pela quantidade de energia da luz absorvida pelos pigmentos fotossintéticos (OUNIS et al., 2016).

A Fluorescência da Clorofila induzida pelo Sol é um sinal eletromagnético emitido por fótons na faixa do vermelho e do infravermelho próximo (650-850 nm) pela clorofila-a, pigmento fotossintético primário na vegetação verde, em resposta à absorção da radiação fotossinteticamente ativa do Sol, a qual é emitida diretamente dos processos fotossintéticos, tipicamente de 1 a 5 % da radiação refletida no infravermelho próximo, refletindo, assim, a dinâmica fotossintética em tempo real (JULITTA et al., 2016; SABATER et al., 2017; SUN et al., 2017).

Os sistemas espectrais de imagens da fluorescência (SIF) estão sobressaindo-se dos sistemas de espectroscopia de imagem de fluorescência induzida por Laser (LIF), pois permitem a análise dos sinais ópticos com

resolução espectral e espacial, concomitantemente. Esses sistemas formam as imagens, escolhendo a banda de radiação que será detectada, enquanto os LIFs analisam uma pequena área da amostra (WETTERICH, 2012).

O rendimento quântico de fluorescência (FQY), que está ligado à eficiência da fotossíntese é um parâmetro de que o SIF depende tanto como da fração de radiação ativa absorvida fotossinteticamente (APAR), que essa depende da estrutura do dossel, composição bioquímica foliar, e do nível de radiação incidente. Por outro lado, a Produtividade Primária Bruta (GPP) depende também do APAR e da Eficiência Energética (LUE), que reflete a eficiência do estado ecofisiológico da planta (OUNIS et al., 2016).

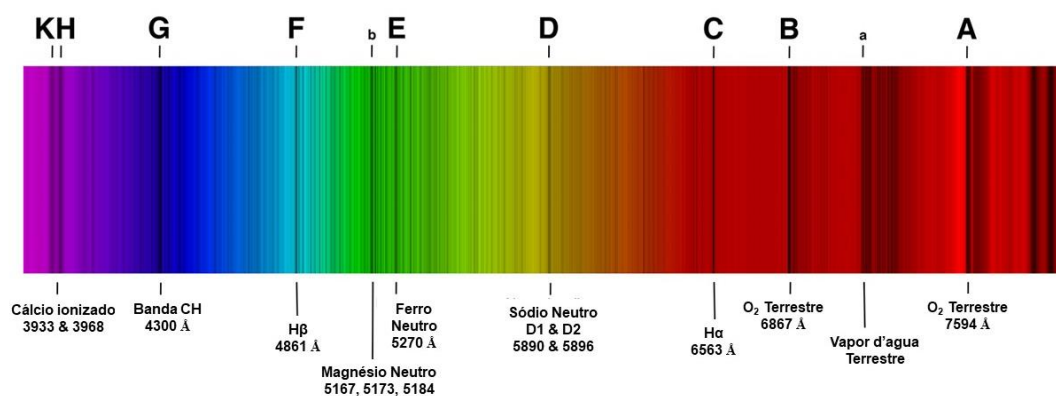
Vários autores reconhecem a relação linear da fluorescência com a GPP de forma empírica; sendo assim, há necessidade de mais pesquisas sobre a relação quantitativa exata de fluorescência em estado estacionário com a GPP sob diferentes condições de temperatura e de luz e, principalmente, considerando escalas espaciais e laboratoriais do dossel. Diante disso, acredita-se que esses estudos serão um grande marco para potencializar as observações espaciais globais da fluorescência (MAXWELL; JOHNSON, 2000; FRANKENBERG et al., 2011).

Recentemente, vários instrumentos foram desenvolvidos para medir de forma precisa a emissão de SIF (DU et al., 2017). Entre esses instrumentos, têm-se os espectrômetros de campo a nível do solo (LIU; LIU; HU, 2015), espectrômetros de imagem no ar (RASCHER et al., 2015) e sensores de satélites usando o princípio do preenchimento da profundidade da linha Fraunhofer (PLASCYK; GABRIEL, 1975), como o Satélite de Observação de Gases do Efeito Estufa (“Greenhouse Gases Observing Satellite” – GOSAT) (KÖHLER; GUANTER; JOINER, 2015; LEE et al., 2015; ZHANG et al., 2016), Observatório do Carbono Orbital 2 (“Orbiting Carbon Observatory 2” - OCO-2) (FRANKENBERG et al., 2014), espectrômetro de absorção de imagem de digitalização para Cartografia Atmosférica (“SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography” - SCIAMACHY) (KÖHLER; GUANTER; JOINER, 2015; JOINER et al., 2016) e a experiência global de monitoramento de Ozônio 2 (“Global Ozone Monitoring Instrument 2” - GOME-2) (JOINER et al., 2013; HE et al., 2017).

Vários autores provaram que a SIF por satélite é um indicador poderoso do crescimento da planta, equilíbrio de carbono dos ecossistemas terrestres e o período de captação do carbono (GUANTER et al., 2014; JOINER et al., 2014; SUN et al., 2017; YANG et al., 2017). Pois a medição de SIF em satélites é baseada no preenchimento de linhas solares Fraunhofer, ou seja, na medição da profundidade fracionária das linhas Fraunhofer, diminui na presença da emissão de SIF da superfície da terra (SUN et al., 2018).

Esse método utiliza o princípio da profundidade da linha Fraunhofer, que foi proposto pela primeira vez por Plascyk e Gabriel (1975), e foi considerado uma abordagem de referência para a detecção de SIF em condições naturais, a partir de dados de sensoriamento remoto (HUANG et al., 2017).

Para extrair sinais de SIF da radiação refletida pela vegetação observada, vários estudos demonstraram a possibilidade de medir SIF em linhas Fraunhofer ou bandas de absorção atmosférica (por exemplo, uma banda O<sub>2</sub>-B, que é de aproximadamente 687 nm e uma banda O<sub>2</sub>-A, a aproximadamente 760 nm) no solo (Figura 3) (HU et al., 2018).



**Figura 3.** Linhas de Fraunhofer no espectro.

A primeira recuperação global SIF foi alcançada com o GOSAT-FTS, avaliando o enchimento das linhas Fraunhofer localizadas em torno de 755 nm e 771 nm, onde a contaminação da atmosfera, o espalhamento e a absorção são minimizados. A alta resolução espectral desse sensor permite resolver o preenchimento das linhas Fraunhofer, com uma recuperação robusta e precisa.

No entanto, tem amostragem de dados espaciais e temporais pobres (SUN et al., 2018).

Mesmo com o crescimento exponencial dos estudos com SIF por sensoriamento remoto, pouco se sabe sobre a relação do nível de SIF no dossel e sua relação com os estádios fenológicos e GPP em condições ambientais, em qualquer ecossistema, principalmente em plantas C4 (VERMA et al., 2017). Além disso, estudos demonstram que a SIF é sensível à seca e aos estresses de alta temperatura (DAUMARD et al., 2010; LEE et al., 2013; ZHANG et al., 2014).

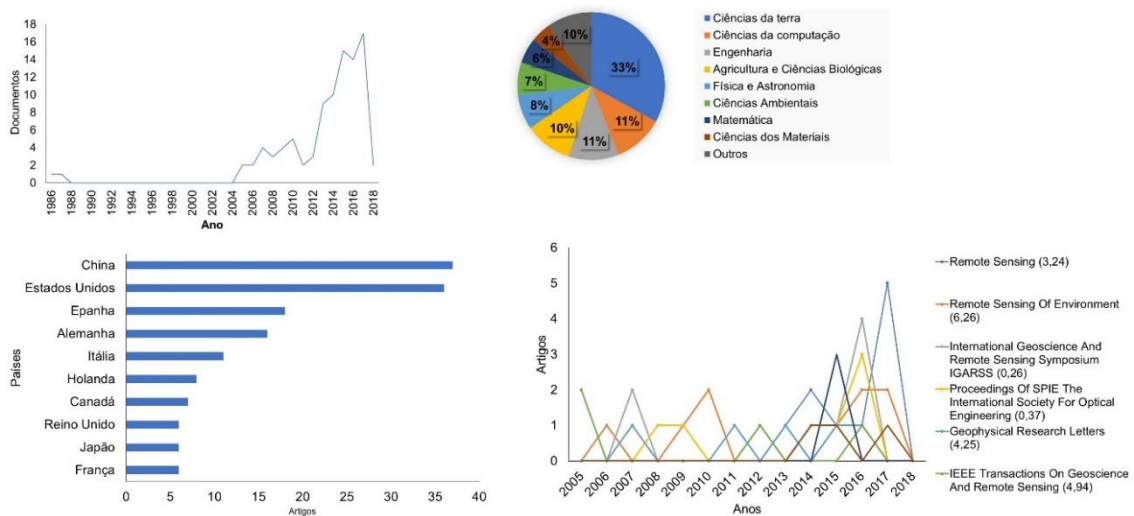
A principal vantagem da SIF em relação aos índices de vegetação, como é o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada – NDVI, e o Índice de Vegetação Melhorada - EVI, é devido à SIF estar mais correlacionada aos processos fisiológicos da vegetação (JOINER et al., 2014; WOOD et al., 2017).

Nesse sentido, torna-se importante o estudo da SIF em escala regional, principalmente em regiões com grande escala de monocultivos, pois há uma diferença entre a relação de SIF e o fluxo de carbono com os cultivos de C3 e C4, em que esses cultivos ainda são estudados conjuntamente de forma mais global no sensoriamento remoto. A compreensão dessas relações com as mudanças climáticas tornar-se-á mais robusta, bem como o estabelecimento e o potencial dos cultivos, podendo, assim, direcionar e incentivar a comunidade acadêmica e os formadores de políticas públicas em mais pesquisas entre a SIF e a produção agrícola.

Devido a essa preocupação, o grupo de pesquisa “Group of Agrometeorological Studies” – GAS, pertencente à Unesp/ Câmpus Jaboticabal, vem estudando a relação da SIF por meio do satélite OCO-2 com os estádios fenológicos dos cultivos, clima e as fontes e sumidouros de carbono. Dessa forma, esta dissertação foi o projeto-piloto desta área de estudo.

Esses estudos podem contribuir fortemente com as pesquisas mundiais de SIF por sensoriamento remoto na agricultura. No entanto, há poucos trabalhos publicados, conforme os dados da análise bibliométrica no início de dezembro de 2017 na SCOPUS, uma das principais bases de periódicos no mundo. Foi verificado que apenas 94 documentos foram indexados com a palavra-chave “Solar-Induced chlorophyll fluorescence” (Figura 4). A

quantidade de publicações cresceu em 2012, a partir do estudo e dos testes dos satélites com essa variável.



**Figura 4.** Análise bibliométrica da “Solar-Induced chlorophyll Fluorescence”, pesquisada na Scopus, em dezembro de 2017.

### 1.5.2 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI

O interesse da utilização de dados por sensoriamento remoto para o monitoramento e a previsão dos cultivos cresceu a partir do desenvolvimento de sensores de satélites multiespectrais (350 a 2.500 nm) e alta frequência temporal capazes de fornecer diversas leituras em tempo real de dados oportunos para o crescimento das culturas, com maior cobertura espacial e a um custo relativamente baixo. Outra vantagem que os dados orbitais têm é em relação aos dados meteorológicos de superfície, devido à limitação pela falta e pela continuidade das leituras desses dados em estações meteorológicas, bem como pela distribuição espacial escassa para grandes áreas de cultivos agrícolas (QADER; DASH; ATKINSON, 2018).

Nos últimos anos, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, ROUSE et al., 1974) tem sido bastante utilizado, principalmente na estimativa da produtividade primária bruta (GPP) e para examinar as variações espaciais e interanuais na vegetação, devido à fotossíntese ser uma medida de absorção de energia e abundância de clorofila que varia com as condições abióticas; sendo assim, o NDVI é um indicador da capacidade fotossintética a partir de espectrômetros (GUAN et al., 2016).

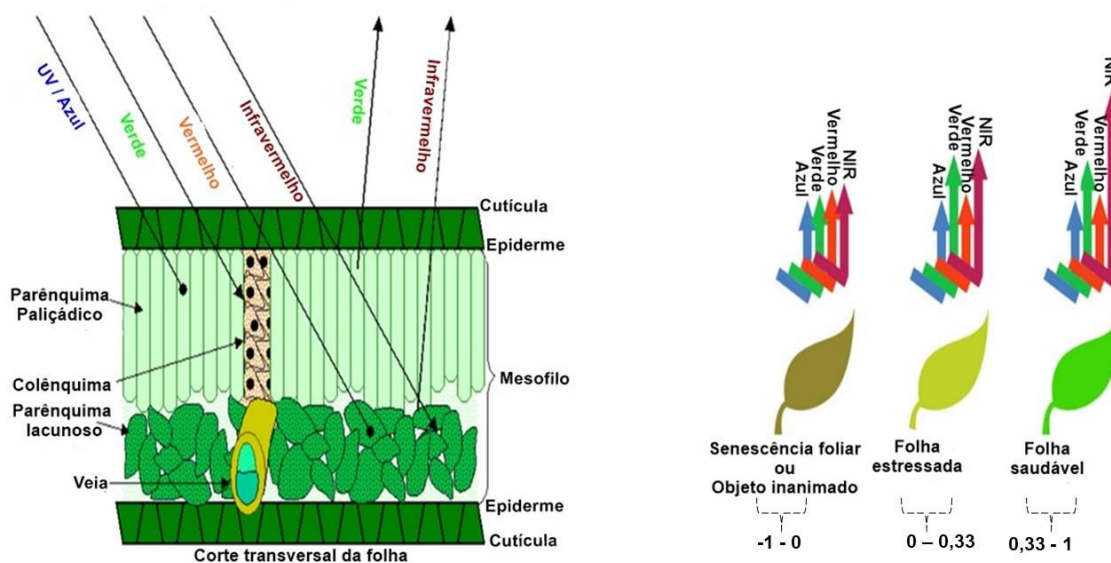
O NDVI é a informação espectral mais adequada para quantificar de forma eficaz a porcentagem de cobertura do solo com resíduos vegetais (Equação 1). Pois utiliza as faixas do vermelho e do infravermelho, e os valores desse índice vão de uma escala de -1 a 1. Quanto maiores os valores do NDVI, maiores as diferenças entre a reflectância do infravermelho com o vermelho, o que indica maior quantidade de clorofila e biomassa, conseqüentemente maior o potencial produtivo da planta (RISSINI; KAWAKAMI; GENÚ, 2015).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

em que: NDVI= Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; NIR= faixa do infravermelho próximo (750-1.350 nm) e RED= faixa do vermelho (620-750 nm).

Contudo, permite a diferenciação entre os tipos de cultivos de cana-de-açúcar (DEMATTÊ et al., 2016). Os resultados dos estudos utilizando índice de vegetação do sensor MODIS por Antunes, Lamparelli, e Rodrigues (2015) mostraram que há potencial do monitoramento temporal na detecção de padrões de fenologia da cultura da cana-de-açúcar, cujo entendimento da dinâmica temporal é importante para se verificar suas variações interanuais. Pois a biomassa verde do dossel é analisada pelo NDVI e índices similares dentro de um pixel por satélite, a partir da utilização de refletâncias visíveis e do infravermelho (Figura 5) (GUAN et al., 2016).





**Figura 5.** Os efeitos da absorção e da reflectância nas plantas e os princípios básicos e valores do NDVI. Fonte: adaptado de <https://landsat.usgs.gov/atmospheric-transmittance-information>.

Lobell et al. (2013) descobriram que as variações no NDVI podem explicar mais de 80% da variação observada na produtividade das culturas. Mulianga et al. (2015) verificaram que o NDVI mostrou grande potencial para detecção de tipos de cultura, condições de crescimento e para o mapeamento da cana cortada em áreas de tamanho médio superior a 1 ha. Entretanto, as inferiores a 1 ha são difíceis de serem mapeadas devido à resolução espacial utilizada ser de 15 a 30 metros. O mapa do cultivo de cana-de-açúcar gerado por esses autores é utilizado como bases para superfícies precisas, assim contribui para o aumento da precisão da previsão da produtividade.

Rosa et al. (2015) avaliaram a resposta da cana-de-açúcar às doses de nitrogênio, estimada por sensor de refletância do dossel. Esse sensor foi capaz de identificar a resposta da cultura a diferentes doses de N e a relação do nutriente com a produtividade da cana. Os índices de resposta obtidos pelas leituras do sensor foram úteis em avaliar a resposta da cana-de-açúcar ao N aplicado. Sensores de dossel podem auxiliar na identificação de áreas responsivas à aplicação de N, e consequentemente melhorar o manejo da fertilização nitrogenada da cana-de-açúcar.

Shruti, Gouda e Bhat (2014) utilizaram o índice de vegetação normalizada (NDVI) derivado de satélite para calcular o grande período de

crescimento e a correlação com a produtividade da cana-de-açúcar, no período de 2000 a 2013, tendo sua relação empírica derivada. Constataram que esse índice pode ser implementado no futuro com alguns modelos de previsão de tempo, como GCM para anteceder a previsão da produtividade da cana. Entretanto, o NDVI geralmente mostra um problema de escala, pois satura em áreas de alta biomassa, portanto não pode ser suficiente como um meio para explicar a variação espacial em cultivos (MADONSELA et al., 2018).

Nesse contexto, os dados do MODIS/NDVI têm sido amplamente utilizados para o monitoramento do vigor vegetativo de diversos cultivos devido à clorofila absorver na faixa do visível, enquanto não absorve no infravermelho próximo. Sendo assim, esses dados tornam-se importantes para se correlacionar com outras variáveis que têm uma relação direta nos processos fotossintéticos.

### **1.5.3 Coluna média de CO<sub>2</sub> – Xco<sub>2</sub>**

Para compreender a adaptação da agricultura às mudanças climáticas, os benefícios do aumento do CO<sub>2</sub> precisam ser entendidos, pois consequentemente causam impacto econômico e ecológico em muitas culturas agrícolas (DE SOUZA et al., 2008; VU; ALLEN, 2009). Vários estudos relatam aumentos inesperados na produção de cana-de-açúcar sob CO<sub>2</sub> elevado; no entanto, há uma dificuldade de distinguir os efeitos diretos do aumento do CO<sub>2</sub> na fotossíntese quando relacionados com as respostas indiretas à água (STOKES et al., 2016).

A produtividade da cana-de-açúcar é medida pela alocação direta de sacarose para os colmos, ou seja, as plantas de cana-de-açúcar, provavelmente, gastam menos energia para armazenar carbono (DE SOUZA et al., 2008). Ao contrário da produtividade de outros cereais, como, por exemplo, sorgo e milho, não foram observados aumentos da produtividade de grãos sob condições elevadas de Xco<sub>2</sub> (GROSSI et al., 2015; RUIZ-VERA et al., 2015). O estudo da interação entre a fisiologia e o desenvolvimento dos cultivos sugere a compreensão das respostas da cana-de-açúcar aos aumentos esperados de CO<sub>2</sub>, assim as ferramentas de sensoriamento remoto tornam-se necessárias para analisar as repostas das plantas ao longo do ciclo de vida.

Com o surgimento de novos satélites com melhores resoluções espaciais e temporais, surge a necessidade de aprofundar o conhecimento dos ciclos sazonais das fontes de carbono, os sumidouros e sua distribuição na atmosfera (LIANG et al., 2017; ZHAO et al., 2017b). Pois entre os gases de efeito estufa, o dióxido de carbono é o mais influenciado pelas atividades antropogênicas (IPCC, 2014). As concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> aumentaram de 278, ± 2 ppm a 1.750 para mais de 400 ppm para os tempos atuais (HEDELIUS et al., 2017).

As incertezas nas estimativas de fontes e de sumidouros regionais dos gases de efeito estufa, derivadas de métodos de inventário direto ou inferidas de observações atmosféricas, impediram o desenvolvimento de uma política efetiva da redução de emissões das atividades antropogênicas. Contudo, as estimativas do fluxo de carbono por esses métodos são limitadas apenas ao mecanismo de emissão de queima de biomassa (PATRA et al., 2017).

Wang et al. (2017b) verificaram que os dados médios de OCO-2 produzem a tendência positiva de 0,81 ppm e desvio-padrão de 1,73 ppm em relação aos dados terrestres coletados. Os resultados confirmam a adequação do observatório para medições terrestres em longo prazo de gases de efeito estufa com alta precisão e cumprem os requisitos da Rede de Observação de Colunas de Carbono Total (TCCON).

O satélite OCO-2 produz mais dados do que o GOSAT em escala regional, e os resultados são relevantes. Sendo assim, o OCO-2 provavelmente fornecerá mais estimativas da coluna média de CO<sub>2</sub> ( $X_{CO_2}$ ) do que o GOSAT (ZHAO et al., 2017b).

## **1.6 OBJETIVO GERAL**

O estudo teve como objetivo analisar a relação entre SIF,  $X_{CO_2}$  e NDVI com a produtividade e o nível de açúcar da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M.; AB, W. Allen\_FAO1998. p. 1–15, 1998.

ALMEIDA, A. C. D. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Vegetative Development and Production of Sugarcane Varieties as a Function of Water Availability and Thermic Units. **Ciênc. agrotec., Lavras**, p. 1441–1448, 2008.

ANACHE, J. A. A.; FLANAGAN, D. C.; SRIVASTAVA, A.; WENDLAND, E. C. Land Use and Climate Change Impacts on Runoff and Soil Erosion at the Hillslope Scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 140–151, 2018.

ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. C.; RODRIGUES, L. H. A. Assessing of the Sugarcane Cultivation Dynamics in São Paulo State by Modis Data Temporal Profiles | Avaliação Da Dinâmica Do Cultivo Da Cana-de-Açúcar No Estado de São Paulo Por Meio de Perfis Temporais de Dados Modis. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1127–1136, 2015.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P. Variation in the Sugar Yield in Response to Drying-off of Sugarcane before Harvest and the Occurrence of Low Air Temperatures. **Bragantia**, v. 75, n. 1, p. 118–127, 2016.

BAO, J.; MCINERNEY, D. J.; STEIN, M. L. A Spatial-dependent Model for Climate Emulation. **Environmetrics**, v. 27, n. 7, p. 396–408, 2016.

BELLO, Z. A.; WALKER, S. Calibration and Validation of AquaCrop for Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum*). **Crop and Pasture Science**, v. 67, n. 9, p. 948, 2016.

BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; DE OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of Sugarcane Production in Brazil. A Review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, 2018.

BORDONAL, R. de O.; LAL, R.; RONQUIM, C. C.; DE FIGUEIREDO, E. B.; CARVALHO, J. L. N.; MALDONADO, W.; MILORI, D. M. B. P.; LA SCALA, N. Changes in Quantity and Quality of Soil Carbon due to the Land-Use Conversion to Sugarcane (*Saccharum Officinarum*) Plantation in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 54–65, 2017.

CANASAT – Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. INPE – Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>>. Acesso em: 01 abr 2018.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic Effects on Sugarcane Ripening under the Influence of Cultivars and Crop Age. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, v. 70, n. 6, p. 449–456, 2013.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. de O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and Environmental Implications of Sugarcane Straw Removal: A Major Review. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181–1195, 2016.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada-Esalq/Usp. **PIB ano 2017 da cana-de-açúcar**. 2017. Disponível em:<<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-de-cadeias-agropecuarias.aspx>>. Acesso em: 17 out. 2017.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar, Safra 2015/2016, **terceiro levantamento**. Brasília, v.2, n.3, p. 70, 2016.

CHANCE, K. V.; MARTIN, R. V. **Spectroscopy and radiative transfer of planetary atmospheres**. 1. ed. [s.l.] Oxford University Press, 2017.

CLERICI, N.; WEISSTEINER, C. J.; GERARD, F. Exploring the Use of MODIS NDVI-Based Phenology Indicators for Classifying Forest General Habitat Categories. n. i, p. 1781–1803, 2012.

DA SILVA, V. de P. R.; DA SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, W. G.; BORGES, C. J. R.; DE SOUSA, I. F.; NETO, J. D. Crop Coefficient, Water Requirements, Yield and Water Use Efficiency of Sugarcane Growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 128, p. 102–109, 2013.

DAUMARD, F.; CHAMPAGNE, S.; FOURNIER, A.; GOULAS, Y.; OUNIS, A.; HANOCQ, J. F.; MOYA, I. A Field Platform for Continuous Measurement of Canopy Fluorescence. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 9, p. 3358–3368, 2010.

DE SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; DA SILVA, E. A.; ULIAN, E. C.; WACLAWOVSKY, A. J.; NISHIYAMA, M. Y.; DOS SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO<sub>2</sub> Increases Photosynthesis, Biomass and Productivity, and Modifies Gene Expression in Sugarcane. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, n. 8, p. 1116–1127, 2008.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L. ANÁLISE DOS EFEITOS DE GEADAS NA COBERTURA VEGETAL DO MUNICÍPIO DE CÂNDIDO MOTA–SP, BRASIL, POR MEIO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 554–573, 2015.

DEMATTE, J. A. M.; TERRA, F. da S.; OTTO, R.; TOMA, R. S.; PEREIRA, L. H.; NASCIMENTO, A. F. do; BORTOLETTO, M. A. M. Assessment of Sugarcane Harvesting Residue Effects on Soil Spectral Behavior. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 2, p. 159–168, 2016.

DU, S.; LIU, L.; LIU, X.; HU, J. Response of Canopy Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence to the Absorbed Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Chlorophyll. **Remote Sensing**, v. 9, n. 9, 2017.

DUDU, H.; ÇAKMAK, E. H. Climate Change and Agriculture: An Integrated Approach to Evaluate Economy-Wide Effects for Turkey. **Climate and Development**, v. 5529, p. 1–14, 2017.

EASTERLING, W. E.; MEARN, L. O.; HAYS, C. J.; MARX, D. Comparison of Agricultural Impacts of Climate Change Calculated from High and Low Resolution Climate Change Scenarios: Part II. Accounting for Adaptation and CO<sub>2</sub> Direct Effects. **Climatic Change**, v. 51, n. 2, p. 173–197, Nov. 2001.

ELDERING, A.; O'DELL, C. W.; WENBERG, P. O.; CRISP, D.; GUNSON, M. R.; VIATTE, C.; AVIS, C.; BRAVERMAN, A.; CASTANO, R.; CHANG, A.; CHAPSKY, L.; CHENG, C.; CONNOR, B.; DANG, L.; DORAN, G.; FISHER, B.; FRANKENBERG, C.; FU, D.; GRANAT, R.; HOBBS, J.; LEE, R. A. M.; MANDRAKE, L.; MCDUFFIE, J.; MILLER, C. E.; MYERS, V.; NATRAJ, V.; O'BRIEN, D.; OSTERMAN, G. B.; OYAFUSO, F.; PAYNE, V. H.; POLLOCK, H. R.; POLONSKY, I.; ROEHL, C. M.; ROSENBERG, R.; SCHWANDNER, F.; SMYTH, M.; TANG, V.; TAYLOR, T. E.; TO, C.; WUNCH, D.; YOSHIMIZU, J. The Orbiting Carbon Observatory-2: First 18 Months of Science Data Products. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 10, n. 2, p. 549–563, 2017.

ESTEVEZ, B. dos S.; DE SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; DE LIMA LOUSADA, L.; MARCIANO, C. R.; SIQUEIRA, D. P. Coeficiente de Cultivo Da Cana-de-Açúcar Utilizando a Razão de Bowen. **Irriga**, v. 19, n. 3, p. 441–452, 2014.

FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A. da; BONFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento Inicial de Variedades de Cana-de-Açúcar Em Latossolo Submetidas a Níveis de Compactação Do Solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 188–193, 2014.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. de; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; SANTOS, M. A. dos; PORFIRIO, A. C. S. Crescimento E Fotossíntese de Cana-de-Açúcar Em Função de Variáveis Biométricas E Meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1229–1236, 2012.

FRANKENBERG, C.; BERRY, J.; GUANTER, L.; JOINER, J. Remote Sensing of Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Space. **SPIE Newsroom**, p. 2–5, 2013.

FRANKENBERG, C.; FISHER, J. B.; WORDEN, J.; BADGLEY, G.; SAATCHI, S. S.; LEE, J. E.; TOON, G. C.; BUTZ, A.; JUNG, M.; KUZE, A.; YOKOTA, T. New Global Observations of the Terrestrial Carbon Cycle from GOSAT: Patterns of Plant Fluorescence with Gross Primary Productivity. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 17, p. 1–6, 2011.

FRANKENBERG, C.; O'DELL, C.; BERRY, J.; GUANTER, L.; JOINER, J.; KÖHLER, P.; POLLOCK, R.; TAYLOR, T. E. Prospects for Chlorophyll Fluorescence Remote Sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, n. Supplement C, p. 1–12, 2014.

FRONZEK, S.; CARTER, T. R. Assessing Uncertainties in Climate Change Impacts on Resource Potential for Europe Based on Projections from RCMs and GCMs. **Climatic Change**, v. 81, n. 1, p. 357–371, 2007.

GOLDEMBERG, J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Meeting the Global Demand for Biofuels in 2021 through Sustainable Land Use Change Policy. **Energy Policy**, v. 69, n. Supplement C, p. 14–18, 2014.

GROSSI, M. C.; JUSTINO, F.; RODRIGUES, R. D. Á.; ANDRADE, C. L. T. Sensitivity of the Sorghum Yield to Individual Changes in Climate Parameters: Modelling Based Approach. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p. 341–349, 2015.

GUAN, K.; WU, J.; KIMBALL, J. S.; ANDERSON, M. C.; FROLKING, S.; LI, B.; HAIN, C. R.; LOBELL, D. B. The Shared and Unique Values of Optical, Fluorescence, Thermal and Microwave Satellite Data for Estimating Large-Scale Crop Yields. **Remote Sensing of Environment**, v. 199, p. 333–349, 2017.

GUAN, X.; HUANG, C.; LIU, G.; MENG, X.; LIU, Q. Mapping Rice Cropping Systems in Vietnam Using an NDVI-Based Time-Series Similarity Measurement Based on DTW Distance. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, 2016.

GUANTER, L.; ZHANG, Y.; JUNG, M.; JOINER, J.; VOIGT, M.; BERRY, J. A.; FRANKENBERG, C.; HUETE, A. R.; ZARCO-TEJADA, P.; LEE, J.-E.; MORAN, M. S.; PONCE-CAMPOS, G.; BEER, C.; CAMPS-VALLS, G.; BUCHMANN, N.; GIANELLE, D.; KLUMPP, K.; CESCATTI, A.; BAKER, J. M.; GRIFFIS, T. J. Global and Time-Resolved Monitoring of Crop Photosynthesis with Chlorophyll Fluorescence. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 14, p. E1327–E1333, 8 Apr. 2014.

GUEVARA, A. J. D. H.; SILVA, O. R. D.; HASEGAWA, H. L.; VENANZI, D. Evaluation of Sustainability of Brazilian Ethanol Production: A model in System Dynamics. **BBR. Brazilian Business Review**, v. 14, n. 4, p. 435-447, 2017.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica-5**. [s.l.] AMGH Editora, 2011.

GUNST, R. F. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments** Taylor & Francis Group, , 1996.



HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. [s.l.] Bookman Editora, 2009.

HE, Z.; ZENG, Z. C.; LEI, L.; BIE, N.; YANG, S. A Data-Driven Assessment of Biosphere-Atmosphere Interaction Impact on Seasonal Cycle Patterns of XCO<sub>2</sub> Using GOSAT and MODIS Observations. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, 2017.

HEDELIUS, J. K.; FENG, S.; ROEHL, C. M.; WUNCH, D.; HILLYARD, P. W.; PODOLSKE, J. R.; IRACI, L. T.; PATARASUK, R.; RAO, P.; O'KEEFFE, D.; GURNEY, K. R.; LAUVAUX, T.; WENBERG, P. O. Emissions and Topographic Effects on Column CO<sub>2</sub>(XCO<sub>2</sub>) Variations, with a Focus on the Southern California Megacity. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, n. 13, p. 7200–7215, 2017.

HU, J.; LIU, L.; LIU, X. Improving the Retrieval of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence at Canopy Level by Modeling the Relative Peak Height of the Apparent Reflectance. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 26032, 2017.

HU, J.; LIU, X.; LIU, L.; GUAN, L. Evaluating the Performance of the SCOPE Model in Simulating Canopy Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, 2018.

HUANG, C.; ZHANG, L.; CEN, Y.; TONG, Q. INVESTIGATING FRAUNHOFER LINE BASED FLUORESCENCE RETRIEVAL IN O<sub>2</sub>-B BAND WITH HYPERSPECTRAL RADIATIVE TRANSFER SIMULATIONS Changping Huang , Lifu Zhang , Yi Cen , Qingxi Tong State Key Laboratory of Remote Sensing Science , Institute of Remote Sensing an. In: Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 2015 7th Workshop on, **Anais...**2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema do IBGE de Recuperação Automática**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela>. Acesso em: 16 out. 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report** of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014.

JAIN, R.; CHANDRA, A.; VENUGOPALAN, V. K.; SOLOMON, S. Physiological Changes and Expression of SOD and P5CS Genes in Response to Water Deficit in Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 276–282, 2015.

JENSEN, R.; HERBST, M.; FRIBORG, T. Direct and Indirect Controls of the Interannual Variability in Atmospheric CO<sub>2</sub> Exchange of Three Contrasting Ecosystems in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 12–31, 2017.

JEONG, S. J.; SCHIMEL, D.; FRANKENBERG, C.; DREWRY, D. T.; FISHER, J. B.; VERMA, M.; BERRY, J. A.; LEE, J. E.; JOINER, J. Application of Satellite Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence to Understanding Large-Scale Variations in Vegetation Phenology and Function over Northern High Latitude Forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 178–187, 2017.

JOHNSON, D. M. An Assessment of Pre- and within-Season Remotely Sensed Variables for Forecasting Corn and Soybean Yields in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, n. Supplement C, p. 116–128, 2014.

JOINER, J.; GUANTER, L.; LINDSTROT, R.; VOIGT, M.; VASILKOV, A. P.; MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; YOSHIDA, Y.; FRANKENBERG, C. Global Monitoring of Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Moderate Spectral Resolution near-Infrared Satellite Measurements: Methodology, Simulations, and Application to GOME-2. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n. 2, p. 2803–2823, 2013.

JOINER, J.; YOSHIDA, Y.; GUANTER, L.; MIDDLETON, E. M. New Methods for the Retrieval of Chlorophyll Red Fluorescence from Hyperspectral Satellite Instruments: Simulations and Application to GOME-2 and SCIAMACHY. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 9, n. 8, p. 3939–3967, 2016.

JOINER, J.; YOSHIDA, Y.; VASILKOV, A. P.; SCHAEFER, K.; JUNG, M.; GUANTER, L.; ZHANG, Y.; GARRITY, S.; MIDDLETON, E. M.; HUENNRICH, K. F.; GU, L.; BELELLI MARCHESINI, L. The Seasonal Cycle of Satellite Chlorophyll Fluorescence Observations and Its Relationship to Vegetation Phenology and Ecosystem Atmosphere Carbon Exchange. **Remote Sensing of Environment**, v. 152, p. 375–391, 2014.

JONES, M. R.; SINGELS, A.; RUANE, A. C. Simulated Impacts of Climate Change on Water Use and Yield of Irrigated Sugarcane in South Africa. **Agricultural Systems**, v. 139, n. Supplement C, p. 260–270, 2015.

JULITTA, T.; CORP, L. A.; ROSSINI, M.; BURKART, A.; COGLIATI, S.; DAVIES, N.; HOM, M.; ARTHUR, A. Mac; MIDDLETON, E. M.; RASCHER, U.; SCHICKLING, A.; COLOMBO, R. Comparison of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence Estimates Obtained from Four Portable Field Spectroradiometers. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 1–14, 2016.

KAISER, H. F. The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187–200, 1958.

KÖHLER, P.; GUANTER, L.; JOINER, J. A Linear Method for the Retrieval of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY Data. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, n. 6, p. 2589–2608, 2015.

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 42, n. 1, p. 313–349, 1991.

LA SCALA JÚNIOR, N.; DE FIGUEIREDO, E.; PANOSSO, A. A Review on Soil Carbon Accumulation due to the Management Change of Major Brazilian Agricultural Activities. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 suppl, p. 775–785, 2012.

LEE, B.; HYOJUNG, K.; MIYATA, A.; LINDNER, S.; TENHUNEN, J. Evaluation of a Phenology-Dependent Response Method for Estimating Leaf Area Index of Rice Across Climate Gradients. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1–16, 2017.

LEE, J.-E.; BERRY, J. A.; VAN DER TOL, C.; YANG, X.; GUANTER, L.; DAMM, A.; BAKER, I.; FRANKENBERG, C. Simulations of Chlorophyll Fluorescence Incorporated into the Community Land Model Version 4. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3469–3477, 2015.

LEE, J.-E.; FRANKENBERG, C.; VAN DER TOL, C.; BERRY, J. A.; GUANTER, L.; BOYCE, C. K.; FISHER, J. B.; MORROW, E.; WORDEN, J. R.; ASEFI, S. Forest Productivity and Water Stress in Amazonia: Observations from GOSAT Chlorophyll Fluorescence. **Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 280, n. 1761, p. 20130171, 2013.

LIANG, A.; HAN, G.; GONG, W.; YANG, J.; XIANG, C. Comparison of Global XCO<sub>2</sub> Concentrations From OCO-2 With TCCON Data in Terms of Latitude Zones. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 2491–2498, 2017.

LIU, L.; GUAN, L.; LIU, X. Directly Estimating Diurnal Changes in GPP for C3 and C4 Crops Using Far-Red Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 232, n. Supplement C, p. 1–9, 2017. doi:https://doi.org/10.1016/j.agrmet.2017.05.011.

LIU, L.; LIU, X.; HU, J. Effects of Spectral Resolution and SNR on the Vegetation Solar-Induced Fluorescence Retrieval Using FLD-Based Methods at Canopy Level. *European Journal of Remote Sensing*, v. 48, n. December, p. 743–762, 2015.

LIU, L.; YANG, X.; ZHOU, H.; LIU, S.; ZHOU, L.; LI, X.; YANG, J.; HAN, X.; WU, J. Evaluating the Utility of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence for Drought Monitoring by Comparison with NDVI Derived from Wheat Canopy. *Science of the Total Environment*, v. 625, p. 1208–1217, 2018a.

LIU, L.; YANG, X.; ZHOU, H.; LIU, S.; ZHOU, L.; LI, X.; YANG, J.; WU, J. Relationship of Root Zone Soil Moisture with Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence and Vegetation Indices in Winter Wheat: A Comparative Study Based on Continuous Ground-Measurements. *Ecological Indicators*, v. 90, n. February, p. 9–17, 2018b.

LIU, Z.; WU, C.; PENG, D.; WANG, S.; GONSAMO, A.; FANG, B.; YUAN, W. Agricultural and Forest Meteorology Improved Modeling of Gross Primary Production from a Better Representation of Photosynthetic Components in Vegetation Canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 233, p. 222–234, 2017.

LOBELL, D. B.; ORTIZ-MONASTERIO, J. I.; SIBLEY, A. M.; SOHU, V. S. Satellite Detection of Earlier Wheat Sowing in India and Implications for Yield Trends. *Agricultural Systems*, v. 115, n. Supplement C, p. 137–143, 2013.

LUUS, K. A.; COMMANE, R.; PARAZOO, N. C.; BENMERGUI, J.; EUSKIRCHEN, E. S.; FRANKENBERG, C.; JOINER, J.; LINDAAS, J.; MILLER, C. E.; OECHEL, W. C.; ZONA, D.; WOFSEY, S.; LIN, J. C. Tundra Photosynthesis Captured by Satellite-Observed Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 3, p. 1564–1573, 2017.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; RIBEIRO MARCHIORI, P. E.; PEDRO MACHADO, D. F. S.; MACHADO, E. C.; DE ANDRADE LANDELL, M. G. Respostas Biométricas E Fisiológicas Ao Deficit Hídrico Em Cana-de-Açúcar Em Diferentes Fases Fenológicas. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1575–1582, 2009.

MADONSELA, S.; CHO, M. A.; RAMOELO, A.; MUTANGA, O.; NAIDOO, L. Estimating Tree Species Diversity in the Savannah Using NDVI and Woody Canopy Cover. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 66, p. 106–115, Apr. 2018.

MAGRO, F. J.; TAKAO, G.; CAMARGO, P. E.; TAKAMATSU, S. Y. Biometria Em Cana-de-Açúcar. p. 1–18, 2011.

MARCARI, M. A.; ROLIM, G. de S.; APARECIDO, L. E. de O. Agrometeorological Models for Forecasting Yield and Quality of Sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 11, p. 1049–1056, 2015.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll Fluorescence—a Practical Guide. **Journal of experimental botany**, v. 51, n. 345, p. 659–668, 2000.

MCCORMICK, A. J.; WATT, D. A.; CRAMER, M. D. Supply and Demand: Sink Regulation of Sugar Accumulation in Sugarcane. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 2, p. 357–364, 2009.

MONTEIRO, L. A. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2012. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz,” 2012.

MULIANGA, B.; BÉGUÉ, A.; CLOUVEL, P.; TODOROFF, P. Mapping Cropping Practices of a Sugarcane-Based Cropping System in Kenya Using Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14428–14444, 2015.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; SIMPRINI, E. S.; RODRIGUES, O. M.; CANTO, F.; ROVANHOL, P.; CONSOL, M. H. **A dimensão do setor sucroenergético: mapeamento e quantificação da safra 2013/14**. Ribeirão Preto: Markestrat, Fundace. [s.l: s.n.].

O'DELL, C. W.; CONNOR, B.; BÖSCH, H.; O'BRIEN, D.; FRANKENBERG, C.; CASTANO, R.; CHRISTI, M.; ELDERING, D.; FISHER, B.; GUNSON, M.; MCDUFFIE, J.; MILLER, C. E.; NATRAJ, V.; OYAFUSO, F.; POLONSKY, I.; SMYTH, M.; TAYLOR, T.; TOON, G. C.; WENNERBERG, P. O.; WUNCH, D. The ACOS CO<sub>2</sub> Retrieval Algorithm-Part 1: Description and Validation against Synthetic Observations. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 5, n. 1, p. 99–121, 2012.

**OCO-2 Data Product User's Guid.** , 2016. Disponível em: <[https://co2.jpl.nasa.gov/static/docs/OCO2\\_DUG\\_150911\\_VerF2.pdf](https://co2.jpl.nasa.gov/static/docs/OCO2_DUG_150911_VerF2.pdf)>. Acesso em: 23 abr. 2017.

OLIVEIRA, A. J. de;; RAMALHO, J. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011 / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia.** Embrapa In ed. [s.l: s.n.]

OLIVEIRA, L. A.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R. A. C. Water Management for Sugarcane and Corn under Future Climate Scenarios in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 199–206, 2018.

OUNIS, A.; BACH, J.; MAHJOUR; DAUMARD, F.; MOYA; GOULAS, Y. Combined Use of LIDAR and Hyperspectral Measurements for Remote Sensing of Fluorescence and Vertical Profile of Canopies. **Association of Remote Sensing**, v. 45, p. 87–94, 2016.

PANDEY, P. C.; MANDAL, V. P.; KATIYAR, S.; KUMAR, P.; TOMAR, V.; PATAIRIYA, S.; RAVISANKAR, N.; GANGWAR, B. Geospatial Approach to Assess the Impact of Nutrients on Rice Equivalent Yield Using MODIS Sensors'-based MOD13Q1-NDVI Data. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 11, p. 6108–6115, 2015.

PARAZOO, N. C.; BOWMAN, K.; FRANKENBERG, C.; LEE, J. E.; FISHER, J. B.; WORDEN, J.; JONES, D. B. A.; BERRY, J.; COLLATZ, G. J.; BAKER, I. T.; JUNG, M.; LIU, J.; OSTERMAN, G.; O'DELL, C.; SPARKS, A.; BUTZ, A.; GUERLET, S.; YOSHIDA, Y.; CHEN, H.; GERBIG, C. Interpreting Seasonal Changes in the Carbon Balance of Southern Amazonia Using Measurements of XCO<sub>2</sub> and Chlorophyll Fluorescence from GOSAT. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 11, p. 2829–2833, 2013.

PATRA, P. K.; CRISP, D.; KAISER, J. W.; WUNCH, D.; SAEKI, T.; ICHII, K.; SEKIYA, T.; WENNERBERG, P. O.; FEIST, D. G.; POLLARD, D. F. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) Tracks 2–3 Peta-Gram Increase in Carbon Release to the Atmosphere during the 2014–2016 El Niño. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 13567, 2017.

PEREIRA, V. R.; BLAIN, G. C.; DE AVILA, A. M. H.; PIRES, R. C. de M.; PINTO, H. S. Impacts of Climate Change on Drought: Changes to Drier Conditions at the Beginning of the Crop Growing Season in Southern Brazil. **Bragantia**, v. 77, n. 1, p. 201–211, 2018.

PHAN, T. T.; SUN, B.; NIU, J. Q.; TAN, Q. L.; LI, J.; YANG, L. T.; LI, Y. R. Overexpression of Sugarcane Gene SoSnRK2.1 Confers Drought Tolerance in Transgenic Tobacco. **Plant Cell Reports**, v. 35, n. 9, p. 1891–1905, 2016.

PINHEIRO, M. P. M. A.; CRUZ, R. L.; SIMÕES, W. L. Comportamento Do Teor de Água Num Solo Cultivado Com Cana-de-Açúcar Irrigada Com Diferentes Lâminas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 30–42, 2015.  
PINTO, H. M. S. **Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros** Universidade de São Paulo, , 2015. .

PLASCYK, J. A.; GABRIEL, F. C. The Fraunhofer Line Discriminator MKII-An Airborne Instrument for Precise and Standardized Ecological Luminescence Measurement. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 24, n. 4, p. 306–313, 1975.

PORCAR-CASTELL, A.; TYYSTJÄRVI, E.; ATHERTON, J.; VAN DER TOL, C.; FLEXAS, J.; PFÜNDEL, E. E.; MORENO, J.; FRANKENBERG, C.; BERRY, J. A. Linking Chlorophyll a Fluorescence to Photosynthesis for Remote Sensing Applications: Mechanisms and Challenges. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 15, p. 4065–4095, 2014.

QADER, S. H.; DASH, J.; ATKINSON, P. M. Forecasting Wheat and Barley Crop Production in Arid and Semi-Arid Regions Using Remotely Sensed Primary Productivity and Crop Phenology: A Case Study in Iraq. **Science of The Total Environment**, v. 613–614, n. Supplement C, p. 250–262, 2018.

RASCHER, U.; ALONSO, L.; BURKART, A.; CILIA, C.; COGLIATI, S.; COLOMBO, R.; DAMM, A.; DRUSCH, M.; GUANTER, L.; HANUS, J.; HYVÄRINEN, T.; JULITTA, T.; JUSSILA, J.; KATAJA, K.; KOKKALIS, P.; KRAFT, S.; KRASKA, T.; MATVEEVA, M.; MORENO, J.; MULLER, O.; PANIGADA, C.; PIKL, M.; PINTO, F.; PREY, L.; PUDE, R.; ROSSINI, M.;

SCHICKLING, A.; SCHURR, U.; SCHÜTTEMEYER, D.; VERRELST, J.; ZEMEK, F. Sun-Induced Fluorescence - a New Probe of Photosynthesis: First Maps from the Imaging Spectrometer HyPlant. **Global Change Biology**, v. 21, n. 12, p. 4673–4684, 2015.

REECE, J. B.; WASSERMAN, S. A.; URRY, L. A.; CAIN, M. L.; MINORSKY, P. V.; JACKSON, R. B. **Biologia de Campbell**. [s.l.] Artmed Editora, 2015.  
REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. Regional Impacts of Climate Change on Irrigation Water Demands. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 20, p. 2918–2933, 2013.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENUÍ, A. M. Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada E Produtividade De Cultivares De Trigo Submetidas a Doses De Nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703–1713, 2015.

ROBERTO, G. G.; CUNHA, C.; SALES, C. R. G.; SILVEIRA, N. M.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A. Variation of Photosynthesis and Carbohydrate Levels Induced by Ethephon and Water Deficit on the Ripening Stage of Sugarcane. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p. 379–386, 2015.

ROLIM, G. de S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas No Ambiente EXCEL Para Os Cálculos de Balanços Hídricos: Normal, Sequencial, de Cultura E de Produtividade Real E Potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 6, n. 1, p. 133–137, 1998.

ROSA, H. J. A.; DO AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane Response to Nitrogen Rates, Measured by a Canopy Reflectance Sensor. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 840–848, 2015.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: FREDEN, S.C.; MERCANTI E.P.; BECKER, M. (eds) **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**. v. 1: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317. 1974.

RUIZ-VERA, U. M.; SIEBERS, M. H.; DRAG, D. W.; ORT, D. R.; BERNACCHI, C. J. Canopy Warming Caused Photosynthetic Acclimation and Reduced Seed Yield in Maize Grown at Ambient and Elevated [CO<sub>2</sub>]. **Global Change Biology**, v. 21, n. 11, p. 4237–4249, 2015.



SABATER, N.; VICENT, J.; ALONSO, L.; COGLIATI, S.; VERRELST, J.; MORENO, J. Impact of Atmospheric Inversion Effects on Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence: Exploitation of the Apparent Reflectance as a Quality Indicator. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 1–20, 2017.

SANTOS, C. M. dos; DE ALMEIDA SILVA, M.; LIMA, G. P. P.; DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO, F. P.; BRUNELLI, M. C.; DE HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological Changes Associated with Antioxidant Enzymes in Response to Sugarcane Tolerance to Water Deficit and Rehydration. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 291–304, 2015.

SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de. Atualização Em Produção de Cana-de-Açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, p. 415, 2006.

SHRESTHA, R.; DI, L.; YU, E. G.; KANG, L.; SHAO, Y.; BAI, Y. Regression Model to Estimate Flood Impact on Corn Yield Using MODIS NDVI and USDA Cropland Data Layer. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 2, p. 398–407, 2017.

SHRUTI, Y.; GOUDA, K. C.; BHAT, N. Impact of Climate Change on Sugarcane Crop at Regional Scale: A Study with Remote Sensing and GIS. In: AGU Fall Meeting Abstracts, **Anais...2014**.

SILVA, M. de A.; DOS SANTOS, C. M.; VITORINO, H. dos S.; RHEIN, A. F. de L. Pigmentos Fotossintéticos E Índice SPAD Como Descritores de Intensidade Do Estresse Por Deficiência Hídrica Em Cana-de-Açúcar. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 173–181, 2014.

SILVA, L. L. da; COSTA, R. F. da; CAMPOS, J. H. B. da C.; DANTAS, R. T. Influence of Precipitations on Agricultural Productivity in Paraibá State. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454–461, 2009.

SILVA, V. de P. R. da; OLIVEIRA, S. D. de; SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, M. T. Risco Climático Da Cana-de-Açúcar Cultivada Na Região Nordeste Do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 180–189, 2013.

SINGH, P.; KIKON, N.; VERMA, P. Impact of Land Use Change and Urbanization on Urban Heat Island in Lucknow City, Central India. A Remote Sensing Based Estimate. **Sustainable Cities and Society**, v. 32, n. Supplement C, p. 100–114, 2017.

SIQUEIRA NETO, M.; GALDOS, M. V.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Direct N<sub>2</sub>O Emission Factors for Synthetic N-Fertilizer and Organic Residues Applied on Sugarcane for Bioethanol Production in Central-Southern Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 2, p. 269–280, 2016.

SPRINGER, K. R.; WANG, R.; GAMON, J. A. Parallel Seasonal Patterns of Photosynthesis, Fluorescence, and Reflectance Indices in Boreal Trees. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 1–18, 2017.

STACKHOUSE, P. W.; WESTBERG, D.; CHANDLER, W. S.; ZHANG, T.; HOELL, J. M. **Prediction Of Worldwide Energy Resource ( POWER ) --- Agroclimatology Methodology --- ( 1 . 0 Latitude by 1 . 0 Longitude Spatial Resolution )**. 2017. Disponível em: <[https://power.larc.nasa.gov/documents/Agroclimatology\\_Methodology.pdf](https://power.larc.nasa.gov/documents/Agroclimatology_Methodology.pdf)>. Acesso em: 23 abr. 2017.

STOKES, C. J.; INMAN-BAMBER, N. G.; EVERINGHAM, Y. L.; SEXTON, J. Measuring and Modelling CO<sub>2</sub> Effects on Sugarcane. **Environmental Modelling & Software**, v. 78, p. 68–78, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815215301110>>.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W. do; HECKTHEUER, L. H. H. As Clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748–755, 2005.

SUN, Y.; FRANKENBERG, C.; JUNG, M.; JOINER, J.; GUANTER, L.; KÖHLER, P.; MAGNEY, T. Overview of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: Retrieval, Cross-Mission Comparison, and Global Monitoring for GPP. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, n. February, p. 808–823, 2018.

SUN, Y.; FRANKENBERG, C.; WOOD, J. D.; SCHIMEL, D. S.; JUNG, M.; GUANTER, L.; DREWRY, D. T.; VERMA, M.; PORCAR-CASTELL, A.; GRIFFIS, T. J.; GU, L.; MAGNEY, T. S.; KÖHLER, P.; EVANS, B.; YUEN, K. OCO-2 Advances Photosynthesis Observation from Space via Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. **Science**, v. 358, n. 6360, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal* 5ªed. **Porto Alegre: Editora Artmed**, 2013.

TEIXEIRA, G. C. da S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência Do Uso Da Radiação Solar E Índices Morfofisiológicos Em Cultivares de Feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 9–17, 2015.

TEODORO, I.; NETO, J. D.; DE HOLANDA, L. A.; NETO, G. D. S.; DE SOUZA, J. L.; BARBOSA, G. V. D.; LYRA, G. B. Weather Variables, Water Balance, Growth, and Agro Industrial Yield of Sugarcane. **Engenharia Agricola**, v. 35, n. 1, p. 76–88, 2015.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. [s.l.] Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology, 1955.

THUM, T.; ZAEHLE, S.; KÖHLER, P.; AALTO, T.; AURELA, M.; GUANTER, L.; KOLARI, P.; LAURILA, T.; LOHILA, A.; MAGNANI, F.; VAN DER TOL, C.; MARKKANEN, T. Modelling Sun-Induced Fluorescence and Photosynthesis with a Land Surface Model at Local and Regional Scales in Northern Europe. **Biogeosciences**, v. 14, n. 7, p. 1969–1984, 2017.

TIWARI, P. R.; KAR, S. C.; MOHANTY, U. C.; DEY, S.; KUMARI, S.; SINHA, P. Seasonal Prediction Skill of Winter Temperature over North India. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 1, p. 15–29, 2016.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. **A história da cana-de-açúcar - da antiguidade aos dias atuais**. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>>. Acesso em: 15 out. 2017.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMS, P. Regional and Global Climate Projections Increase Mid-Century Yield Variability and Crop Productivity in Belgium. **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 659–672, 2016.

VEIGA, J. P. S.; MALIK, A.; LENZEN, M.; FERREIRA FILHO, J. B. de S.; ROMANELLI, T. L. Triple-Bottom-Line Assessment of São Paulo State's Sugarcane Production Based on a Brazilian Multi-Regional Input-Output Matrix. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2017, p. 666–680, 2018.

VERMA, M.; SCHIMEL, D.; EVANS, B.; FRANKENBERG, C.; BERINGER, J.; DREWRY, D. T.; MAGNEY, T.; MARANG, I.; HUTLEY, L.; MOORE, C.; ELDERING, A. Effect of Environmental Conditions on the Relationship between Solar-Induced Fluorescence and Gross Primary Productivity at an OzFlux Grassland Site. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 122, n. 3, p. 716–733, 2017.

VERMA, R. R.; SRIVASTAVA, T. K.; SINGH, P. Climate Change Impacts on Rainfall and Temperature in Sugarcane Growing Upper Gangetic Plains of India. **Theoretical and Applied Climatology**, n. Koshal 2014, p. 1–14, 2018.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P. C. Simulação Do Risco de Deficit Hídrico Em Regiões de Expansão Do Cultivo de Cana-de-Açúcar No Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237–246, 2014.

VICENTE, L. E.; GOMESDANIEL, D.; VICTORIA, D. D. C.; GARÇON, E. A. M.; BOLF, E. L.; ANDRADE, R. G.; DA SILVA, G. B. S. Séries Temporais de NDVI Do Sensor SPOT Vegetation E Algoritmo SAM Aplicados Ao Mapeamento de Cana-de-Açúcar. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1337–1345, 2012.

VU, J. C. V.; ALLEN, L. H. Growth at Elevated CO<sub>2</sub> Delays the Adverse Effects of Drought Stress on Leaf Photosynthesis of the C<sub>4</sub> Sugarcane. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, n. 2, p. 107–116, 2009.

WANG, S.; HUANG, C.; ZHANG, L.; LIN, Y.; CEN, Y.; WU, T. Monitoring and Assessing the 2012 Drought in the Great Plains: Analyzing Satellite-Retrieved Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence, Drought Indices, and Gross Primary Production. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, 2016.

WANG, S.; ZHANG, L.; HUANG, C.; QIAO, N. An NDVI-Based Vegetation Phenology Is Improved to Be More Consistent with Photosynthesis Dynamics through Applying a Light Use Efficiency Model over Boreal High-Latitude Forests. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, 2017a.

WANG, W.; TIAN, Y.; LIU, C.; SUN, Y.; LIU, W.; XIE, P.; LIU, J.; XU, J.; MORINO, I.; VELAZCO, V. A.; GRIFFITH, D. W. T.; NOTHOLT, J.; WARNEKE, T. Investigating the Performance of a Greenhouse Gas Observatory in Hefei, China. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 10, n. 7, p. 2627–2643, 2017b.

WETTERICH, C. B. **Uso de imagens de fluorescência para monitoramento da evolução do cancro cítrico**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

WOOD, J. D.; GRIFFIS, T. J.; BAKER, J. M.; FRANKENBERG, C.; VERMA, M.; YUEN, K. Multiscale Analyses of Solar-induced Fluorescence and Gross Primary Production. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 1, p. 533–541, 2017.

YANG, H.; YANG, X.; ZHANG, Y.; HESKEL, M. A.; LU, X.; MUNGER, J. W.; SUN, S.; TANG, J. Chlorophyll Fluorescence Tracks Seasonal Variations of Photosynthesis from Leaf to Canopy in a Temperate Forest. **Global Change Biology**, v. 23, n. 7, p. 2874–2886, 2017.

ZHANG, Y.; GUANTER, L.; BERRY, J. A.; JOINER, J.; TOL, C.; HUETE, A.; GITELSON, A.; VOIGT, M.; KÖHLER, P. Estimation of Vegetation Photosynthetic Capacity from Space-based Measurements of Chlorophyll Fluorescence for Terrestrial Biosphere Models. **Global change biology**, v. 20, n. 12, p. 3727–3742, 2014.

ZHANG, Y.; GUANTER, L.; BERRY, J. A.; VAN DER TOL, C.; YANG, X.; TANG, J.; ZHANG, F. Model-Based Analysis of the Relationship between Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and Gross Primary Production for Remote Sensing Applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, n. Supplement C, p. 145–155, 2016.

ZHAO, D.; IREY, M.; LABORDE, C.; HU, C.-J. Identifying Physiological and Yield Related Traits in Sugarcane and Energy Cane. **Agronomy Journal**, v. 109, 2017a.

ZHAO, M. W.; ZHANG, X. Y.; YUE, T. X.; WANG, C.; JIANG, L.; SUN, J. L. A High-Accuracy Method for Simulating the XCO<sub>2</sub>global Distribution Using GOSAT Retrieval Data. **Science China Earth Sciences**, v. 60, n. 1, p. 143–155, 2017b.

## **CAPÍTULO 2 – Satellite-based Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, NDVI, and column-averaged CO<sub>2</sub> concentration over sugarcane areas in South-Central Brazil**

**ABSTRACT** - Remote sensing is an important tool for monitoring and forecasting the quality and yield crops. The objective of this study was to analyze the relationship between satellite-based Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF), column-averaged CO<sub>2</sub> (Xco<sub>2</sub>), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with sugarcane yield and sugar level. SIF is related to the photosynthetic potential of the crop, Xco<sub>2</sub> stands for actual photosynthesis conditioned by winds and air temperature. NDVI is related to the vigor and biomass of the vegetation. The study was conducted in South-Central Brazil, the most important sugarcane crop area in the world. Four locations were identified to represent the region being, Pradópolis, Araraquara, and Itacemópolis in São Paulo state and Quirinópolis in Goiás state, Brazil. The data were collected in the period from 2015 to 2016 in orbital data systems. Monthly data of tons of cane per hectare (TCH) and total recoverable sugars (TRS) were collected from sugarcane plots of companies in the region. There was a linear relationship of SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI with the yield and sugar quantity in sugarcane. The increase of SIF corresponded to the vegetative growth of sugarcane, the values of Xco<sub>2</sub> indicated the establishment and harvest of the crop and NDVI, the maturation phase of the area. It was possible to establish seasonal patterns of SIF, Xco<sub>2</sub> and for the development of sugarcane crop. We observed strong negative linear correlations between mean SIF and Xco<sub>2</sub> values, probably due to strong photosynthetic rate associated with sugarcane crop. The maturation period also resulted in a positive correlation between Xco<sub>2</sub> and NDVI due to the decrease of photosynthetic activity in plots. These results indicate the potential of SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI in predictability and monitoring of agricultural crops.

**Keywords:** MODIS, NASA/POWER, OCO-2, phenology, sucrose, Yield

## 2.1 Introduction

Climate change has caused a major impact on the economy and agricultural production, affecting sustainability in agricultural areas (DUDU; ÇAKMAK, 2017). One of the aspects, climate regulates the photosynthetic assimilation of CO<sub>2</sub> and consequently the yield and quality of agricultural crops (SILVA et al., 2013; JENSEN; HERBST; FRIBORG, 2017).

Sugarcane is the main crop of sugar and bioenergy (PHAN et al., 2016). With high global demand for biofuels, Brazil and the United States, main ethanol producers, will need to increase production from 80 to approximately 200 billion liters by 2021 (GOLDEMBERG et al., 2014; CARVALHO et al., 2016).

Brazil stands out worldwide for the greater quantity of sugarcane areas, 73.35 million tons in a harvested area around 10 million hectares. South-central Brazil (São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Mato Grosso, Espírito Santo and Rio de Janeiro, respectively) is responsible for 91% of the Brazilian production (IBGE, 2017).

Sugarcane for being a C<sub>4</sub> grass, has a high photosynthetic rate and high efficiency in the fixation of CO<sub>2</sub> from the atmosphere, reaching about 100 tons of CO<sub>2</sub> captured and fixed in biomass per hectare a year (LA SCALA JÚNIOR; DE FIGUEIREDO; PANOSSO, 2012).

In the photosynthetic process, chlorophyll absorbs part of the solar radiation that re-emitted at longer wavelengths, with the peak at 757 nm, in a fluorescence process, enabling it to measure by high-resolution spectrometers due to atmospheric transparency at such wavelength. (KRAUSE; WEIS, 1991).

These evaluations have been correlated to photosynthetic activity and the efficiency in biomass conversion on a global scale (GUAN et al., 2017; VERMA et al., 2017). In addition, Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) becomes an important measure in carbon cycling studies in the biosphere, linked to the issue of global climate change (FRANKENBERG et al., 2013). Several authors acknowledge the linear relationship of SIF with gross primary productivity (GPP) in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> crops (Liu et al., 2017a; Thum et al., 2017; Yang et al., 2017) and drought monitoring over croplands (LIU et al., 2018a, 2018b).

In recent years, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been widely used in the estimation of GPP (WANG et al., 2017a), visualization of land use (SINGH; KIKON; VERMA, 2017), determination of phenological stages (CLERICI; WEISSTEINER; GERARD, 2012), leaf area index (LEE et al., 2017), biomass (LIU et al., 2017b), the percentage of ground cover with plant residues (DEMATTE et al., 2016; GUAN et al., 2016), besides to the yields of crops such as maize (SHRESTHA et al., 2017), soybean (JOHNSON, 2014), and sugarcane (ZHAO et al., 2017a). Despite all efforts, this technique is not a direct indication of photosynthetic activity and primary productivity such as SIF and  $X_{CO_2}$  (GUAN et al., 2017).

Recently, Column-averaged  $CO_2$  ( $X_{CO_2}$ ) can be evaluated by satellites. Currently, there are six  $CO_2$  measuring instruments, the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY), Tropospheric Emissions Spectrometer (TES), Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2), Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observations (TANSO-FTS), and Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) (CHANCE; MARTIN, 2017). It is also noted that temporal variations of  $X_{CO_2}$  are relevant, as  $CO_2$  is the main gas of additional greenhouse effect, responsible for additional heating observed on the planet (HE et al., 2017).

In the literature, there are studies that relate  $X_{CO_2}$  in diverse environments with vegetable biomass (PARAZOO et al., 2013; HE et al., 2017), however, no study has been found relating  $X_{CO_2}$  to agricultural crops, and a possible controlling factor such as SIF.

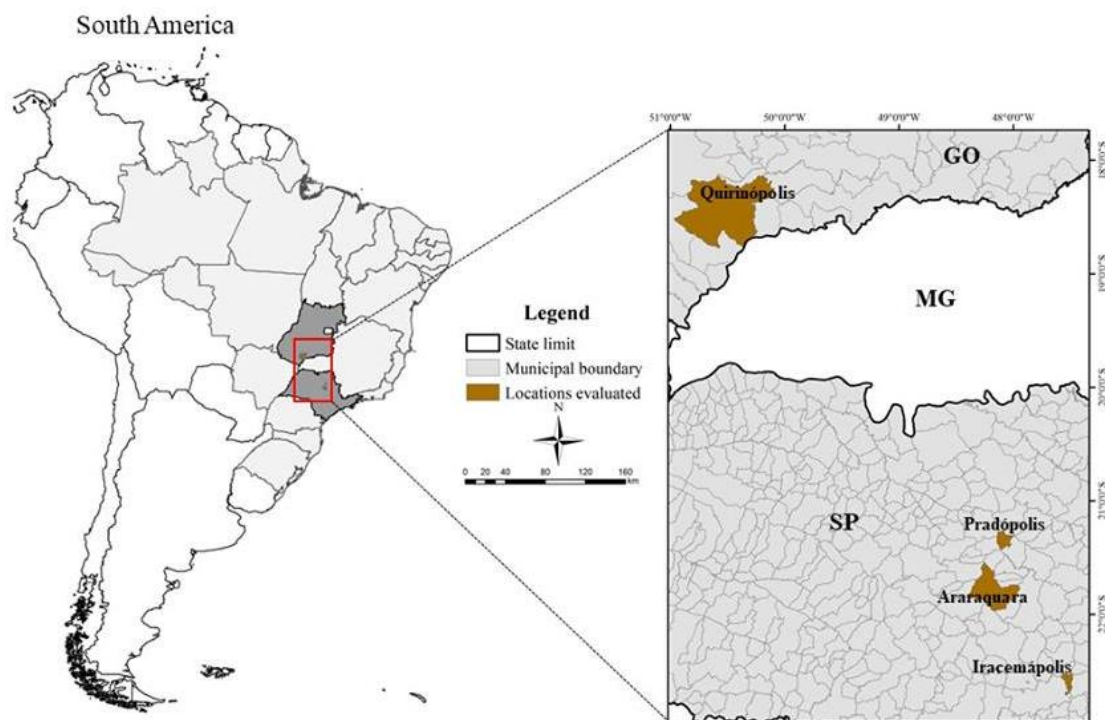
Based on this information, our hypotheses are SIF correlates directly with the photosynthetic potential of the crops.  $X_{CO_2}$  despite being an advective influence it is inversely correlated with the effective photosynthesis of vegetated surface, and NDVI correlates directly with canopy vigor and biomass. Thus, the objective of this study was to analyze the relationship between SIF,  $X_{CO_2}$ , and NDVI with sugarcane yield and sugar level.

## **2.2 Material and methods**



### 2.2.1 Location and Description of the Study Area

The study was conducted in four locations identified to represent the south-central Brazil: Pradópolis (21°21' S lat and 48°03' W long; average altitude: 529 m), Araraquara (21°47' S lat and 48°10' W long; average altitude: 664 m.), and Iracemópolis (22°34' S lat and 47°31' W long; average altitude: 608 m) in São Paulo state and, Quirinópolis (18°26' S lat and 50°26' W long; average altitude: 540 m) in Goiás state, Brazil (Figure 1). In Brazil, these localities in São Paulo state are concentrated the main agroindustry complexes of sugarcane. While Quirinópolis in Goiás state is one of the localities of the region that stood out in the process of expanding sugarcane crops promoted by last Brazilian National Development Plan (OLIVEIRA; RAMALHO, 2006).



**Figure 1.** Main sugarcane-producing regions in Brazil and localities used in this study.

The climate of Araraquara-SP, Iracemópolis-SP, Pradópolis-SP, and Quirinópolis-GO is classified as B1rB'4a, B1rB'3a, B1rA'a', and B3rB'4a, respectively (THORNTHWAITE, 1948). The soils of Araraquara-SP, Iracemópolis-SP, and Pradópolis-SP localities are classified as Oxisols, and Quirinópolis-GO is classified as Ultisols (USDA Soil Taxonomy).

### 2.2.2 Meteorological data, SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI

Meteorological data were collected in the period of 2015-2016 from orbital data systems (Table 1). For meteorological analyses were used daily data adjusted in monthly scale.

**Table 1.** The variables of this study with sensors and platforms, temporal and spatial resolutions and the measurement period.

Variable	Source	Temporal Resolution	Spatial grid Resolution	Measurement Period
Average air temperature at 2 m (°C)	GEOS-5 FP-IT (NASA/POWER) (STACKHOUSE et al., 2017)	Daily	1°	Jan. 1, 2013 - Dec. 31, 2016
Global solar radiation (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	FLASHFlux Version 3 (A, B, C) (NASA/POWER) (STACKHOUSE et al., 2017)	Daily	1°	Jan. 1, 2013-present
Precipitation (mm)	TRMM_3B42_Daily v7) (NASA Giovanni, 2016)	Daily	0.25 °	Jan. 1, 1998-present
NDVI (Rouse et al., 1974)	(MOD13C2 v5) MODIS – Terra (SATVeg, 2016)	16-day	0.25°	Feb. 1, 2000-present
SIF 757 nm (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> μm <sup>-1</sup> )	OCO-2 (O'DELL et al., 2012)	16-day	1 km × 2 km	Jul. 2, 2014-present
Xco <sub>2</sub> (ppm)	OCO-2 (O'DELL et al., 2012)	16-day	1 km × 2 km	Jul.2,2014-present
Wind speed at 10 m (m s <sup>-1</sup> )	GEOS-5 FP-IT (NASA/POWER) (STACKHOUSE et al., 2017)	Daily	1°	Jan. 1, 2013 - Dec. 31, 2016
Relative humidity at 2 m (%)	GEOS-5 FP-IT (NASA/POWER) (STACKHOUSE et al., 2017)	Daily	1°	Jan. 1, 2013 - Dec. 31, 2016

From meteorological data of average air temperature ( $T$ ), global solar radiation ( $Q_g$ ), wind speed ( $u_2$ ) and relative humidity ( $RH$ ), with these variables was estimated potential evapotranspiration (PET) by Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) method, considering sensible heat flow on the ground equal to zero.

From PET and precipitation ( $P$ ) was estimated sequential water balance according to the method proposed by Thornthwaite and Mather (1955) with a constantly available water capacity (CAD) of 100 mm. Actual evapotranspiration (AET, in mm), water storage in the soil (STO, in mm), water surplus (EXC, in mm) and water deficit (DEF, in mm) were estimated at 10-day period following directives proposed by Rolim et al. (1998). EXC indicates the amount of water that has been drained into the water table, which will be made available for the crop. DEF (DEF= PET- AET) indicates how much water is missing in the soil-plant-atmosphere system, therefore with losses of yield and changes in the amount of sugar (MARCARI; ROLIM; APARECIDO, 2015).

The OCO-2 project has higher spatial resolution than MODIS, so NDVI was collected within the spatial limits established for OCO-2. The data of Tons of Cane per Hectare (TCH, in  $t\ ha^{-1}$ ) and Total Recovery Sugars (TRS, in  $kg\ t^{-1}$ ) were collected with sugarcane companies in the region and stratified by level of the municipality in the period between April and November of the growing seasons 2015/2016 and 2016/2017. These data consider an average of the total production of the typical cultivars of sugarcane cultivated in these areas.

The sugarcane cultivation observed in the region has four phenological stages (budburst, tillering, development, and maturation) in addition to harvest and planting (MARCARI; ROLIM; APARECIDO, 2015). The planting usually occurs in the summer, between February and March. In the first year of development of this crop, budburst occurs between March and April. The tillering, which is the release of stalks by plants between May to August, and the development occurs on average from September to March of the second year (production year) followed by maturation in May to July. The harvesting starts in May until August, depending on the harvest capacity of the mill. This information on average phenology was raised by Marcari et al. (2015) for more than 15 years in the same regions of this study.

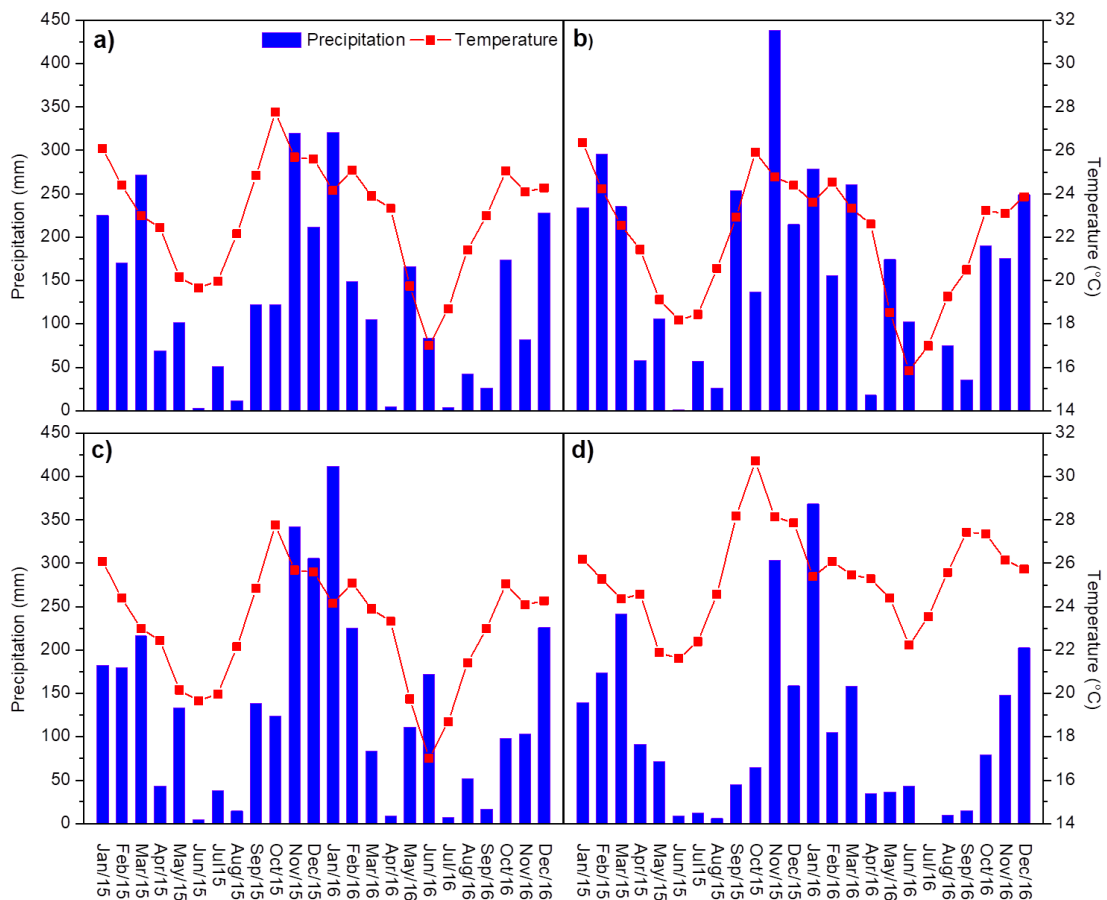
### 2.2.3 Analysis of Results

Initially, temporal trends of NDVI, SIF, and Xco<sub>2</sub> were removed by the regression method as suggested by Gujarati and Porter (2011). Subsequently, variations of time series were smoothed by the statistical technique of moving averages for every three ten-day periods. The offset was used for readjustment of SIF time series, using mean rate to exclude negative values and linear correlation analysis.

The identification of the importance of each variable in the system was through multivariate analyses tool of principal components (PCA), with standardized data (mean null and unit variance). The new variables are eigenvectors (principal components) generated by linear combinations of original variables, constructed with eigenvalues of the covariance matrix (HAIR et al., 2009). The principal components whose eigenvalues were higher than the unit were considered, according to the criterion established by Kaiser (1958). Response Surface Methods was used to examine the relationships between SIF, TCH, TRS, NDVI, and Xco<sub>2</sub>, indicating levels that optimize these responses (GUNST, 1996).

## 2.3 Results

The annual temperature average in the localities was 23 °C (Figure 2). The locations with lowest and highest annual temperatures were Iracemápolis-SP and Quirinópolis-GO with 22 °C and 25 °C, respectively. Already, Araraquara - SP and Pradópolis - SP had the same average temperature of 23°C during years 2015-2016. These results are in accordance with requirements of sugarcane crops in South-Central Brazil.



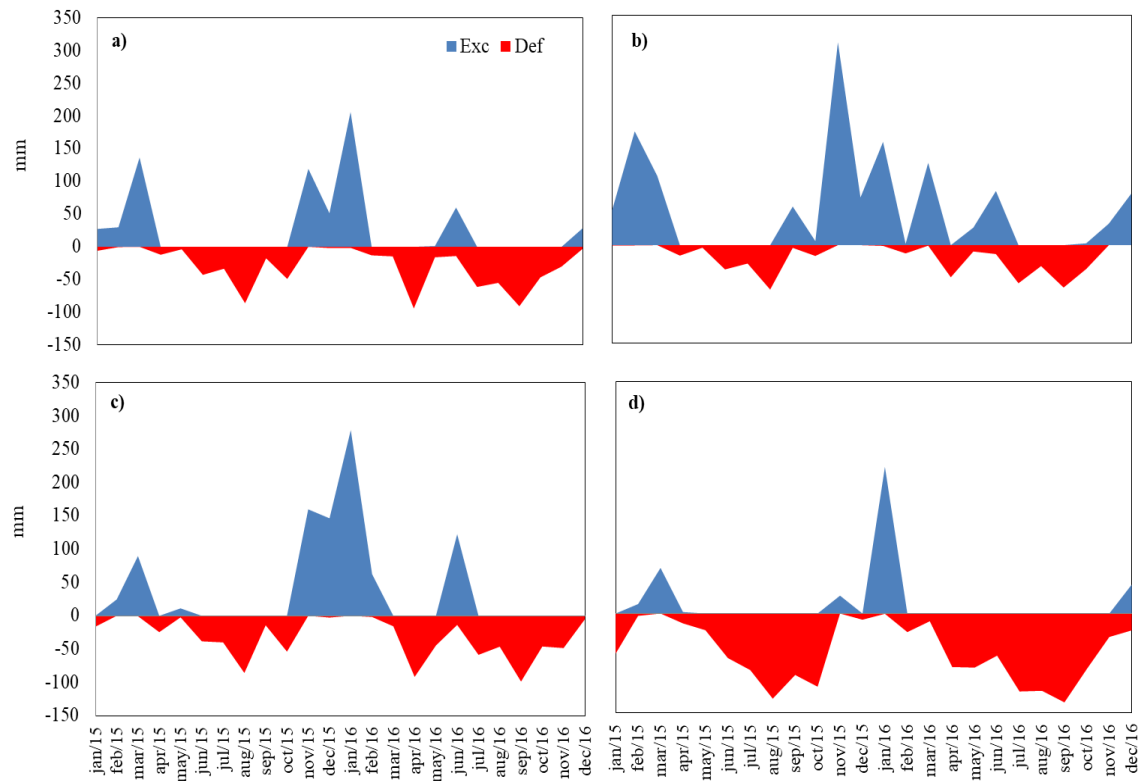
**Figure 2.** Average temperature (°C) and precipitation (mm) in a monthly period of 2015 - 2016 in localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemópolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO.

The average annual precipitation was 1573 mm. The average annual precipitation in Araraquara, Iracemópolis, Pradópolis, and Quirinópolis were 2995 mm, 3846 mm, 3304 mm, and 2687 mm, respectively. The year 2015 recorded the biggest volume of rains in all studied localities. Always in the winter, there was an average reduction of 88 % totals monthly.

Average annual water surplus between localities was 806 mm, and highest soil water storage occurred in January and February (Figure 3), the planting and high growth of sugarcane occur in these months. Iracemópolis presented highest water surplus (1289 mm) in two years studied, while, Quirinópolis obtained only 378 mm. In four locations in March in two years studied there was water surplus in the soil. In October, the amount of water was lower, however, in November it presented water surplus.

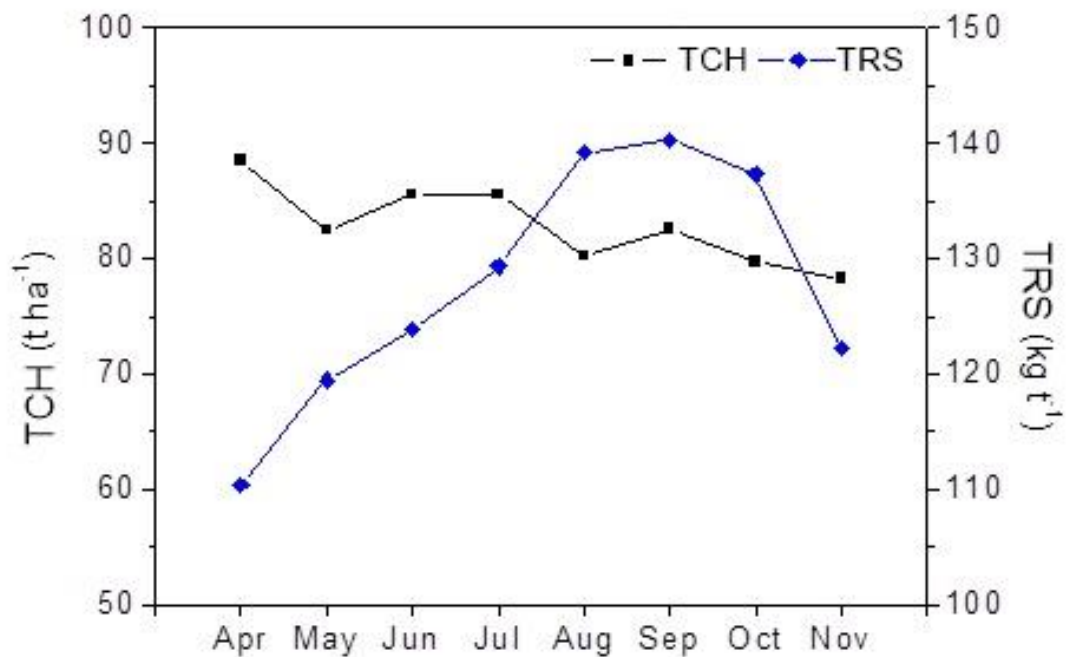
The decreasing order of intensities of water deficiencies in studied

sugarcane localities was 1379 mm, 750 mm, 694 mm, and 453 mm for Quirinópolis-GO, Pradópolis-SP, Araraquara-SP, and Iracemópolis-SP, respectively (Figure 3).



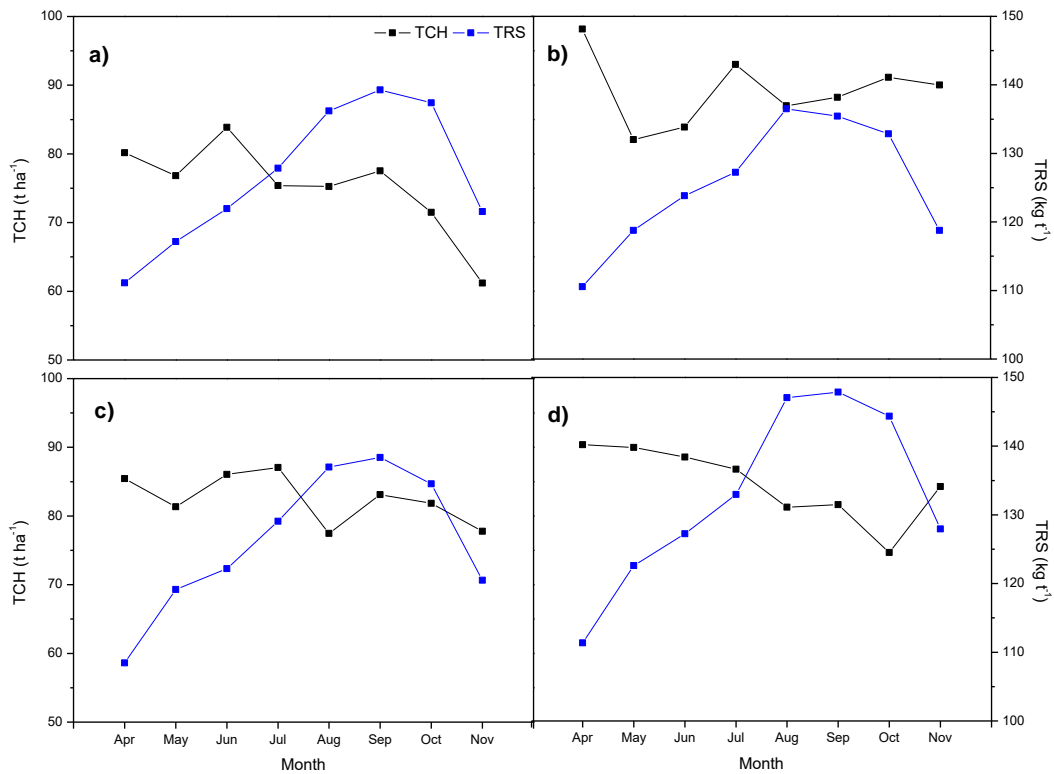
**Figure 3.** Surplus (EXC) (mm) e monthly water deficit (DEF) (mm) in localities: a) Araraquara – SP, b) Iracemópolis – SP, c) Pradópolis – SP, and d) Quirinópolis – GO in period de 2015 – 2016, estimated by Thornthwaite and Mather model (1955) with available water capacity equal to 100 mm.

The average value of Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) in the 2015-2016 period was  $82.8 \text{ t ha}^{-1}$  (Figure 4). The average value of Total Recoverable Sugars (TRS) was  $128 \text{ kg t}^{-1}$ . The highest average TCH value occurred in April. However, The TRS increased until September with an increase of 27 % in relation to the beginning of the harvest. At the end of the crop cycle, there was a decrease of 11 % until November.



**Figure 4.** Monthly average Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) in relation to the analyzed localities: Araraquara-SP, Iracemápolis-SP, Pradópolis-SP, and Quirinópolis-GO in the 2015-2016 period.

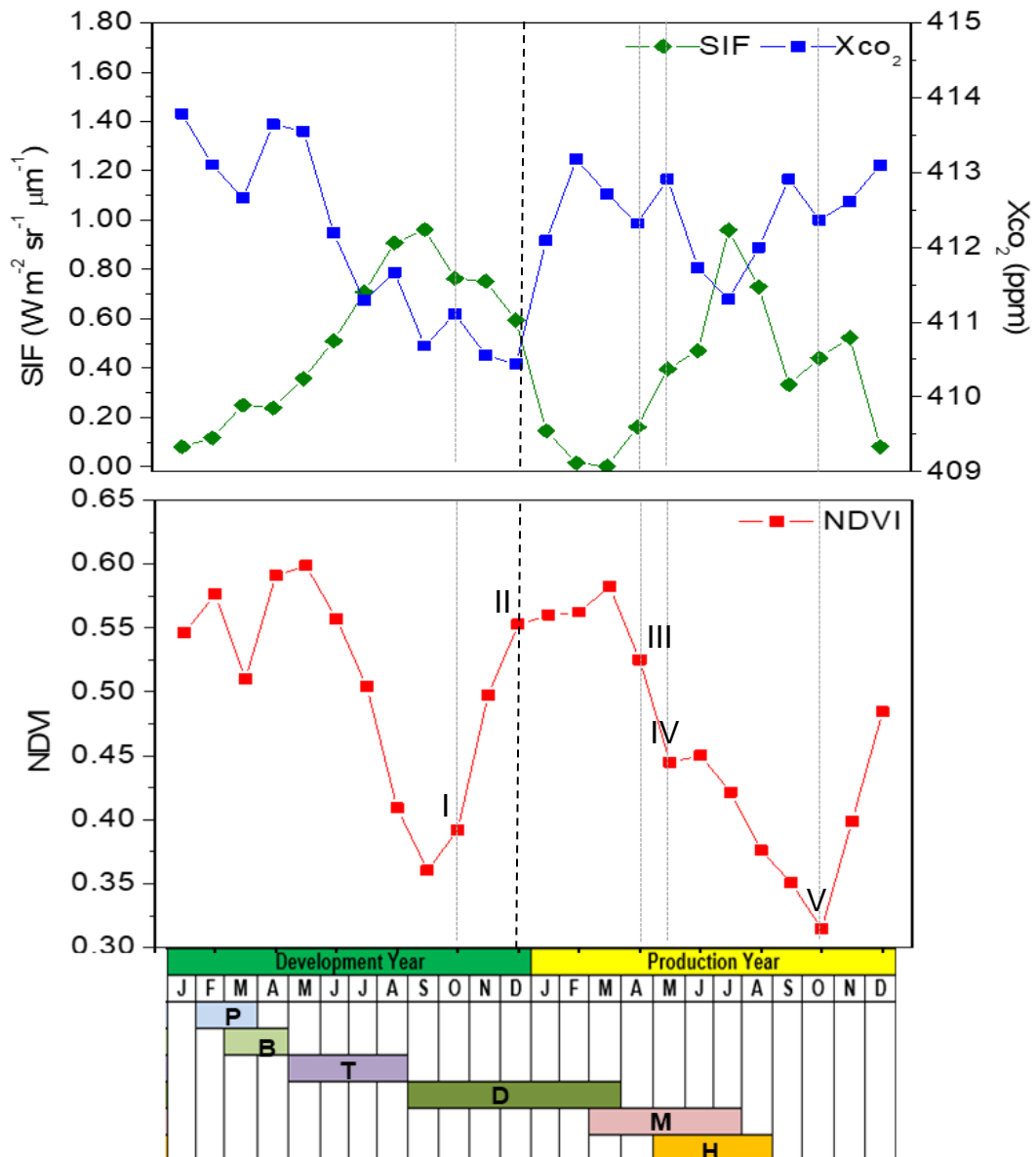
The highest average value of TCH occurred in Iracemápolis with 89 t ha<sup>-1</sup>. In this same location, the lowest value of TRS obtained was equal to 125 kg t<sup>-1</sup> (Figure 5.b). In Quirinópolis, it obtained the highest value of TRS, 133 kg t<sup>-1</sup> (Figure 5.d).



**Figure 5.** Monthly average of tons of sugarcane per hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) in the localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemópolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO in the 2015-2016 period.

Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) in localities was close to Zero in the warmer period between January and April, corresponding to the planting and maturation of sugarcane areas (Figure 6). Highest values, around  $1 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ , were observed during winter and spring, between July and December. Regional mean values of SIF were higher in September of 2015 and July of 2016, with  $0.96 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  for both months (Figure 6).





**Figure 6.** Monthly average of SIF-757nm,  $X_{CO_2}$ , and NDVI of four sugarcane producing localities between 2015 and 2016. P= Planting, B= Budburst, T= Tillering, D= Development, M= Maturation, H= Harvest.

Five different SIF,  $X_{CO_2}$  and NDVI conditions were separated in relation to TCH and TRS (Table 2 and Table 3) using the 1st and 3rd quartile of the distribution of each variable.

**Table 2.** Different conditions based on quartiles of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF), Column-averaged CO<sub>2</sub> (Xco<sub>2</sub>) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in relation to the development of sugarcane.

Classification	SIF ( $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$ )	Xco <sub>2</sub> (ppm)	NDVI
High	$x > 0.7$	$x > 412.5$	$x > 0.5$
Medium	$0.4 \leq x \leq 0.7$	$411.5 \leq x \leq 412.5$	$0.4 \leq x \leq 0.5$
Low	$x < 0.4$	$x < 411.5$	$x < 0.4$

**Table 3.** Conditions of the crop in relations to SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI in localities of this study.

	Condition				
	I	II	III	IV	V
	Beginning Development	Middle Development	Beginning Maturation	Middle Maturation	End of harvest
<b>SIF</b>	High	Medium	Low	Low	Medium
<b>Xco<sub>2</sub></b>	Low	Low	Medium	High	Medium
<b>NDVI</b>	Low	High	High	Medium	Low

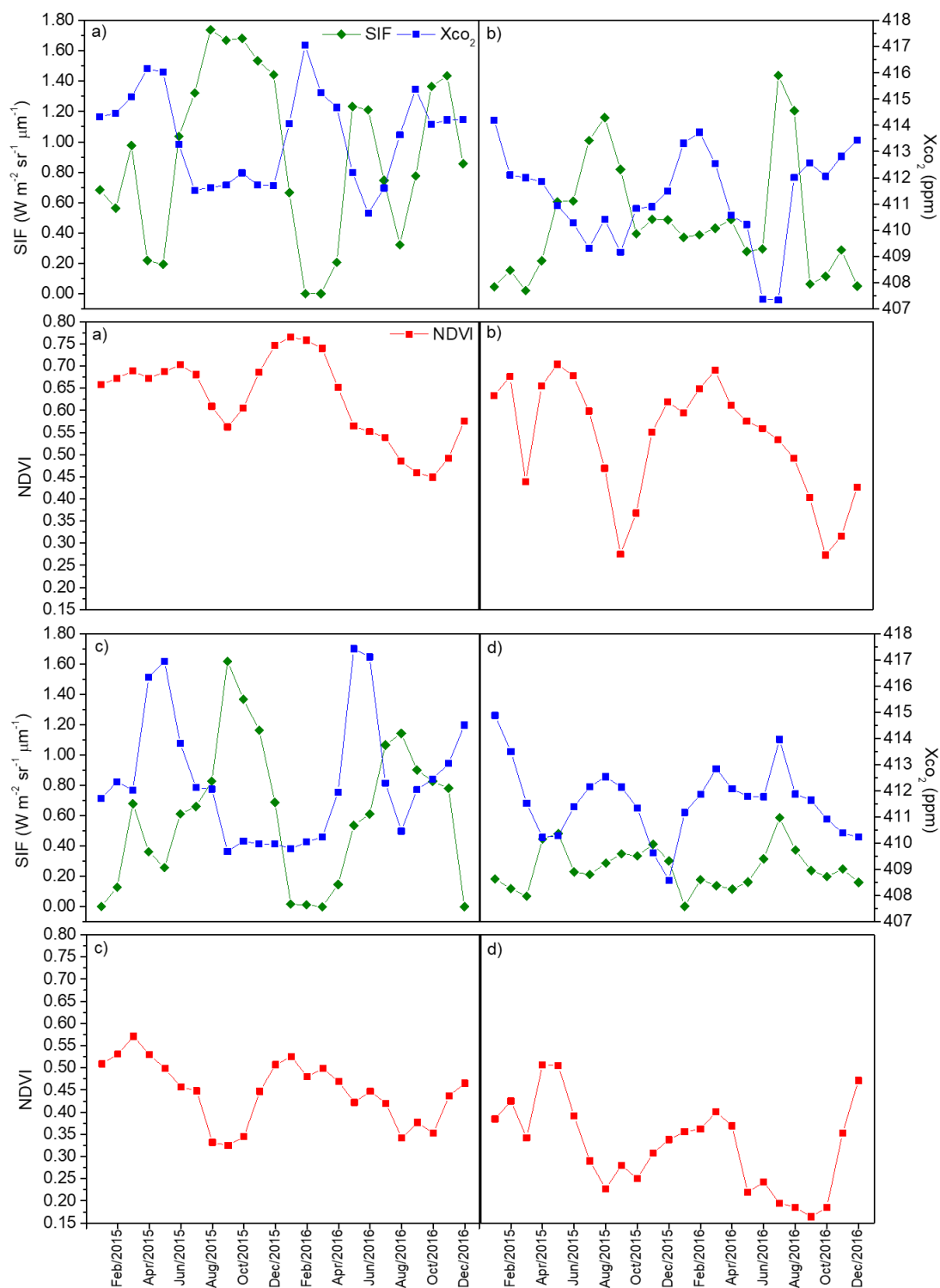
The temporal variation pattern of the Xco<sub>2</sub> concentration was inversely related to SIF, which values were higher in the summer, between December and March (416 ppm) and lower values in the winter, between July and November (409 ppm).

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) had an inverse pattern of SIF and like of Xco<sub>2</sub>, with a maximum value of 0.60 in May/2015 and 0.58 in March/2016. It occurred due to the period of maturation termination and beginning of harvest in study areas.

Strong negative and significant linear correlations ( $r = - 0.77$ ,  $p < 0.05$ ) were observed between average values of SIF and Xco<sub>2</sub> and for mean values of SIF and NDVI ( $r = - 0.60$ ,  $p < 0.05$ ), however, between average values of Xco<sub>2</sub> and NDVI occurred positive correlation ( $r = 0.36$ ,  $p < 0.05$ ).

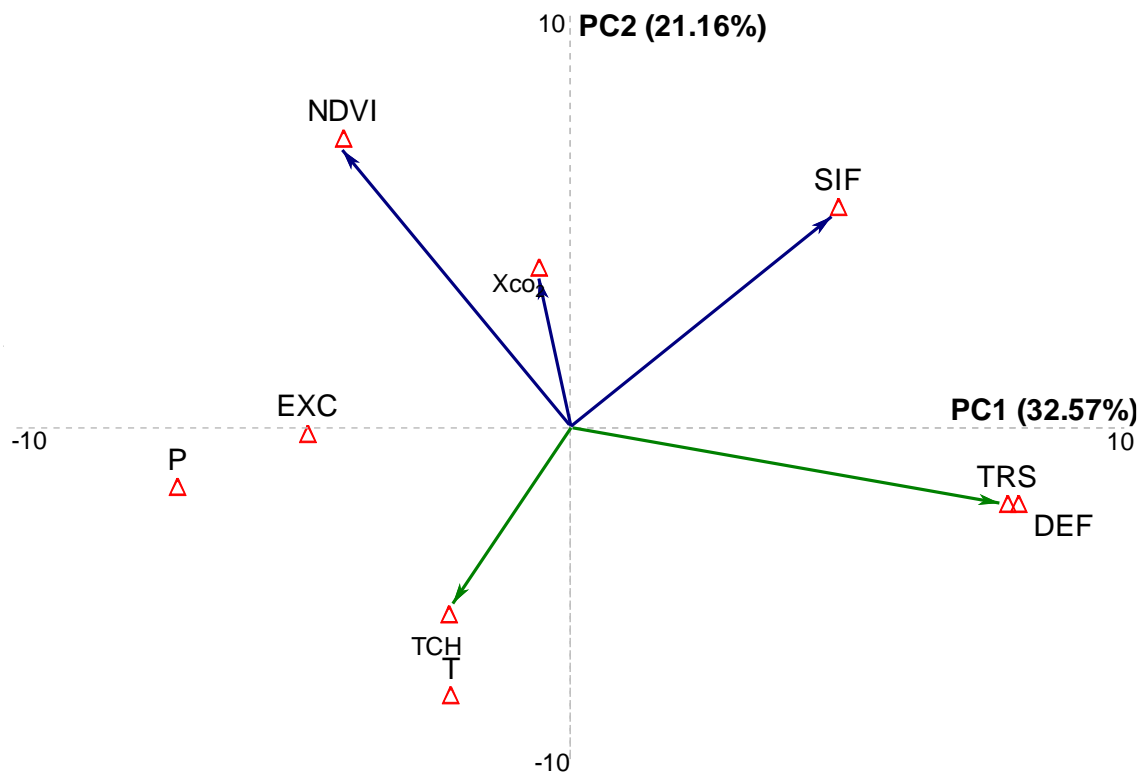
SIF, Xco<sub>2</sub> e NDVI conditions of localities had a high variability, however, temporal trend pattern was similar (Fig. 7). For example, for conditions of Table 3: I - SIF ranged from  $0.15\ W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$  to  $1.67\ W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$  for Quirinópolis-GO and Araraquara-SP, respectively. Xco<sub>2</sub> ranged from 409 ppm to 412 ppm in Iracemápolis-SP and Quirinópolis-GO, and NDVI between 0.27

to 0.60 in Iracemápolis–SP and Araraquara-SP, respectively (Fig. 7). For all localities, maximum peaks of  $X_{CO_2}$  (between January and April) always occurred around 5-6 months before maximum peaks of SIF, and a minimum of NDVI (between June and September).



**Figure 7.** Monthly moving averages of solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF 757nm), Column-Averaged CO<sub>2</sub> (Xco<sub>2</sub>) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the localities: a) Araraquara-SP, b) Iracemápolis-SP, c) Pradópolis-SP and d) Quirinópolis-GO, between 2015 and 2016.

The Principal Component Analysis (PCA) explained 53.73% of system variability. The Principal Component 1 (PC1) represents 32.57% of the total variance of the sugarcane crop and the Principal Component 2 (PC2) it is related to the orbital data with the surface, presented 21.16% of the total variance of the original data (Figure 8).

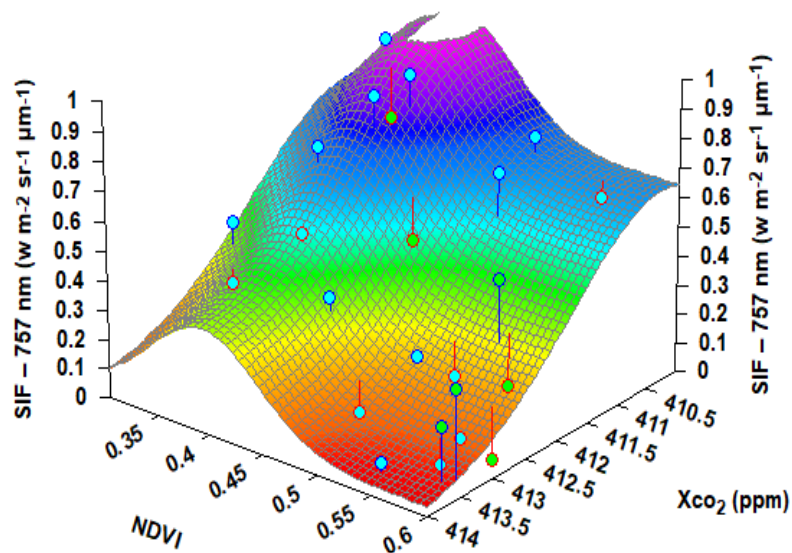


**Figure 8.** Principal components analysis with variables. NDVI= Normalized Difference Vegetation Index, Xco<sub>2</sub>= Column-Averaged CO<sub>2</sub>, SIF= Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, EXC= Water Surplus, P= Precipitation, TCH= Tons of Sugarcane per Hectare, T= Temperature, TRS= Total Recovered Sugars, DEF= Water deficit, PC1= Principal Components 1, and PC2= Principal Components 2.

In PC1, DEF, P, NDVI, T, and SIF were the most important variables. There is a direct dependence relation between P, NDVI, T, Xco<sub>2</sub>, and EXC with TCH. In contrast, DEF, SIF, and TRS had an inverse relationship with TCH. The most important variable for TCH was P. TCH in PC2 had an inverse relationship with NDVI and SIF, and a little influence with Xco<sub>2</sub>. For the sugarcane quality in PC1, DEF and SIF have a direct relationship with TRS. However, TRS had an inverse relationship with P, NDVI, T, EXC, and Xco<sub>2</sub>. The

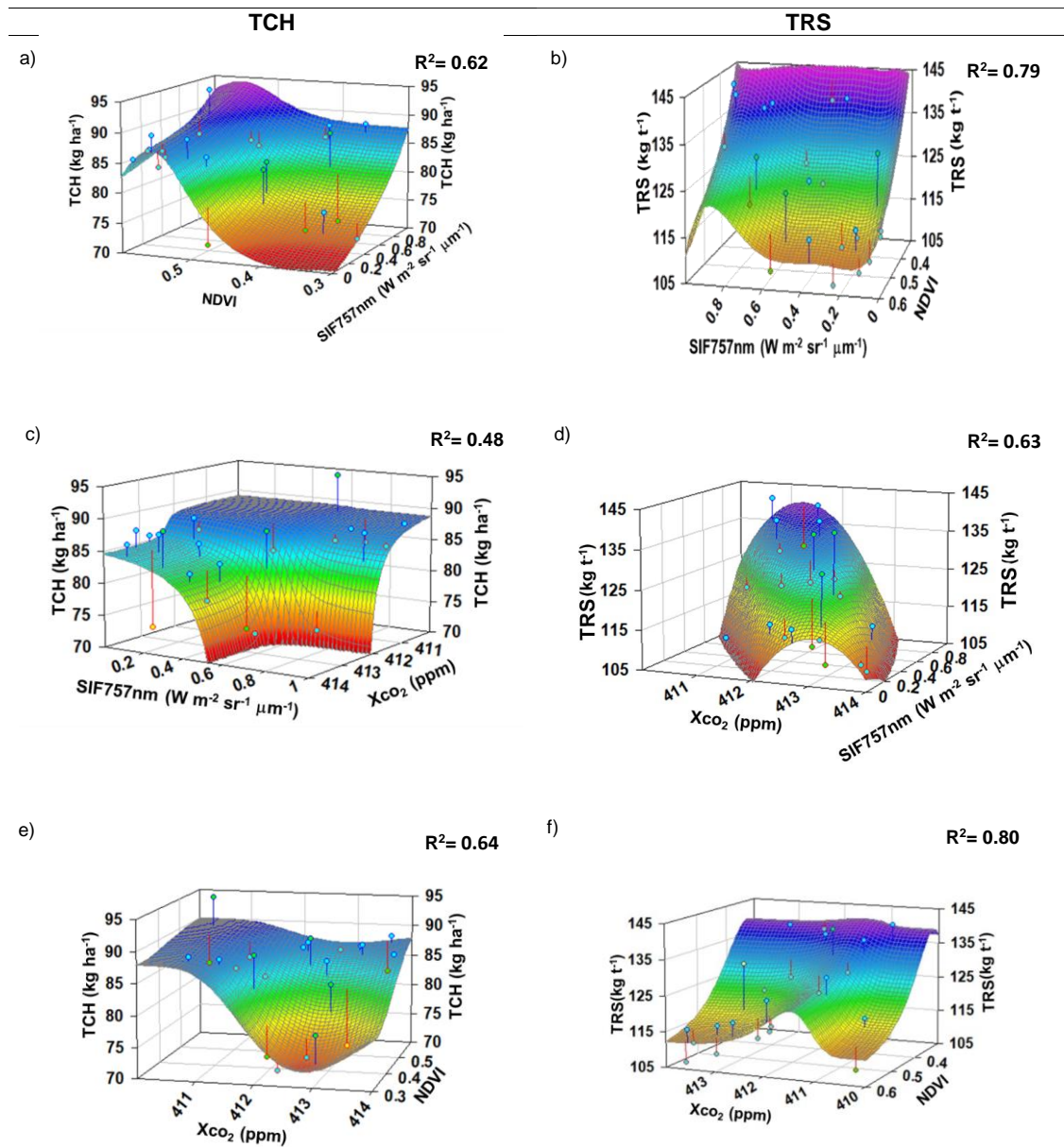
most important variable for the TRS had DEF. TCH in PC2 had an inverse relationship with NDVI and SIF, and little influence with  $X_{CO_2}$ .

The response surface model for SIF's estimation in function of  $X_{CO_2}$  and NDVI was significant to 0.05 with  $R^2 = 0.82$  (Figure 9). The maximization of SIF occurred between 412 ppm and 410 ppm of  $X_{CO_2}$  and between 0.35 and 0.5 of NDVI.



**Figure 9.** Response surface for Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) estimation in function Column-Averaged  $CO_2$  ( $X_{CO_2}$ ) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Response surfaces for the estimation of TCH and TRS, both in function of NDVI and  $X_{CO_2}$ , these were significant at 0.05 with the best  $R^2$  equal to 0.64 and 0.80, respectively (Figure 10.e and Figure 10.f).



**Figure 10.** Response surface for Tons of Sugarcane per Hectare (TCH) and Total Recoverable Sugars (TRS) estimation in function of Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF), Column-averaged CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). a) TCH in function with NDVI and SIF, b) TRS in function with NDVI and SIF, c) TCH in function with SIF and Xco<sub>2</sub>, d) TRS in function with Xco<sub>2</sub> and SIF, e) TCH in function with Xco<sub>2</sub> and NDVI, and f) TRS in function with Xco<sub>2</sub> and NDVI.

There was the maximization of TCH (Figure 10.e) with decrease of Xco<sub>2</sub> and with increase of NDVI. However, TRS (Figure 10.f) was maximized with NDVI between 0.35 e 0.45, and Xco<sub>2</sub> between 412 ppm and 411 ppm.

## **2.4 Discussion**

### **2.4.1 Temperature and precipitation**

The temperatures of localities are adequate for the development and accumulation of sugar in the cane. Areas with air temperatures between 18 °C and 38 °C favors the sugarcane production (TEODORO et al., 2015). It should be noted that the air temperature strongly influences evapotranspiration and water use efficiency, these are regulated by the availability of water in sugarcane cultivation in tropical regions (DA SILVA et al., 2013).

The average annual precipitation values of this study are in the range of sugarcane demand. The precipitation from 1,000 mm and well distributed, it becomes sufficient to promote high yields without the use of irrigation (ALMEIDA et al., 2008; SILVA et al., 2009).

Temperature and precipitation decreased in the winter, which correspond to tillering, beginning of vegetative development, maturation and harvesting. However, low temperatures of the air benefit the concentration of sucrose because they reduce the growth of the plant due to the diminution of its metabolism (Araújo et al., 2016).

### **2.4.2 Hydric balance**

Sprouting and vegetative development occur in the summer and spring, respectively, in these phenological stages, there were water surplus and high temperatures. Sugarcane crops in south-central Brazil have a high demand for temperature, water, and solar radiation in October and March due to tillering and more intense vegetative growth, which occur between 60 and 150 days after planting (MACHADO et al., 2009; JAIN et al., 2015).

In 2016 in the localities of Araraquara-SP, Pradópolis-SP, and Quirinópolis-GO there was a greater water deficit in relation to the 2015 year. The water deficit interferes negatively with photosynthesis (ROBERTO et al., 2015).

In the winter, the tillering and beginning of vegetative development, there was greater water deficiency. In this water condition, the primary response of



sugarcane is the closure of stomata, so that water loss through leaf transpiration does not occur, consequently, this plant reaction reduces the availability of CO<sub>2</sub> for photosynthesis by inhibiting the biomass production. However, there is a decrease in chlorophyll content in the leaf (SIQUEIRA NETO et al., 2016), as exemplified by Silva et al. (2014).

#### **2.4.3 Sugarcane yield and quality**

Sugarcane harvest season is related to the planting system, it can be one year or one year and a half system interfering in the yield. The harvest months with higher TRS values and lower TCH values are related to the importance of soil water reduction and temperature decrease in the maturation stage of the crop. The increase of the sucrose content in the stalks induces maturation. At this stage, there is a possibility of the occurrence of the maximum sucrose point (Van Heerden et al., 2014; Alexander, 1973). Normally, the harvest begins in April due to the reduction of vegetative growth and can extend until November.

#### **2.4.4 SIF, XCO<sub>2</sub>, and NDVI**

SIF has reached close to zero in the warmer months due to its sensitivity to high-temperature stresses (DAUMARD et al., 2010; LEE et al., 2013; ZHANG et al., 2014). The high values of Xco<sub>2</sub> in the summer are related to most of the areas of sugarcane in south-central Brazil that are in the period of planting and beginning of budding. Thus, these areas are absorbing smaller amounts of Xco<sub>2</sub> for the photosynthetic activity.

In the period I to II, from September to December of 2015, there was an increase of NDVI, while the SIF values were high and low Xco<sub>2</sub>. This increase in crop biomass production may be related to shooting growth, that is, stem elongation. This same period was observed by Marcari et al. (2015) as the first half of the vegetative development of sugarcane crop in some regions of this study. Springer et al. (2017) verified that NDVI is sensitive, mainly, to structural changes of the canopy associated to the foliar development and the senescence.

NDVI correlates with vegetation vigor, leaf area index, vegetation coverage area, and green biomass, and can still be used to assess climatic impacts on crop yield (PANDEY et al., 2015). Although, NDVI has scale problems and saturation in areas with high biomass (Mandosela et al., 2018), it was possible to observe the variation of this variable throughout the phenological phases of crops.

SIF is related to the indirect evaluation of photosynthetic performance regarding phenological stages (HU; LIU; LIU, 2017), which allows monitoring of agricultural production by remote sensing in an efficient and effective way (WANG et al., 2016).  $X_{CO_2}$  is inversely correlated to the level of photosynthetic activity of the crop.

There was an increase of  $X_{CO_2}$  and a decrease of NDVI associated to the low values of SIF between condition II and III (Table 3). This condition is linked directly to the end of maturation and to the beginning of the harvest (Marcari et al., 2015). The decrease in SIF in condition III is related to the reduction of the photosynthetic activity of area and increase of dry leaves.

Luus et al. (2017) verified that the variation of SIF allows the knowledge of different phenological stages associated to the carbon cycling in the atmosphere and can be used in studies of the effects of climatic changes on crops (Figure 5).

Condition IV was intermediate with areas being harvested, in this condition the decrease of NDVI occurs, in addition to the vegetative development stage of the harvests harvested in previous agricultural years, represented by the increase in SIF (Marcari et al., 2015). In condition V, which represents the end of the harvest in areas, simultaneously there were many plots with low SIF and high  $X_{CO_2}$ , indicating a new production cycle with plants still in early vegetative development (Figure 5). In this way, these variables become a powerful tool to monitor the photosynthetic phases in different vegetation (JEONG et al., 2017; SPRINGER; WANG; GAMON, 2017).

#### **2.4.5 Principal Component Analysis (PCA)**

SIF has an inverse dependence relation with TCH because at the tillering stage and the beginning of the development of sugarcane with duration around five months.

In the tillering and growth phases, there is a greater photosynthetic activity promoting greater energy expenditure to produce tillers, with gains in the leaf area. The process of senescence of green leaves in the maturation becomes bigger, thus decreasing the photosynthetic efficiency (PORCAR-CASTELL et al., 2014; GUAN et al., 2016).

There was a direct dependence relation of T and P with TCH. For the high-intensity vegetative growth of the crop that normally occurs from October to March, there is an accumulation about 75% of plant mass, consequently, this requires favorable conditions of precipitation, temperature, and radiation (MARCARI; ROLIM; APARECIDO, 2015).

In dryland sugarcane crops, rainfall becomes important, because the lack of water in the soil causes the reduction of the water potential of the leaf, with this, it affects gas exchanges and the assimilation of CO<sub>2</sub> in chloroplasts, limiting the production of assimilated to the development and production of sucrose (TAIZ; ZEIGER, 2013).

There was a direct influence of SIF with TRS, according to Fig. 10. ,because during the maturation, the highest accumulation of sucrose occurs as a response of the combination of photosynthetic rate in leaves, displacement of carbon pools, loading and unloading of the phloem according to source and drain regulation, membrane transport in vacuoles, coinciding with periods of induced restrictions by climate that lead to maturation (Watt et al., 2014; McCormick et al., 2009).

NDVI has a direct dependency relationship with TCH due to plant vigor. While NDVI has an indirect dependency relationship with TRS. This may be explained by the higher accumulation of sucrose occurring at maturation stage.

Principal components analysis, according to PC2, allows verifying that bigger Xco<sub>2</sub> the smaller will be TCH because the crop is not absorbing Xco<sub>2</sub>. Probably, there is a reduction in the rate of carbon assimilation when the demand for carbohydrate decreases (MCCORMICK; WATT; CRAMER, 2009). The water deficiency can influence the reduction of cellular demand for carbon,

thus decreasing yield. The effects of this deficiency impair both the initial establishment stage of the culture and its growth.

It should be noted that sugarcane has the ability to fix carbon and potential for increased yields under conditions of high CO<sub>2</sub> concentration (MAGRO et al., 2011).

DEF was the most influential in TRS because the moderate water restriction benefits the maturation, once the restriction to the vegetative growth exists more photoassimilates to the accumulation of sucrose in stems (ROBERTO et al., 2015).

## **2.5 Conclusion**

There was a relationship Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) with Column-averaged CO<sub>2</sub> (Xco<sub>2</sub>), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with the sugar yield and quality of sugarcane.

The increase in SIF indicates the vegetative growth of sugarcane, the Xco<sub>2</sub> values indicate the establishment and harvest, and NDVI the maturation of the crop.

There are five seasonal patterns that characterize sugarcane development: in condition I – high SIF, low Xco<sub>2</sub>, and low NDVI corresponds to the onset of vegetative development, in II- mean SIF, low Xco<sub>2</sub>, and high NDVI corresponds to half of the vegetative development, in III- low SIF, mean Xco<sub>2</sub> and high NDVI correspond to the onset of maturation, in IV- low SIF, high Xco<sub>2</sub>, and average NDVI corresponds to half the maturation period and in V- mean SIF, medium Xco<sub>2</sub> and low NDVI at the end of the harvest.

These results indicate the potential of SIF, Xco<sub>2</sub>, and NDVI in the predictability and monitoring of agricultural crops.

## References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., Ab, W., 1998. Allen\_FAO1998 1–15. doi:10.1016/j.eja.2010.12.001
- Almeida, A.C.D.S., Souza, J.L., Teodoro, I., Barbosa, G.V.S., Moura Filho, G., Ferreira Júnior, R.A., 2008. Vegetative development and production of sugarcane varieties as a function of water availability and thermic units. *Ciênc. agrotec.*, Lavras 1441–1448. doi:10.1590/S1413-70542008000500013
- Carvalho, J.L.N., Nogueirol, R.C., Menandro, L.M.S., Bordonal, R. de O., Borges, C.D., Cantarella, H., Franco, H.C.J., 2016. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy* 9, 1181–1195. doi:10.1111/gcbb.12410
- Chance, K. V., Martin, R. V., 2017. Spectroscopy and radiative transfer of planetary atmospheres, 1st ed. Oxford University Press.
- Clerici, N., Weissteiner, C.J., Gerard, F., 2012. Exploring the Use of MODIS NDVI-Based Phenology Indicators for Classifying Forest General Habitat Categories 1781–1803. doi:10.3390/rs4061781
- Da Silva, V. de P.R., Da Silva, B.B., Albuquerque, W.G., Borges, C.J.R., de Sousa, I.F., Neto, J.D., 2013. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agric. Water Manag.* 128, 102–109. doi:10.1016/j.agwat.2013.06.007
- Daumard, F., Champagne, S., Fournier, A., Goulas, Y., Ounis, A., Hanocq, J.F., Moya, I., 2010. A Field Platform for Continuous Measurement of Canopy Fluorescence. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 48, 3358–3368. doi:10.1109/TGRS.2010.2046420
- Demattê, J.A.M., Terra, F. da S., Otto, R., Toma, R.S., Pereira, L.H., Nascimento, A.F. do, Bortoletto, M.A.M., 2016. Assessment of sugarcane harvesting residue effects on soil spectral behavior. *Sci. Agric.* 73, 159–168. doi:10.1590/0103-9016-2014-0370
- Dudu, H., Çakmak, E.H., 2017. Climate change and agriculture: an integrated approach to evaluate economy-wide effects for Turkey. *Clim. Dev.* 5529, 1–14. doi:10.1080/17565529.2017.1372259
- Frankenberg, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., 2013. Remote sensing of terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *SPIE Newsroom* 2–5. doi:10.1117/2.1201302.004725

- Goldemberg, J., Mello, F.F.C., Cerri, C.E.P., Davies, C.A., Cerri, C.C., 2014. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Policy* 69, 14–18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.008>
- Guan, K., Wu, J., Kimball, J.S., Anderson, M.C., Frohking, S., Li, B., Hain, C.R., Lobell, D.B., 2017. The shared and unique values of optical, fluorescence, thermal and microwave satellite data for estimating large-scale crop yields. *Remote Sens. Environ.* 199, 333–349. doi:[10.1016/j.rse.2017.06.043](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.043)
- Guan, X., Huang, C., Liu, G., Meng, X., Liu, Q., 2016. Mapping rice cropping systems in Vietnam using an NDVI-based time-series similarity measurement based on DTW distance. *Remote Sens.* 8. doi:[10.3390/rs8010019](https://doi.org/10.3390/rs8010019)
- Gujarati, D.N., Porter, D.C., 2011. *Econometria Básica-5*. AMGH Editora.
- Gunst, R.F., 1996. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L., 2009. *Análise multivariada de dados*. Bookman Editora.
- He, Z., Zeng, Z.C., Lei, L., Bie, N., Yang, S., 2017. A data-driven assessment of biosphere-atmosphere interaction impact on seasonal cycle patterns of XCO<sub>2</sub> using GOSAT and MODIS observations. *Remote Sens.* 9. doi:[10.3390/rs9030251](https://doi.org/10.3390/rs9030251)
- Hu, J., Liu, L., Liu, X., 2017. Improving the retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence at canopy level by modeling the relative peak height of the apparent reflectance. *J. Appl. Remote Sens.* 11, 26032. doi:[10.1117/1.JRS.11.026032](https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.026032)
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . Sistema do IBGE de Recuperação Automática, 2017.
- Jain, R., Chandra, A., Venugopalan, V.K., Solomon, S., 2015. Physiological Changes and Expression of SOD and P5CS Genes in Response to Water Deficit in Sugarcane. *Sugar Tech* 17, 276–282. doi:[10.1007/s12355-014-0317-2](https://doi.org/10.1007/s12355-014-0317-2)
- Jensen, R., Herbst, M., Friborg, T., 2017. Direct and indirect controls of the interannual variability in atmospheric CO<sub>2</sub> exchange of three contrasting ecosystems in Denmark. *Agric. For. Meteorol.* 233, 12–31. doi:[10.1016/j.agrformet.2016.10.023](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.023)

- Jeong, S.J., Schimel, D., Frankenberg, C., Drewry, D.T., Fisher, J.B., Verma, M., Berry, J.A., Lee, J.E., Joiner, J., 2017. Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests. *Remote Sens. Environ.* 190, 178–187. doi:10.1016/j.rse.2016.11.021
- Johnson, D.M., 2014. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. *Remote Sens. Environ.* 141, 116–128. doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.027
- Kaiser, H.F., 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200.
- Krause, G.H., Weis, E., 1991. Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42, 313–349. doi:10.1146/annurev.pp.42.060191.001525
- La Scala Júnior, N., De Figueiredo, E., Panosso, A., 2012. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Brazilian J. Biol.* 72, 775–785. doi:10.1590/S1519-69842012000400012
- Lee, B., Hyojung, K., Miyata, A., Lindner, S., Tenhunen, J., 2017. Evaluation of a Phenology-Dependent Response Method for Estimating Leaf Area Index of Rice Across Climate Gradients. *Remote Sens.* 9, 1–16. doi:10.3390/rs9010020
- Lee, J.-E., Frankenberg, C., van der Tol, C., Berry, J.A., Guanter, L., Boyce, C.K., Fisher, J.B., Morrow, E., Worden, J.R., Asefi, S., 2013. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence. *Proc. R. Soc. London B Biol. Sci.* 280, 20130171.
- Liu, L., Guan, L., Liu, X., 2017. Directly estimating diurnal changes in GPP for C3 and C4 crops using far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. *Agric. For. Meteorol.* 232, 1–9. doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.06.014
- Liu, L., Yang, X., Zhou, H., Liu, S., Zhou, L., Li, X., Yang, J., Han, X., Wu, J., 2018a. Evaluating the utility of solar-induced chlorophyll fluorescence for drought monitoring by comparison with NDVI derived from wheat canopy. *Sci. Total Environ.* 625, 1208–1217. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.268
- Liu, L., Yang, X., Zhou, H., Liu, S., Zhou, L., Li, X., Yang, J., Wu, J., 2018b. Relationship of root zone soil moisture with solar-induced chlorophyll fluorescence and vegetation indices in winter wheat: A comparative study based on continuous ground-measurements. *Ecol. Indic.* 90, 9–17. doi:10.1016/j.ecolind.2018.02.048

- Liu, Z., Wu, C., Peng, D., Wang, S., Gonsamo, A., Fang, B., Yuan, W., 2017. Agricultural and Forest Meteorology Improved modeling of gross primary production from a better representation of photosynthetic components in vegetation canopy. *Agric. For. Meteorol.* 233, 222–234. doi:10.1016/j.agrformet.2016.12.001
- Luus, K.A., Commane, R., Parazoo, N.C., Benmergui, J., Euskirchen, E.S., Frankenberg, C., Joiner, J., Lindaas, J., Miller, C.E., Oechel, W.C., Zona, D., Wofsy, S., Lin, J.C., 2017. Tundra photosynthesis captured by satellite-observed solar-induced chlorophyll fluorescence. *Geophys. Res. Lett.* 44, 1564–1573. doi:10.1002/2016GL070842
- Machado, R.S., Ribeiro, R.V., Ribeiro Marchiori, P.E., Pedro Machado, D.F.S., Machado, E.C., de Andrade Landell, M.G., 2009. Respostas biométricas e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 44, 1575–1582. doi:10.1590/S0100-204X2009001200003
- Magro, F.J., Takao, G., Camargo, P.E., Takamatsu, S.Y., 2011. *Biometria em cana-de-açúcar* 1–18.
- Marcari, M.A., Rolim, G. de S., Aparecido, L.E. de O., 2015. Agrometeorological models for forecasting yield and quality of sugarcane. *Aust. J. Crop Sci.* 9, 1049–1056.
- Mccormick, A.J., Watt, D.A., Cramer, M.D., 2009. Supply and demand: Sink regulation of sugar accumulation in sugarcane. *J. Exp. Bot.* 60, 357–364. doi:10.1093/jxb/ern310
- O'Dell, C.W., Connor, B., Bösch, H., O'Brien, D., Frankenberg, C., Castano, R., Christi, M., Eldering, D., Fisher, B., Gunson, M., McDuffie, J., Miller, C.E., Natraj, V., Oyafuso, F., Polonsky, I., Smyth, M., Taylor, T., Toon, G.C., Wennberg, P.O., Wunch, D., 2012. The ACOS CO<sub>2</sub> retrieval algorithm-Part 1: Description and validation against synthetic observations. *Atmos. Meas. Tech.* 5, 99–121. doi:10.5194/amt-5-99-2012
- OCO-2 Data Product User's Guid, 2016.
- Oliveira, A.J. de;, Ramalho, J., 2006. Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011 / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia, Embrapa In. ed. Brasília, DF.
- Pandey, P.C., Mandal, V.P., Katiyar, S., Kumar, P., Tomar, V., Patariya, S., Ravisankar, N., Gangwar, B., 2015. Geospatial approach to assess the impact of nutrients on rice equivalent yield using MODIS sensors'-based MOD13Q1-NDVI data. *IEEE Sens. J.* 15, 6108–6115. doi:10.1109/JSEN.2015.2451113



- Parazoo, N.C., Bowman, K., Frankenberg, C., Lee, J.E., Fisher, J.B., Worden, J., Jones, D.B.A., Berry, J., Collatz, G.J., Baker, I.T., Jung, M., Liu, J., Osterman, G., O'Dell, C., Sparks, A., Butz, A., Guerlet, S., Yoshida, Y., Chen, H., Gerbig, C., 2013. Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern Amazonia using measurements of XCO<sub>2</sub> and chlorophyll fluorescence from GOSAT. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2829–2833. doi:10.1002/grl.50452
- Phan, T.T., Sun, B., Niu, J.Q., Tan, Q.L., Li, J., Yang, L.T., Li, Y.R., 2016. Overexpression of sugarcane gene SoSnRK2.1 confers drought tolerance in transgenic tobacco. *Plant Cell Rep.* 35, 1891–1905. doi:10.1007/s00299-016-2004-0
- Porcar-Castell, A., Tyystjärvi, E., Atherton, J., Van Der Tol, C., Flexas, J., Pfündel, E.E., Moreno, J., Frankenberg, C., Berry, J.A., 2014. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: Mechanisms and challenges. *J. Exp. Bot.* 65, 4065–4095. doi:10.1093/jxb/eru191
- Roberto, G.G., Cunha, C., Sales, C.R.G., Silveira, N.M., Ribeiro, R.V., Machado, E.C., Lagôa, A.M.M.A., 2015. Variation of photosynthesis and carbohydrate levels induced by ethephon and water deficit on the ripening stage of sugarcane. *Bragantia* 74, 379–386. doi:10.1590/1678-4499.0062
- Rolim, G. de S., Sentelhas, P.C., Barbieri, V., 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Rev. Bras. Agrometeorol. St. Maria* 6, 133–137.
- Rouse, J.W. Jr, Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Stanley CF, Mercanti EP, Becker MA, eds. *Third Earth resources technology satellite-1 Symposium—Volume I: technical presentations*. NASA special publication 351, 309.
- Shrestha, R., Di, L., Yu, E.G., Kang, L., SHAO, Y., BAI, Y., 2017. Regression model to estimate flood impact on corn yield using MODIS NDVI and USDA cropland data layer. *J. Integr. Agric.* 16, 398–407. doi:https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61502-2
- Silva, M. de A., dos Santos, C.M., Vitorino, H. dos S., Rhein, A.F. de L., 2014. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como Descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. *Biosci. J.* 30, 173–181.
- Silva, L.L. da, Costa, R.F. da, Campos, J.H.B. da C., Dantas, R.T., 2009. Influence of precipitations on agricultural productivity in Paraíba State. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 13, 454–461. doi:10.1590/S1415-43662009000400013

- Silva, V. de P.R. da, Oliveira, S.D. de, Santos, C.A.C. dos, Silva, M.T., 2013. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 180–189. doi:10.1590/S1415-43662013000200009
- Singh, P., Kikon, N., Verma, P., 2017. Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. *Sustain. Cities Soc.* 32, 100–114. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018
- Siqueira Neto, M., Galdos, M. V., Feigl, B.J., Cerri, C.E.P., Cerri, C.C., 2016. Direct N<sub>2</sub>O emission factors for synthetic N-fertilizer and organic residues applied on sugarcane for bioethanol production in Central-Southern Brazil. *GCB Bioenergy* 8, 269–280. doi:10.1111/gcbb.12251
- Springer, K.R., Wang, R., Gamon, J.A., 2017. Parallel seasonal patterns of photosynthesis, fluorescence, and reflectance indices in boreal trees. *Remote Sens.* 9, 1–18. doi:10.3390/rs9070691
- Stackhouse, P.W., Westberg, D., Chandler, W.S., Zhang, T., Hoell, J.M., 2017. Prediction Of Worldwide Energy Resource ( POWER ) --- Agroclimatology Methodology --- ( 1 . 0 Latitude by 1 . 0 o Longitude Spatial Resolution ).
- Taiz, L., Zeiger, E., 2013. *Fisiologia vegetal* 5<sup>a</sup>ed. Porto Alegre Ed. Artmed.
- Teodoro, I., Neto, J.D., De Holanda, L.A., Neto, G.D.S., De Souza, J.L., Barbosa, G.V.D., Lyra, G.B., 2015. Weather Variables, Water Balance, Growth, and Agro Industrial Yield of Sugarcane. *Eng. Agric.* 35, 76–88. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p76-88/2015
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. *The Water Balance*, Publications in climatology. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology.
- Thum, T., Zaehle, S., Köhler, P., Aalto, T., Aurela, M., Guanter, L., Kolari, P., Laurila, T., Lohila, A., Magnani, F., Van Der Tol, C., Markkanen, T., 2017. Modelling sun-induced fluorescence and photosynthesis with a land surface model at local and regional scales in northern Europe. *Biogeosciences* 14, 1969–1984. doi:10.5194/bg-14-1969-2017
- Verma, M., Schimel, D., Evans, B., Frankenberg, C., Beringer, J., Drewry, D.T., Magney, T., Marang, I., Hutley, L., Moore, C., Eldering, A., 2017. Effect of environmental conditions on the relationship between solar-induced fluorescence and gross primary productivity at an OzFlux grassland site. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 122, 716–733. doi:10.1002/2016JG003580

- Wang, S., Huang, C., Zhang, L., Lin, Y., Cen, Y., Wu, T., 2016. Monitoring and assessing the 2012 drought in the great plains: Analyzing satellite-retrieved solar-induced chlorophyll fluorescence, drought indices, and gross primary production. *Remote Sens.* 8. doi:10.3390/rs8020061
- Wang, S., Zhang, L., Huang, C., Qiao, N., 2017. An NDVI-based vegetation phenology is improved to be more consistent with photosynthesis dynamics through applying a light use efficiency model over boreal high-latitude forests. *Remote Sens.* 9. doi:10.3390/rs9070695
- Yang, H., Yang, X., Zhang, Y., Heskell, M.A., Lu, X., Munger, J.W., Sun, S., Tang, J., 2017. Chlorophyll fluorescence tracks seasonal variations of photosynthesis from leaf to canopy in a temperate forest. *Glob. Chang. Biol.* 23, 2874–2886. doi:10.1111/gcb.13590
- Zhang, Y., Guanter, L., Berry, J.A., Joiner, J., Tol, C., Huete, A., Gitelson, A., Voigt, M., Köhler, P., 2014. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models. *Glob. Chang. Biol.* 20, 3727–3742.
- Zhao, D., Irey, M., Laborde, C., Hu, C.-J., 2017. Identifying Physiological and Yield Related Traits in Sugarcane and Energy Cane. *Agron. J.* 109.

### **CAPÍTULO 3 – Considerações finais**

A adaptação dos cultivos à variabilidade climática, principalmente em relação ao aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico, torna-se importante para o suprimento da alta demanda de alimentos devido ao crescimento populacional. O fornecimento de grandes quantidades de dados em tempo real, com ótimas resoluções espaciais e temporais por meio de ferramentas de sensoriamento remoto, contribui para o entendimento dos processos fotossintéticos em função das fases fenológicas dos cultivos em escalas globais, regionais e locais.

Este estudo mostrou que há uma relação da Fluorescência de Clorofila Induzida pelo Sol (SIF), coluna média do CO<sub>2</sub> ( $X_{CO_2}$ ) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a produção de açúcar e a qualidade da cana-de-açúcar. Pois o aumento do SIF indicou o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, os valores de  $X_{CO_2}$  indicaram o estabelecimento e a colheita, e o NDVI, a maturação da cultura.