

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA INSTITUTO DE CIÊNCIAS
AGRÁRIAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Breno Yuri Costa Nunes

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO DE CO₂ PELA VEGETAÇÃO
APÓS UM INCÊNDIO NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DO PANGA POR MEIO
DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS POR SENSORIAMENTO REMOTO**

Uberlândia – MG

2021

Análise da eficiência de absorção de CO₂ pela vegetação após um incêndio na Estação Ecológica do Panga por meio de índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Samara Carbone

Uberlândia-MG

2021

RESUMO

O presente trabalho, tem como intuito analisar a eficiência de absorção de dióxido de carbono (CO₂) pela vegetação por meio de dados de sensores remotos, em um evento ocorrido em setembro de 2017 na Estação Ecológica do Panga, localizada na cidade de Uberlândia, onde mais de duzentos hectares de reserva foram queimados. O estudo avaliou o desprendimento de CO₂ da vegetação, a partir da modelagem espectral das bandas do satélite SENTINEL-2. Para isso, foi analisada a relação dos índices espectrais: índice diferenciado de queimada por razão normalizada (dNBR) e a eficiência do processo de sequestro de carbono (CO₂flux), modelados espectralmente pelos dados do satélite. Enquanto o dNBR é um índice utilizado para avaliar a extensão e a severidade da queimada antes e após o evento de queimada, o CO₂flux é um índice que quantifica a eficiência do processo de acúmulo de CO₂ pelas plantas. Por meio do processamento dos dados pôde-se inferir que a eficiência de sequestro de carbono pelas plantas após o incêndio é muito menor devido, à liberação de CO₂ retido nas plantas para a atmosfera (CO₂flux = 0,034 μmol.m⁻².s⁻¹). Também foi possível observar uma elevada relação de dependência inversamente proporcional entre os índices de vegetação dNBR e CO₂flux, por meio de análise de correlação (R²= 0,56). Os resultados mostram baixos valores de sequestro de CO₂ (0,018 μmol.m⁻².s⁻¹) pela vegetação quando as queimadas são de grande severidade (elevado dNBR) na Estação Ecológica do Panga. Em média, foi observada uma redução de 46% na eficiência de absorção de CO₂ pelas plantas após o incêndio.

Palavras-chave: Dióxido de Carbono. Incêndio. SENTINEL-2.

ABSTRACT

The present work aims to analyze the efficiency of absorption of carbon dioxide (CO₂) by the vegetation through remote sensing data, during an event that took place on September 2017 at Panga Ecological Reserve, located in the city of Uberlândia, where more than two hundred hectares of forest were burned. The study evaluated the release of CO₂ from the vegetation based on the spectral modeling of the SENTINEL-2 satellite bands. For this, the relationship of spectral indices: differentiated normalized burn ratio index (dNBR) and the efficiency of the carbon sequestration process (CO₂flux), spectrally modeled by satellite data, were analyzed. While the dNBR is an index used to assess the extension and severity of the fire before and after the forest fire event, the CO₂flux is an index that quantifies the efficiency of the CO₂ accumulation process by the plants. By means of data processing it was possible to observe that the CO₂ absorption efficiency by the plants is much lower after the forest fire due to the release of CO₂ trapped by the plants into the atmosphere (CO₂flux = 0.034 μmol.m⁻².s⁻¹). It was also possible to observe a strong inversely proportional dependence relationship between the dNBR vegetation indices and CO₂ flux (correlation, R² = 0.56). The results show low values of CO₂ sequestration (0.018 μmol.m⁻².s⁻¹) by the vegetation when forest fires are of great severity (high dNBR) in the Panga Ecological Reserve. On average, there was a 46% reduction in the efficiency of CO₂ absorption by the plants after the forest fire.

Keywords: Carbon Dioxide. Fire.Sentinel 2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado do Ciclo do Carbono, números e setas pretas indicam a massa do reservatório em PgC e fluxos de troca em PgC/ano, antes da revolução industrial. Números e setas vermelhas, mostram mudanças anuais no fluxo antropogênico em média no período de 2000-2009.

Figura 2 - Razão de mistura de CO₂ de 1980 até o ano de 2020.

Figura 3 - Mapa de localização da Estação Ecológica do Panga

Figura 4 - Trilhas e Fitofisionomias da RPPN do Panga

Figura 5 - Transmissão da radiação eletromagnética na atmosfera

Figura 6 - Espectro Eletromagnético

Figura 7 - Reflectância da água, vegetação e solo arenoso

Figura 8 - Bandas SENTINEL -2

Figura 9 - Fluxograma de Atividades

Figura 10 - Mapa de localização dos pontos de amostragem na Estação Ecológica do Panga

Figura 11 - Mapa de identificação do começo do incêndio

Figura 12 - Foto da Estação Ecológica do Panga após a passagem do fogo no dia 13/09/2017.

Figura 13 - Mapa de quantificação do grau de queimada

Figura 14: Dados da estação automática A507

Figura 15: Precipitação Mensal do Ano de 2017

Figura 16: Classes de área queimada por hectare

Figura 17: Eficiência no Processo de absorção de CO₂ pela vegetação

Figura 18: Valores de CO₂ nos pontos amostrados

Figura 19: Relação entre o dNBR x CO2flux

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO₂ *Dióxido de Carbono*

EEP *Estação Ecológica do Panga*

CO2flux *Eficiência no processo de sequestro de carbono*

dNBR *Índice diferenciado de Queimada por Razão Normalizada*

GEE *Gases do Efeito Estufa*

NBR *Índice de Queimada por Razão Normalizada*

NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*

PRI *Photochemical Reflectance Index*

Q-GIS *Quantum-Gis*

SCP *Semi Automatic Plugin*

sPRI *Photochemical Reflectance Index reescalonado para valores positivos*

ZEE *Zoneamento Ecológico – Econômico*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de severidade de queimada e rebrota para o índice dNBR.

Tabela 2. Valores de CO2flux antes e depois do incêndio.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVO	8
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 SEQUESTO DE CARBONO	9
3.2 CARACTERÍSTICAS DA VEGETAÇÃO DO CERRADO	11
3.3 ESTAÇÃO ECOLÓGICA PANGA (EEP)	13
3.4 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO SENSORIAMENTO REMOTO	15
3.5 SATÉLITE SENTINEL -2	19
3.6 ÍNDICES ESPECTRAIS	20
4. METODOLOGIA	22
4.1 DADOS METEOROLÓGICOS	22
4.2 PROCESSAMENTO DADOS DO SENTINEL-2	23
4.3 PROCESSAMENTO DOS ÍNDICES ESPECTRAIS	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1 DISTRIBUIÇÃO DE ALVOS	27
5.2 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE SEVERIDADE DA QUEIMADA	27
5.3 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEQUESTRO DE CO ₂ PELA VEGETAÇÃO	34
5.4 RELAÇÃO dNBR x CO ₂ flux	37
6. CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas que o planeta vem enfrentando são mudanças climáticas. Esta temática abrange uma escala global, afetando não só o meio ambiente, mas a sociedade como um todo. Por este motivo, essa questão envolve toda a sociedade, sendo necessário repensar o estilo de vida das pessoas referentes ao seu comportamento social e de consumo, aliado à sua relação com o meio ambiente.

Devido aos novos padrões de consumo, onde se destaca o aumento no consumo de combustíveis fósseis, ligados ao sistema capitalista adjunto ao aumento populacional, o meio ambiente vem sendo cada vez mais castigado. Como consequência observa-se mudanças na temperatura do planeta, intensificadas, graças ao aumento da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE). Mesmo que o efeito estufa seja um fenômeno natural que permite a manutenção da vida na terra, a exacerbação desse efeito, traz consequências indesejáveis a muitos ambientes terrestres

Entre estes efeitos estão o aumento da temperatura do ar, ocasionando modificações na dinâmica do planeta Terra, aumentando o derretimento das geleiras, modificando o regime de chuvas e trazendo problemas de saúde às pessoas. Associado a essas modificações, os incêndios e queimadas florestais vêm contribuindo com a diminuição da biomassa terrestre, degradação dos solos, perda de espécies animais e vegetais por meio da liberação dos estoques de carbono retidos na vegetação para a atmosfera.

Com a crescente emissão de gases como, o metano (CH_4) e o óxido nitroso (NO_2) e principalmente o dióxido de carbono (CO_2), também a concentração destes gases vem aumentando na atmosfera, com destaque para o CO_2 , por ser o gás que mais contribui para o aquecimento global em função de sua abundância.

Uma das formas de diminuir o avanço do efeito estufa, é manter a conservação das florestas, visto que elas são capazes de sequestrar o CO_2 da atmosfera no processo de fotossíntese das plantas, mantendo o carbono retido na biomassa da vegetação. Todavia, o grande obstáculo que impede o sequestro de carbono é o desmatamento das florestas com o uso do fogo, que além de diminuir a absorção de CO_2 faz com que todo o carbono retido na vegetação volte para a atmosfera contribuindo ainda mais para o aquecimento do planeta.

E cada vez mais comum observar incêndios nos biomas brasileiros que são susceptíveis às queimadas principalmente nos períodos de seca, acarretando na perda da biodiversidade dos ecossistemas. No cerrado os incêndios podem acontecer de forma acidental em períodos de chuva, graças aos relâmpagos. Em virtude desses eventos a fauna e flora do cerrado adaptou-se ao fogo de forma natural permitindo que as plantas rebrotem após as queimadas. Porém na maioria das vezes as queimadas ocorrem de forma intencional, ou seja, pela ação humana, o que faz com que o cerrado brasileiro perca grande parte do seu território todos os anos.

Diante deste cenário de aumento de incêndios e queimadas, e conseqüentemente aumento da emissão de GEE, é necessário estudar o seu potencial durante os incêndios no cerrado. Em função da complexidade de estudar eventos de queimadas já ocorridos, foi utilizado o sensoriamento remoto para inferir dados de eficiência de absorção de CO₂ pelas plantas na atmosfera, depois de um incêndio ocorrido na Estação Ecológica do Panga (EEP) nos arredores da cidade de Uberlândia no estado de Minas Gerais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é utilizar índices espectrais para identificar e avaliar os efeitos em termos de eficiência de absorção do CO₂ na Estação Ecológica do Panga, antes e após um incêndio ocorrido em setembro de 2017 utilizando dados do satélite SENTINEL - 2.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar o grau de severidade do incêndio na estação, por meio do índice espectral dNBR.
- Utilizar o índice CO₂flux para inferir a quantidade de CO₂ que deixou de ser estocada pela vegetação devido ao incêndio.
- Avaliar se há relação entre os dados dos índices espectrais dNBR x CO₂flux.

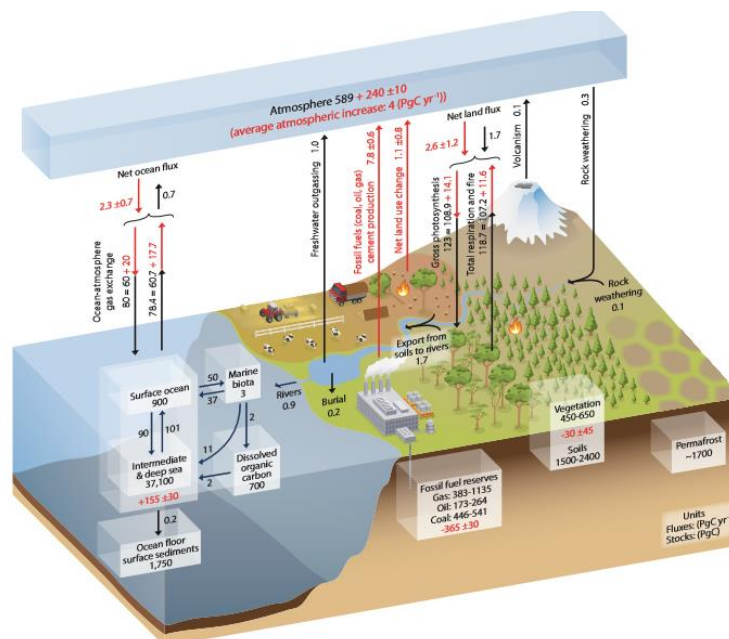
3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SEQUESTO DE CARBONO

De acordo com (PINTO et al., 2010), quando nos referimos ao termo mudança climática e aquecimento global, nos referimos à elevada e anormal capacidade da atmosfera reter calor, graças à emissão de GEE ao longo das últimas décadas pela atividade humana. Dentre esses gases há um em destaque, o CO₂, devido à grande quantidade depositada deste gás na atmosfera ao longo dos últimos anos, uma vez que seu tempo de permanência na atmosfera é bastante variável (4 – dezenas de anos) dependendo das condições atmosféricas e presença de fontes emissoras e sumidouras (IPCC 2018). Desta forma, seus efeitos podem durar um longo período de tempo.

O CO₂ é a principal fração atmosférica do carbono no seu ciclo, que é representado pela troca de carbono nos reservatórios da Terra. De acordo com Ciais et al (2013) é possível identificar duas tendências no fluxo do carbono. Sendo a primeira de forma mais rápida caracterizada pela troca de carbono entre os reservatórios oceânicos e vegetativos, enquanto a segunda e um processo mais lento que consiste na troca de carbono de rochas e sedimentos por meio de erupções vulcânicas, ilustrado na Figura 1.

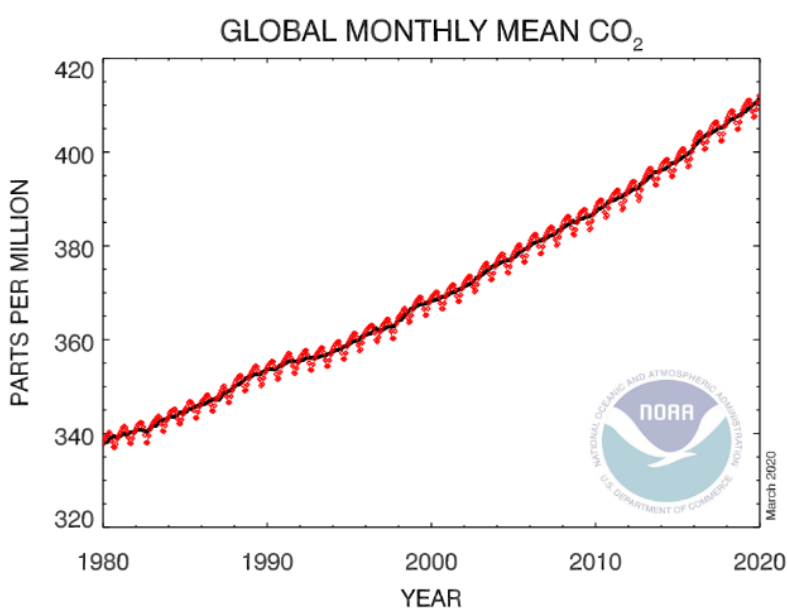
Figura 1: Esquema simplificado do Ciclo do Carbono, números e setas pretas indicam a massa do reservatório em PgC e fluxos de troca em PgC/ano, antes da revolução industrial. Números e setas vermelhas, mostram mudanças anuais no fluxo antropogênico em média no período de 2000-2009.



Fonte:(CIAIS et al., 2013, p. 471)

Com o aumento da extração de combustíveis fósseis, grande parte dos reservatórios geológicos tiveram suas concentrações de carbono queimadas resultando em uma transferência significativa de carbono para a atmosfera, tornando o CO₂ o GEE mais abundante na atmosfera após o vapor de água. Através da Figura 2 é possível observar como a concentração de CO₂ vem aumentando ao longo dos anos. Em 2021 o relatório do IPCC reportou a razão de mistura média de 410 ppm para o planeta, o que é o maior valor encontrado nos últimos 2 milhões de anos (IPCC 2021).

Figura 2: Razão de mistura de CO₂ de 1980 até o ano de 2020.



Fonte: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>

Observando o ciclo do carbono, é possível identificar que as plantas são capazes de sequestrar o CO₂ por meio da fotossíntese, permitindo a fixação do carbono na biomassa da vegetação, o que por sua vez permite reduzir o efeito estufa.

Segundo estudo de CAMPOS (2001), as mudanças no clima irão conduzir alterações nas espécies de plantas, desde o acúmulo de massa à taxa de decomposição dos nutrientes, acarretando na adaptação dessas florestas. Estas adaptações, provenientes nas mudanças do clima, podem ser intensificadas pela expansão agrícola, o que pode gerar um colapso nos biomas.

Dessa forma entendendo a complexa interação das florestas com as alterações do clima é necessário criar ações de preservação dos campos vegetativos, visto que esses ambientes funcionam como verdadeiros estoques de carbono. Isto pode ser feito reduzindo o desmatamento, aumentando as áreas de florestas e principalmente evitando os incêndios nesses locais, o que permitirá que o carbono fique retido na biomassa.

3. 2 CARACTERÍSTICAS DA VEGETAÇÃO DO CERRADO

O bioma Cerrado é caracterizado pela presença de invernos secos e verões chuvosos. Possui média anual de precipitação 1500 mm, com as chuvas concentradas no período de outubro a março. Outro fator característico é o contraste entre as superfícies, de 900 a 1600 m que adjunto à extensa distribuição em latitude, confere ao Cerrado uma diversificação térmica bem significativa (RIBEIRO, J. F., & WALTER, 1998).

O cerrado pode assumir mais de uma fisionomia, sendo composto por três principais: a campestre (campo limpo de Cerrado), a savânica (campo sujo de Cerrado, campo Cerrado e Cerrado sensu stricto) e a florestal (cerradão), constituída por florestas tropicais estacionais escleromorfas semidecíduas mais abertas, arvoredos ou “woodlands” (savana florestada) (COUTINHO, 2006) . Dessa forma, o cerrado seria, um complexo de biomas, distribuídos em uma mistura de ambientes que de certa forma mantém relações ecológicas entre si, desde um campo limpo a um campo sujo.

Mesmo que o bioma abrigue diversas fisionomias, há uma típica vegetação do cerrado caracterizada pelos troncos tortuosos, baixo porte, ramos retorcidos, cascas espessas e folhas grossas. Contudo, é válido ressaltar que a vegetação não apresenta tais características em decorrência da falta de água, já que o Cerrado abriga uma densa rede hídrica, mas devido a outros fatores edáficos, notadamente o desequilíbrio no teor de micronutrientes, a exemplo do alumínio (MEDEIROS, 2011).

Neste ambiente, o fogo tem papel modelador das características do bioma, modelando as adaptações morfológicas e fisiológicas das plantas do cerrado, atuando também em processos ecológicos, pois as queimadas periódicas tem a função de estimular o rebrotamento e a ciclagem de nutrientes (FIDELIS; PIVELLO, 2011). A queima periódica que ocorre naturalmente em ciclos pode ser benéfica a esses ecossistemas, diferentemente dos incêndios frequentemente causados pela ação antrópica, onde o fogo também tem papel adverso que pode fazer com que espécies possam ser devastadas.

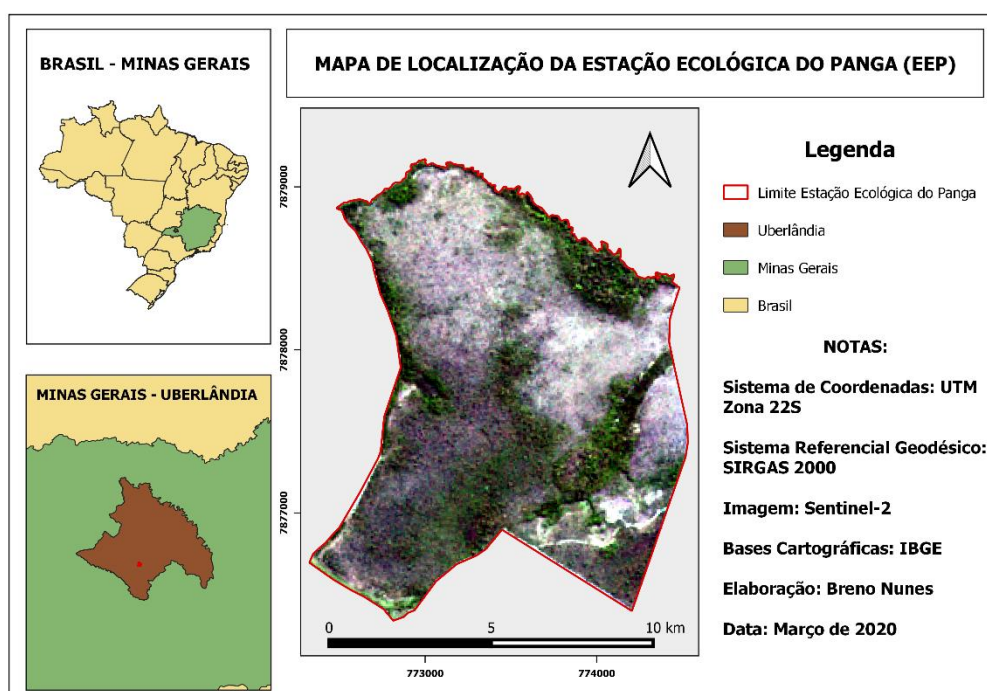
As definições de queimadas e incêndios são distintas, eventos de queimada fazem parte de técnicas tradicionais da agricultura familiar, com o objetivo de limpar e dar fertilidade ao solo, diferentemente das queimadas, os incêndios são considerados focos de calor sem controle, onde o fogo devora as vegetações de forma incontrolável. O avanço desses focos de incêndio vem crescendo no bioma Cerrado, através do monitoramento do sensor MODIS, a bordo dos satélites Aqua e Terra é possível mensurar a quantidade de focos de incêndio, que passou de 150.000 focos em 2002 para mais de 250.000 no ano de 2007 (SANTOS, 2014).

Partindo para dados mais recentes, a pesquisa de Lima (2018) quantificou os focos de incêndios para o bioma cerrado no ano de 2017, encontrando mais de 61.000 focos de incêndio apenas no período de seca que vai de junho a setembro, o que demonstra que os eventos de incêndios florestais crescem em períodos de baixa precipitação.

3.3 ESTAÇÃO ECOLÓGICA PANGA (EEP)

A área de estudo e a Estação Ecológica do Panga, situada no município de Uberlândia no estado de Minas Gerais, localizada entre as coordenadas 19°09'20" e 19°11'10" S, 48°23'20" e 48°24'35" W, a aproximadamente 30 Km ao sul do centro urbano do município, apresentando altimetria variando de 740 a 830m, em relação ao nível do mar. A referida unidade pertence à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) a Figura 3.

Figura 3: Mapa de localização da Estação Ecológica do Panga.

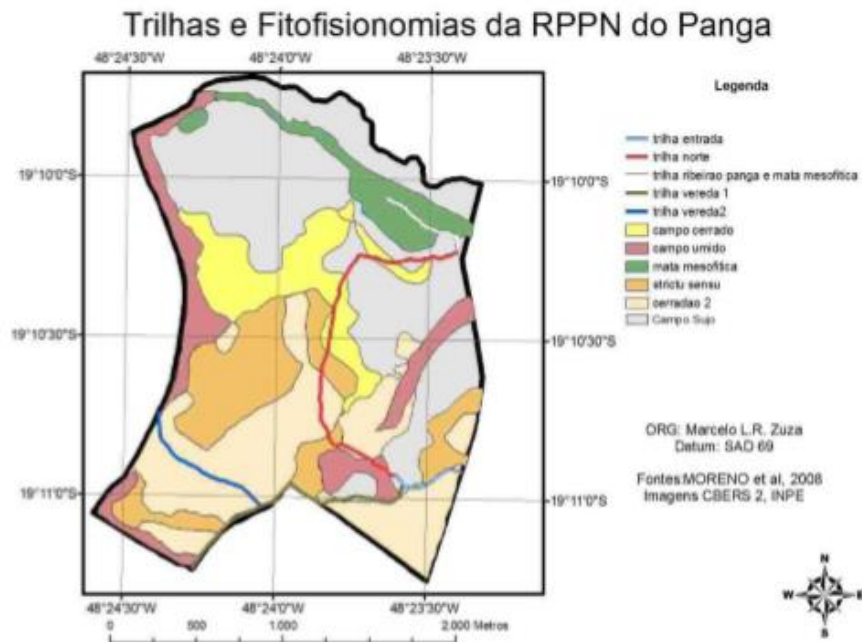


A Estação Ecológica do Panga (EEP) é caracterizada como uma unidade de conservação na categoria Reserva Particular do Patrimônio Natural (RRPN) de posse da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com área de cerca de 400 hectares (SANTOS; ZUZA, 2010).

Até 1984 a EEP consistia numa área de atividade agropecuária, contudo em 1985 a UFU adquiriu a área, fazendo com que se tornasse uma região de preservação ambiental, que desde então vem sendo uma das poucas áreas de vegetação nativa do município (MORENO, 2008).

As trilhas e características da vegetação (fitofisionomias) estão representadas na Figura 4 (SANTOS; ZUZA, 2010).

Figura 4: Trilhas e Fitofisionomias da RPPN do Panga



Fonte: (SANTOS; ZUZA, 2010)

Na EEP pode-se observar seis tipos de classificação de fitofisionomias do cerrado, cada uma com características específicas. O campo cerrado é caracterizado por árvores baixas, inclinadas, tortuosas, com ramificações retorcidas, evidenciadas pela passagem do fogo, as folhas geralmente são rígidas, troncos com cascas grossas bem adaptados aos períodos de seca, enquanto o estrato arbóreo é mais espaçado. Já o cerrado típico, conhecido como cerrado sensu stricto, é predominantemente composto por uma vegetação arbórea-arbustiva com altura média de 3 a 5 metros (RIBEIRO et al., 1983).

Outra fitofisionomia é o campo úmido, mais conhecido como vereda, o qual é encontrado nos vales que acompanham as redes de drenagem. O campo úmido é caracterizado pela presença de palmeiras como o buriti que se destaca sobre o estrato arbóreo, os solos são geralmente hidromórficos (RIBEIRO et al., 1983). A mata mesofítica é composta pelas matas subcaducifólia e caducifólia, na qual no período seco as caducifólias perdem suas folhas contribuindo para o aumento de matéria orgânica nessas regiões. O estrato arbóreo neste tipo de fitofisionomia é mais alto com um altura de 15 a 20 metros, o que faz com que as copas se toquem, ocasionando baixas presenças de espécies arbustivas abaixo das copas (RIBEIRO et al., 1983).

Muitas vezes confundido como floresta, a classificação do cerrado é evidenciada por um médio com cerca de 8 a 15 metros de altura, com uma cobertura arbórea grande, representando grandes áreas de mata (RIBEIRO et al., 1983). Em contra partida, a classificação representada pelo campo sujo, é uma vegetação herbáceo-arbustiva, com arbustos bem espaçados com a presença das espécies menos desenvolvidas do cerrado (RIBEIRO et al., 1983).

A estação é uma extensão de pesquisa de diversas áreas da UFU, sendo usada como campo de estudo. Dentre essas áreas é interessante demonstrar a importância de um planejamento ambiental em reservas ecológicas. Deste modo, Douglas Gomes dos Santos (2009) realizou um estudo na Estação Ecológica do Panga, utilizando a cartografia como ferramenta para a elaboração do Zoneamento Ecológico – Econômico (ZEE). Tal estudo, traz a proposta de se definir zonas na estação, a fim de ter um controle das atividades dentro da mesma, organizando seu espaço e dinamizando seu funcionamento, levando em consideração os meios físicos, bióticos e socioeconômicos.

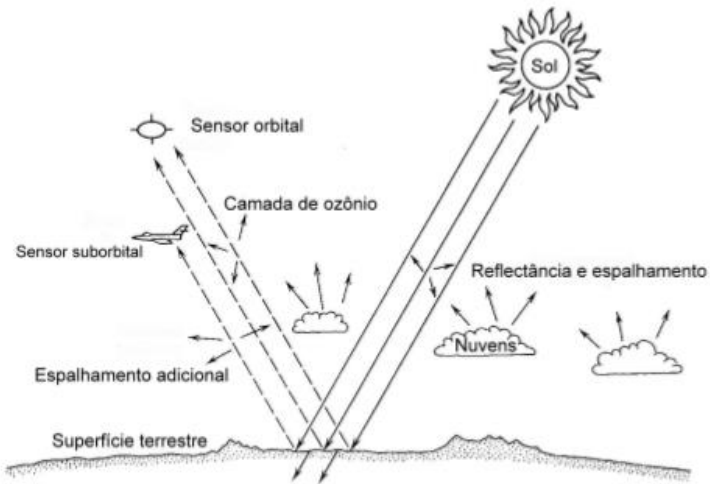
3. 4 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto pode ser definido, pela aquisição de imagens da superfície terrestre de forma remota, sem que exista contato físico com o alvo ou objeto, através da medição da radiação eletromagnética que é refletida do alvo, pela iluminação de fontes naturais como a luz solar (MENEZES, 2012).

Dentre as inúmeras vantagens do Sensoriamento Remoto, a medição passiva é uma das mais importantes, uma vez que o alvo não é perturbado, graças aos sensores que medem a energia refletida pelos alvos através da radiação eletromagnética, além do que esses equipamentos são programados para medir os dados sistematicamente, ou seja, periodicamente através de fotografias, mapas ou matrizes (JENSEN, 2011).

O sensoriamento remoto utiliza-se da radiação eletromagnética para a aquisição dos dados, contudo alguns elementos devem ser bem compreendidos para uma correta interpretação das informações adquiridas, dentre eles temos: radiação eletromagnética, fonte de radiação, efeitos atmosféricos, comportamento espectral dos alvos e sistema sensor, conforme pode ser observado na Figura 5 (ROSA, 2013).

Figura 5: Transmissão da radiação eletromagnética na atmosfera

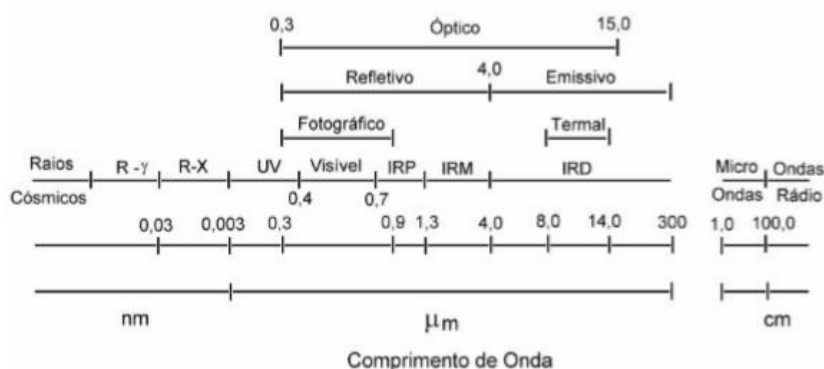


Fonte:(ROSA, 2013)

Deslocamento da radiação ao longo da atmosfera, pode interagir com os objetos ou superfícies, podendo ser refletido, absorvido ou reemitido, essa capacidade de interação vai depender das propriedades físico-químicas dos elementos irradiados, sendo que o fluxo resultante constitui-se de uma valiosa fonte de informações sobre as superfícies e objetos (ROSA, 2013).

Dentre as formas de energia, a principal e mais importante para o sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética que tem como fonte de emissão o Sol. A radiação eletromagnética do sol se propaga no vácuo à velocidade da luz, seja em forma de ondas ou de partículas eletromagnéticas, e não necessita de um meio material para se propagar. A faixa de comprimentos de onda, frequência ou energia em que se encontra a radiação eletromagnética é praticamente ilimitada. A representação das faixas de comprimento de onda, frequência ou energia é denominada de espectro eletromagnético, conforme pode ser verificado na Figura 6 (ROSA, 2013).

Figura 6: Espectro Eletromagnético



Fonte:(ROSA, 2013, p. 108)

Conforme a Figura 6 pode-se perceber que o espectro eletromagnético é subdividido em faixas, representando regiões que possuem características peculiares entre si, quando se refere a processos físicos geradores de energia, ou mecanismos físicos de detecção desta energia (ROSA, 2013).

Entendo que cada faixa do espectro eletromagnético interage de forma distinta com os objetos terrestres, as características de cada intervalo do espectro eletromagnético no sensoriamento remoto são chamadas de bandas espectrais. Os intervalos de bandas mais usadas no sensoriamento remoto terrestre são: visível (0,45 – 0,76 μm), infravermelho próximo (0,76 – 1,2 μm), Termal (5 μm – 1mm) e Microondas (1mm – 100 cm) (MENEZES, 2012).

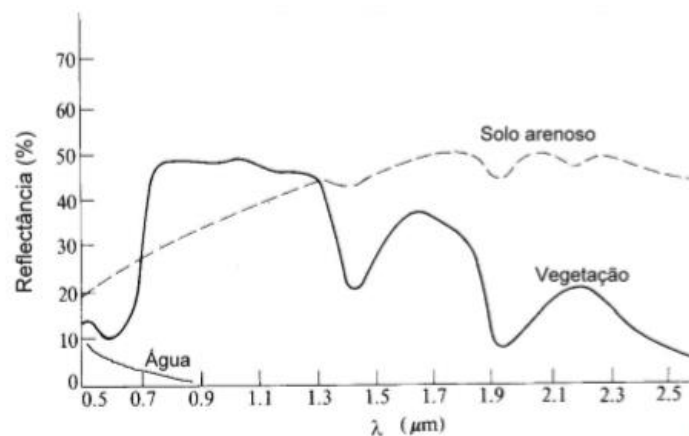
Quando se adquire um dado através de um sensor remoto, seja a nível orbital ou suborbital, o sinal coletado interage com a atmosfera até atingir o sensor (ROSA, 2013, p. 111). Deste modo, torna-se importante conhecer os efeitos causados pela atmosfera no sinal medido por um sensor. Sob o ponto de vista termodinâmico, a atmosfera é um sistema aberto, ou seja, há intercâmbio de massa entre a superfície terrestre e o espaço. A fase dispersante é o ar, uma mistura homogênea de nitrogênio (78%), oxigênio (21%), argônio (1%), CO₂ e outros gases que figuram em pequenas proporções.

Dentro deste contexto dois processos de atenuação afetam a propagação da radiação eletromagnética pela atmosfera: a absorção e o espalhamento. A absorção da radiação eletromagnética, na atmosfera é seletiva pelos vários constituintes presentes: vapor d'água, ozônio, CO₂ e etc (ROSA, 2013). Por exemplo as faixas do ultravioleta e visível, o ozônio é o principal atenuador por absorção, enquanto que na faixa do

infravermelho o vapor d'água e o CO₂ são os principais atenuadores (ROSA, 2013). Já no processo de espalhamento da radiação incidente na atmosfera, ao interagir com esta, será gerado um campo de radiação difusa que se propagará em todas as direções, fazendo com que as ondas se espalhem. É importante analisar esse fenômeno, pois a radiação eletromagnética coletada pelo sistema sensor não provém somente do alvo, uma vez que a radiação espalhada pela atmosfera, e por outros alvos poderá também atingir o sistema sensor, mascarando, total ou parcialmente, a informação desejada (ROSA, 2013).

Outro ponto importante na aquisição de dados por sensoriamento remoto e o comportamento espectral dos alvos, de acordo com (ROSA, 2013) o comportamento espectral de um alvo pode ser definido como sendo a medida da reflectância deste alvo ao longo do espectro eletromagnético. Por exemplo, a Figura 7 mostra três alvos: água, solo e vegetação em uma faixa do espectro eletromagnético entre 0,5 a 2,5 μm , as quais apresentam diferentes formas e intensidade de reflectância. Graças a isso, pode-se discriminar e identificar os diferentes alvos existentes na natureza.

Figura 7: Reflectância da água, vegetação e solo arenoso



Fonte:(ROSA, 2013, p. 108)

O comportamento espectral de cada tipo de dado irá ser quantificado através da chamada resolução radiométrica que irá armazenar toda a energia refletida pelos alvos, ela é mensurada em bits, quanto maior a resolução radiométrica maior o número de bits. A radiometria de cada sensor será influenciada pela resolução espectral, que é definida como o intervalo de comprimento de onda de cada banda dos sensores, na maioria dos satélites os sensores são multiespectrais, registram a energia de múltiplas bandas do espectro eletromagnético (JENSEN, 2011).

Com os dados coletados através do sensoriamento remoto, ainda é necessário realizar um pré processamento digital desses dados, como correção radiométrica e geométrica dos dados brutos, com o intuito de melhorar a aparência das imagens e posteriormente interpretar esse volume de dados extraindo informações mais sólidas. Dessa forma, é possível integrar outras fontes de informação com esses dados provenientes do sensoriamento remoto e assim desenvolver produtos que representam características da superfície da terra (JENSEN, 2011).

3. 5 SATÉLITE SENTINEL -2

O satélite escolhido para a obtenção das imagens foi o da missão espacial Sentinel - 2, administrados pela Agência Espacial Europeia e pela Comissão Europeia, sendo composta por dois satélites, denominados 2A e 2B, que ocupam a mesma órbita (ENGESAT, 2020).

A altitude média da órbita dos satélites polares é de 786 km e o tempo de revisita em latitudes médias é de 2 a 3 dias. O satélite Sentinel 2A foi lançado em junho de 2015 e o Sentinel 2B em março de 2017, sendo que, atualmente, ambos encontram-se em operação (ENGESAT, 2020).

O sensor embarcado no satélite é o (MultiSpectral Instrument) MSI, na qual apresenta 13 bandas espectrais com três resoluções espaciais diferentes (10m, 20m e 60m), conforme ilustrado na Figura 8 (ENGESAT, 2020).

Figura 8: Bandas SENTINEL -2

Resolução	Nº Banda	Banda	Comprimento de onda central (nm)
10 m	B02	Blue (Azul)	490
	B03	Green (Verde)	560
	B04	Red (Vermelho)	665
	B08	NIR (Infravermelho Próximo)	842
20 m	B05	Red Edge 1	705
	B06	Red Edge 2	740
	B07	Red Edge 3	783
	B08A	Red Edge 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60 m	B01	Aerossol	443
	B09	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

3. 6 ÍNDICES ESPECTRAIS

Tendo em vista que as queimadas e incêndios florestais consomem grande parte da vegetação, estes também contribuem para grandes despejos de CO₂ na atmosfera. A eficiência no processo de sequestro de carbono pelas plantas pode ser medida por meio do índice CO₂flux (RAHMAN et al., 2000). Para a sua determinação é utilizado a multiplicação da diferença normalizada do índice de vegetação (*Normalized Difference Vegetation Index* NDVI, do inglês) (ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. E DEERING, 1973, p. 309–317) com o índice de reflectância fotoquímica (*Photochemical Reflectance Index*, do inglês, PRI) reescalado para valores positivos (sPRI) (RAHMAN et al., 2000). O PRI é sensível às mudanças nos pigmentos carotenoides (tais como a xantofila) nas plantas. Estes pigmentos são indicativos da eficiência do uso da radiação fotossintética ou taxa de CO₂ armazenada pela planta por unidade de energia absorvida (GAMON et al., 1992).

O NDVI baseia-se no processo de diferença normalizada pela soma dos comprimentos de onda do vermelho (0,66 μm) e infravermelho próximo (0,8 μm), que visa retratar a relação de uma banda com a outra. Esse algoritmo evidencia as áreas de vegetação, devido à alta taxa de absorção na faixa do vermelho e o pico de reflectância na faixa do infravermelho próximo.

Para o sPRI, é utilizado a diferença por razão normalizada, nos comprimentos de onda do azul (0,490 μm) e o pico de reflectância do verde (0,560 μm) e que é relacionado a eficiência da luz na fotossíntese.

Para determinar o grau de intensidade das queimadas, muitos autores utilizam a Razão Normalizada (dNBR) para determinar o índice diferenciado de Queimada (ROY; BOSCHETTI; TRIGG, 2006). Este índice identifica as áreas onde o fogo foi mais intenso. Para tal o dNBR é determinado pela subtração do pré-fogo pelo pós fogo do (Índice de Queimada por Razão Normalizada, NBR) (KEY; BENSON, 2006). Este índice que realça as queimadas e sua severidade é determinado pela diferença por razão normalizada dos comprimentos de onda do infravermelho próximo (0,8 μm) e infravermelho curto (0,22 μm) multiplicado por 1000 para facilitar o escalonamento e a classificação.

O índice espectral mais frequentemente utilizado nas pesquisas sobre queimadas é o NDVI, pelo fato de apresentar um algoritmo simples e muito eficiente na identificação de vegetações queimadas (DEPRÁ et al., 2012).

Dessa forma, existem inúmeros trabalhos científicos que utilizam o índice, como o estudo de (DEPRÁ et al., 2012) que identificou áreas queimadas em florestas de araucária, comparando o NDVI com o NBR. Os autores observaram que o NDVI é mais eficaz na identificação de áreas queimadas, o que indica que eventos de fogo expõem valores característicos ao NDVI. Este fato foi observado em outro estudo que encontrou intervalos específicos nas cicatrizes de queimadas em áreas de preservação ambiental (CLARA et al., 2014).

Outro trabalho que quantificou o impacto de uma área queimada foi o de (DA SILVA, 2013), o estudo foi realizado no Parque Estadual de Serra Nova- MG e comparou os dados coletados em campo, com os índices espectrais NDVI e dNBR. Para esse estudo o dNBR apresentou resultados mais condizentes com a realidade mapeada no campo, enquanto o NDVI apresentou dados inferiores a área realmente queimada, porém o NDVI ainda se mostrou eficiente na de identificação de áreas queimadas.

Dentre os outros índices espectrais utilizados na literatura, tais como o NDVI é interessante salientar a importância de estimar parâmetros biofísicos de vegetações, correlacionar as concentrações de CO₂ por meio de geotecnologias é um grande avanço científico.

Em vista disso, um estudo comparou a determinação da absorção de CO₂ pelas plantas (CO₂flux) em relação a diferentes índices espectrais, encontrando uma associação maior entre a utilização do NDVI e concentrações de CO₂ de estações (SILVA; BAPTISTA, 2015). Este estudo comparou a relação entre o CO₂flux com as concentrações de CO₂ medidas em torres na Amazônia, utilizando três modelos de índices espectrais, CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, cada um sendo determinado pela multiplicação dos índices espectrais NDVI, EVI e EVI2 respectivamente.

O melhor ajuste encontrado entre a determinação do CO₂flux com as concentrações de CO₂ em ppm, foi com a utilização do NDVI que apresentou um coeficiente de determinação de 0,5077 para observações a cada duas horas, enquanto os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 apresentaram coeficientes de determinação de 0,3409 e 0,3084 (SILVA; BAPTISTA, 2015). Dessa forma se propôs a usar a o índice CO₂flux no presente trabalho, pois sua relação com as concentrações de CO₂ é maior.

O índice espectral CO₂flux vem sendo validado na literatura, o estudo de (BAPTISTA, 2003) comparou os dados do sequestro de carbono (CO₂flux) com os dados

da concentração de CO₂ no ar atmosférico (ICO₂) em áreas de vegetação densa e áreas urbanas, encontrando uma relação inversamente proporcional, áreas com mais vegetação apresentam valores maiores de CO₂flux e baixos valores de CO₂ no ar, diferentemente das áreas urbanas que apresentam um comportamento inverso, com uma maior presença de CO₂ no ar.

Seguindo a mesma proposta de validação do CO₂flux o trabalho de (DE MELLO BAPTISTA, 2009) mediu o sequestro de carbono no bioma Pantanal, obtendo um resultado satisfatório para a vegetação terrestre, porém em lagoas com a presença de algas o modelo do CO₂flux se mostrou inapropriado.

A proposta de mapeamento do sequestro de carbono pela vegetação desenvolvida por (RAHMAN et al., 2000), ainda conta com poucos estudos, principalmente para biomas brasileiros, desse modo este trabalho pretende contribuir com a validação desse índice espectral para o bioma Cerrado e entender como esse índice varia em vegetações queimadas e saudáveis.

4. METODOLOGIA

4.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos foram coletados da estação A-507 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presente na cidade de Uberlândia com coordenadas, Latitude: -18°55'2" e Longitude: -48°15'19" com uma altitude de 869 metros. Esta estação fica localizada no campus Santa Mônica da UFU.

A estação coleta dados horários todos os dias do ano e os parâmetros monitorados pela estação são: precipitação (mm), pressão atmosférica (hPa), radiação global (W/m²), temperatura do ar (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), temperatura máximas e mínimas (°C), Umidade relativa do ar máxima e mínima (%), direção do vento (°), rajada do vento (°) e velocidade horária do vento (m/s). Esses dados foram usados para as condições meteorológicas no período anterior e posterior ao incêndio na Estação Ecológica do Panga. Este estudo assume que as condições medidas pela estação meteorológica no campus Santa Mônica da UFU, o qual fica aproximadamente 35 km da Estação Ecológica do Panga, diferem pouco das condições da estação e podem ser usados como dados aproximados.

4.2 PROCESSAMENTO DADOS DO SENTINEL-2

Primeiramente foi feita a definição da área de estudo, desta forma foi possível obter as imagens do satélite SENTINEL-2. Logo após ao processamento dessas imagens no software Q-GIS, foi calculado os índices espectrais utilizados neste trabalho, com esses resultados foi possível determinar a relação entre os índices dNBR e CO2flux.

O satélite escolhido para a obtenção dos dados foi o da missão espacial SENTINEL -2, administrados pela Agência Espacial Europeia e pela Comissão Europeia, onde as imagens foram obtidas pelo site do serviço geológico americano de forma gratuita <https://earthexplorer.usgs.gov/>, (AMERICANO, 2020). Três pacotes de bandas em três datas diferentes foram utilizados para este estudo: antes do incêndio no dia 23/08/2017, durante o incêndio no dia 13/09/2017 e após o incêndio no dia 17/10/2017, com o intuito de realizar a análise temporal da área e identificar as mudanças causadas pelo fogo.

Após a aquisição dos dados, cada banda de comprimento de onda do satélite foi tratada e processada no software livre Quantum-GIS (Q-GIS) (QGIS, 2020) usando o plugin embarcado no próprio software, o Semi Automatic Plugin (SCP) (CONGEDO, 2016). Este software foi utilizado para fazer a correção atmosférica das imagens e transformar os dados de cada pixel de número digital em valores de reflectância.

4.3 PROCESSAMENTO DOS ÍNDICES ESPECTRAIS

Em seguida, com a calculadora raster do software (Q-GIS), realizou se os cálculos de cada índice espectral analisado. Primeiramente foi calculado o NDVI (ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. E DEERING, 1973) apresentado pela equação 1:

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

Em que:

NIR = comprimento de onda do infravermelho próximo (842 nm)

RED = comprimento de onda do vermelho (665 nm)

Para a realização do cálculo do CO2flux (RAHMAN et al., 2000), primeiramente é necessário determinar o PRI e sPRI pelas equações 2 e 3. O PRI é:

$$PRI = \frac{(BLUE - GREEN)}{(BLUE + GREEN)} \text{ Equação 2}$$

Em que:

BLUE = comprimento de onda do azul (490 nm)

GREEN = comprimento de onda do verde (560 nm)

Seguindo o cálculo é necessário reescalonar os valores do PRI para valores positivos, a fim de se normalizar os dados de “verdor” da vegetação, por meio da equação 3. O reescalonamento do índice PRI é necessário para ficar na mesma escala do NDVI e assim serem combinados:

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \text{ Equação 3}$$

Com a realização dos cálculos acima foi calculado o índice CO₂flux (RAHMAN et al., 2000), que mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação, equação 4. O estudo de (RAHMAN et al., 2000) mostra que existe uma equivalência entre o índice espectral quando comparado às medidas de fluxo de CO₂ em superfície, logo a unidade de fluxo de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pode ser adotada. No entanto, no Brasil este estudo de equivalência, utilizando medidas de fluxo de CO₂ em superfície foram realizadas apenas para a Floresta Amazônica (SILVA; BAPTISTA, 2015), portanto, no presente estudo a metodologia foi adaptada para o bioma Cerrado, o que não substitui a necessidade de calibração dos dados para o Cerrado.

$$CO_2flux = (NDVI * sPRI) \text{ Equação 4}$$

Com o propósito de determinar a intensidade do incêndio na foi realizado o cálculo dos índices de queimada, primeiramente o índice de queimada por razão normalizada (NBR)(KEY; BENSON, 2006), equação 5:

$$NBR = \frac{(NIR - MIR)}{(NIR + MIR)} * 1000 \text{ Equação 5}$$

Em que:

NIR = comprimento de onda do infravermelho próximo (842 nm)

MIR = comprimento de onda do infravermelho curto (2190 nm)

E posteriormente o índice diferenciado de queimada por razão normalizada (dNBR)(ROY; BOSCHETTI; TRIGG, 2006) que baseia se na subtração do NBR antes e depois do fogo, equação 6:

$$dNBR = (NBR \text{ pré-fogo} - NBR \text{ pós-fogo}) \text{ Equação 6}$$

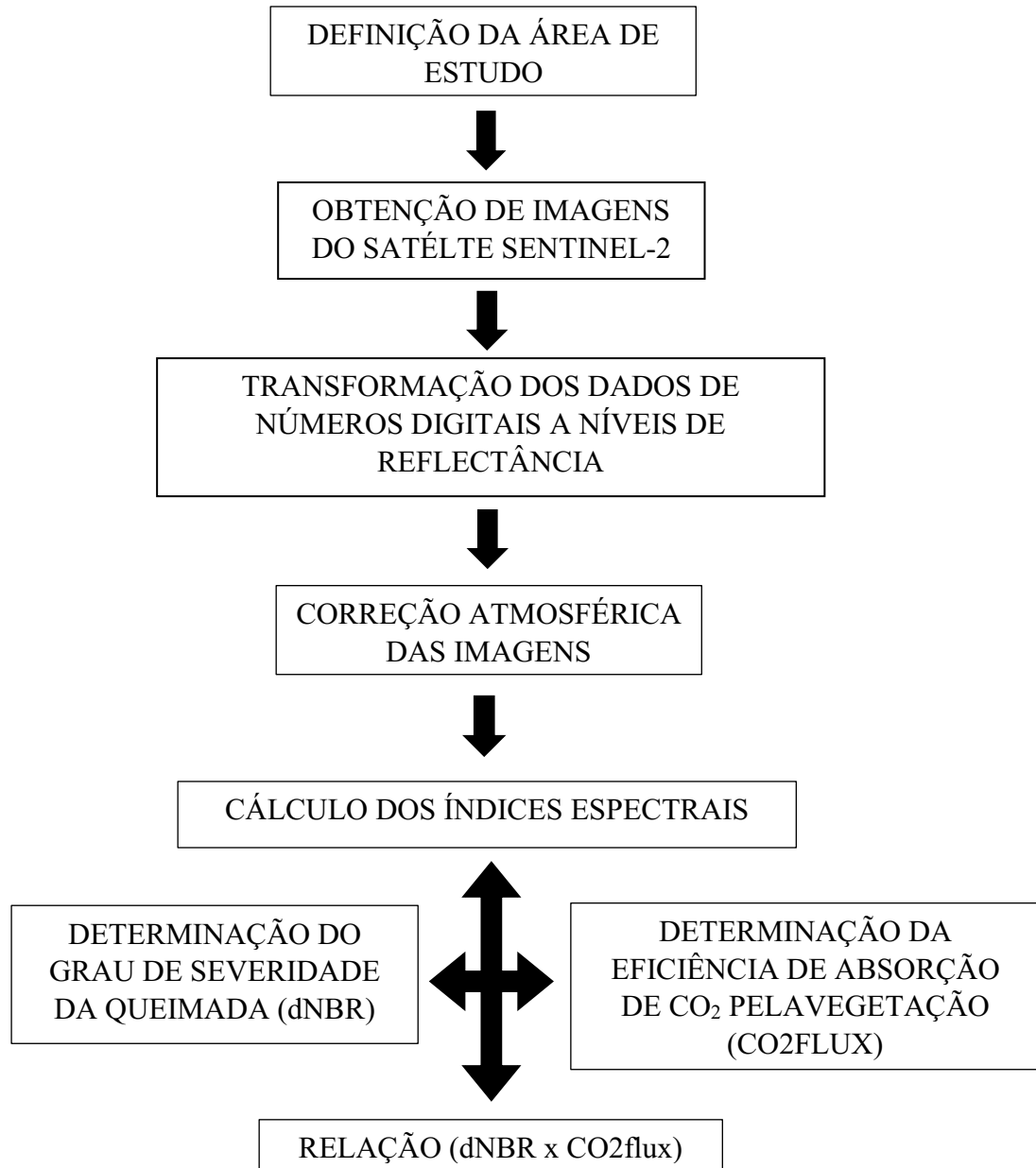
Para os índices de incêndio, foi utilizado os limites de classe de severidade da queimada descrito na tabela 1 (KEY; BENSON, 2006).

Tabela 1. Classes de severidade de queimada e rebrota para o índice dNBR.

Classes de severidade	Limites
Alta rebrota	-500 a -251
Baixa rebrota	-250 a -101
Não queimado	-100 a +99
Baixa severidade	+100 a +269
Moderada a baixa severidade	+270 a +439
Moderada a alta severidade	+440 a +659
Alta severidade	+660 a +1300

Como forma de representar visualmente as etapas metodológicas aplicadas neste estudo, foi elaborado o fluxograma da Figura 9:

Figura 9: Fluxograma de Atividades

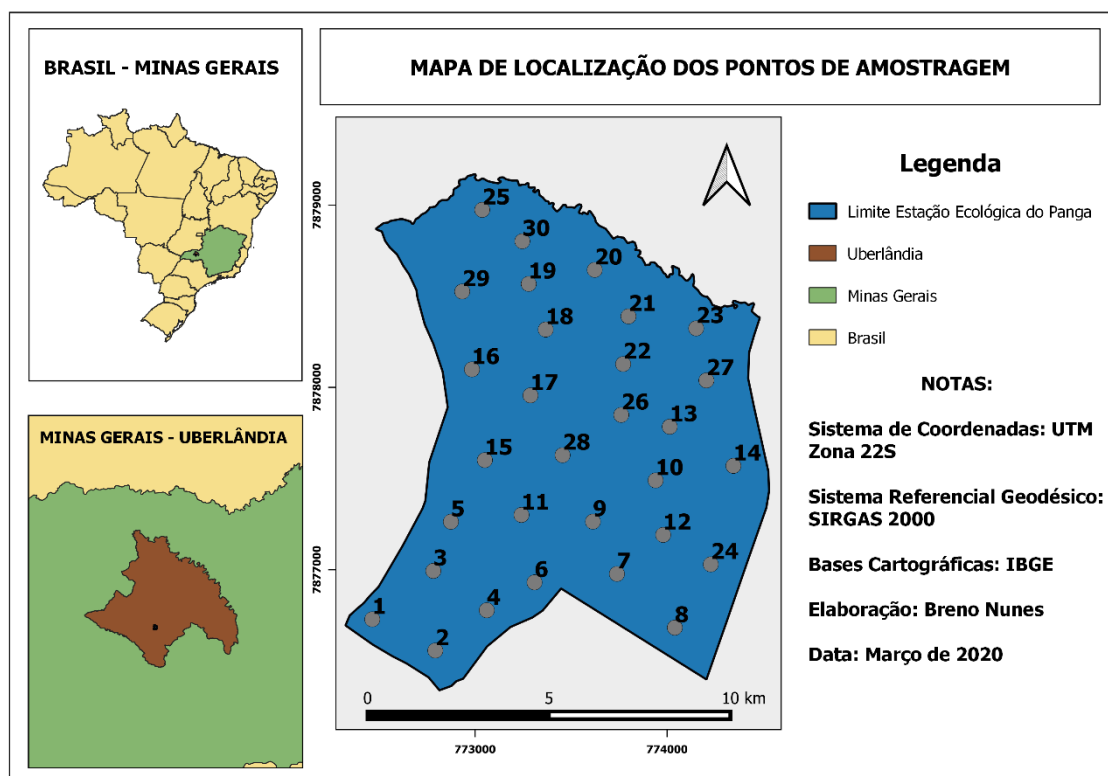


5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DISTRIBUIÇÃO DE ALVOS

Com o objetivo de analisar os valores de reflectância de cada índice espectral utilizado no estudo, foram escolhidos 30 pontos distintos ao longo da área da Estação Ecológica do Panga, de forma aleatória, de forma que cobrissem toda a extensão da estação, a fim de entender o comportamento das áreas queimadas em relação ao desprendimento de CO₂ pela vegetação. Os pontos foram distribuídos de acordo com a Figura 10.

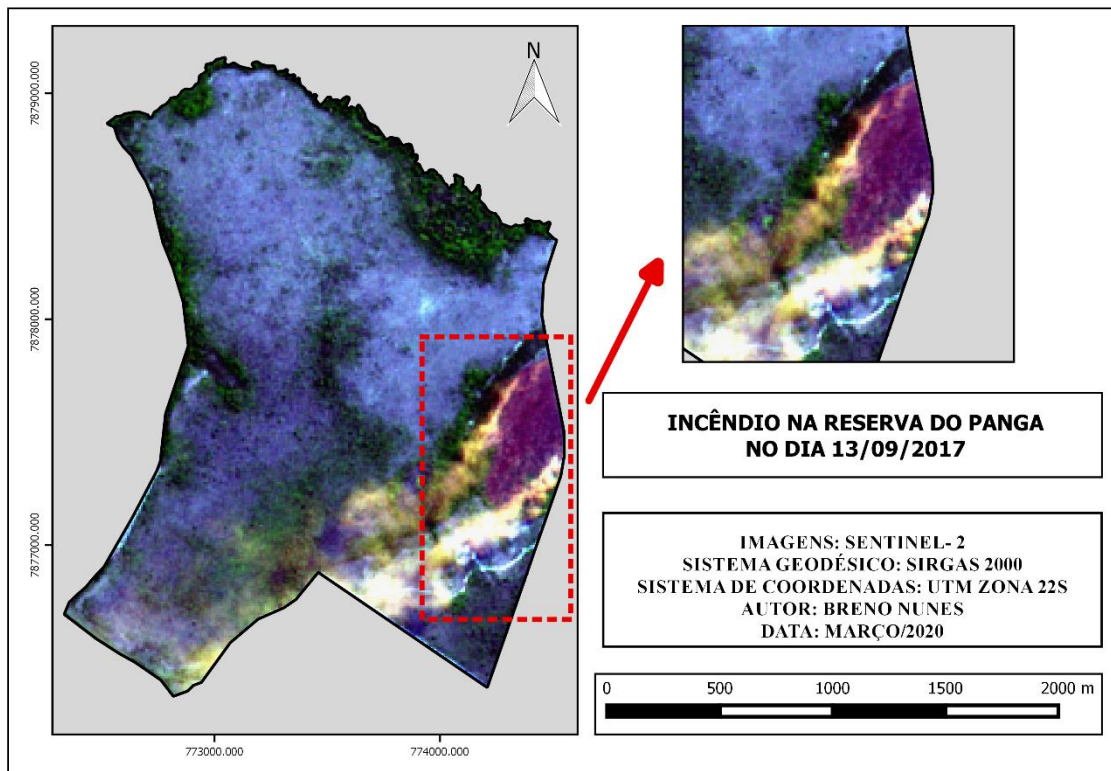
Figura 10: Mapa de localização dos pontos de amostragem na Estação Ecológica do Panga



5.2 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE SEVERIDADE DA QUEIMADA

O incêndio teve início no dia 12/09/2017 iniciando no setor leste da Estação Ecológica do Panga que faz divisa com a BR-455. Na Figura 11 é possível identificar o início do incêndio, que coincidiu com a passagem do satélite que realizou a coleta da imagem no dia 13/09/2017 às 14 h:25 min no horário de Brasília.

Figura 11: Mapa de identificação do começo do incêndio



A Figura 11 representa a composição de imagens coloridas RGB, onde é sobreposto as bandas do vermelho, verde e azul do satélite SENTINEL-2. O zoom na imagem, permite identificar o local de início do incêndio, percebendo que no dia 13/09/2017 grande parte da estação já tinha sido queimada. Em tons roxos e possível ver as áreas que já tinham sido queimadas devido à presença das cinzas e as manchas de fumaça esbranquiçadas que foram levadas pelo vento.

O incêndio durou até o dia 13/09/2017 e após um levantamento feito pelo corpo de bombeiros cerca de 15% da estação foi totalmente consumida pelo fogo representando cerca de 60 hectares do 400 hectares da estação.(MGTV, 2017).

A Figura 12 mostra como ficou a estação após o efeito do fogo. É possível observar os vestígios de onde o incêndio se alastrou. Por exemplo, com troncos, folhas e vegetação rasteira queimados apresentam uma tonalidade escura, provenientes da ação do fogo.

Figura 12: Foto da Estação Ecológica do Panga a após a passagem do fogo no dia 13/09/2017

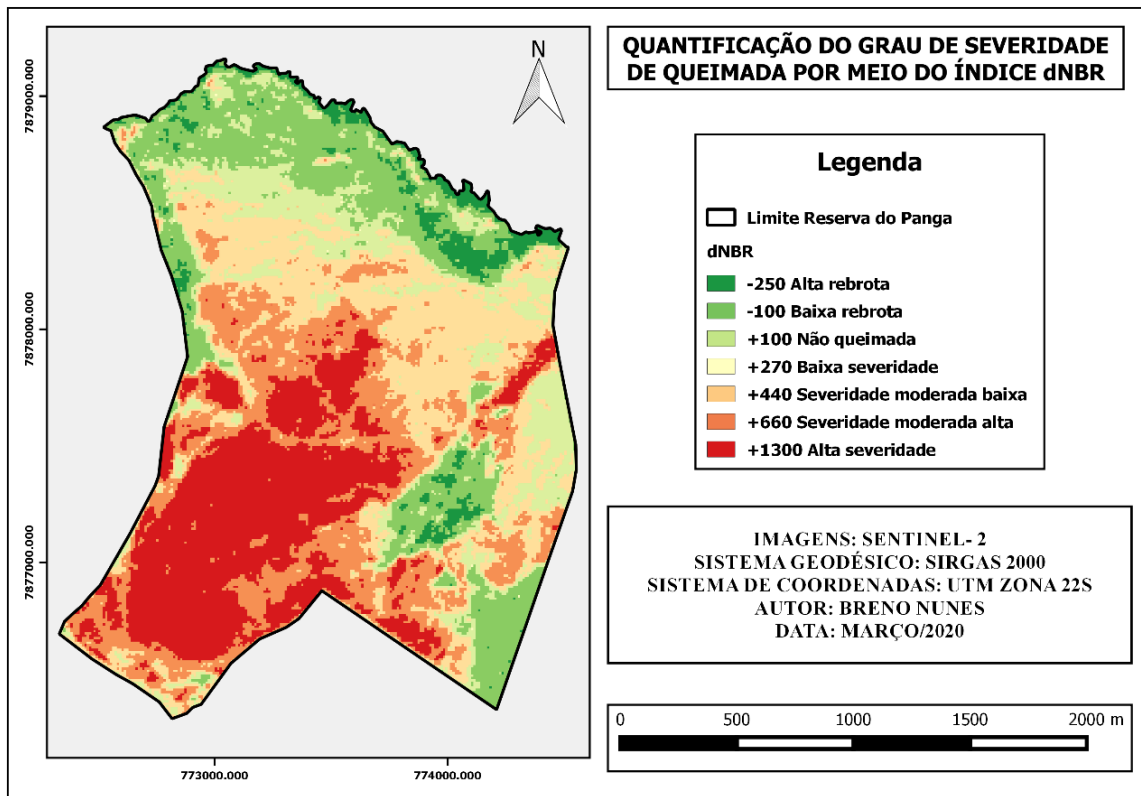


Fonte :Reprodução/TV Integração

Seguindo a classificação proposta na tabela 1, foi utilizado o valor de dNBR para estimar a severidade da queimada, uma vez que este índice é a subtração da imagem pré fogo pela imagem pós fogo. Este índice indica a possibilidade de rebrota da vegetação, quanto mais próximos de valores positivos, maior a intensidade do fogo, representada pelos tons em vermelho escuro de acordo com a Figura 13.

Com essa classificação é possível identificar as áreas que sofreram mudanças com o efeito do fogo, partindo de áreas menos afetadas para áreas onde a queimada foi mais severa. Para isso a imagem pré-fogo utilizada foi a de 23/08/2017, enquanto a cena pós-fogo foi de 17/10/2017, com a subtração dos valores de NBR pré e pós fogo, obtém-se o dNBR que realça o efeito da queimada.

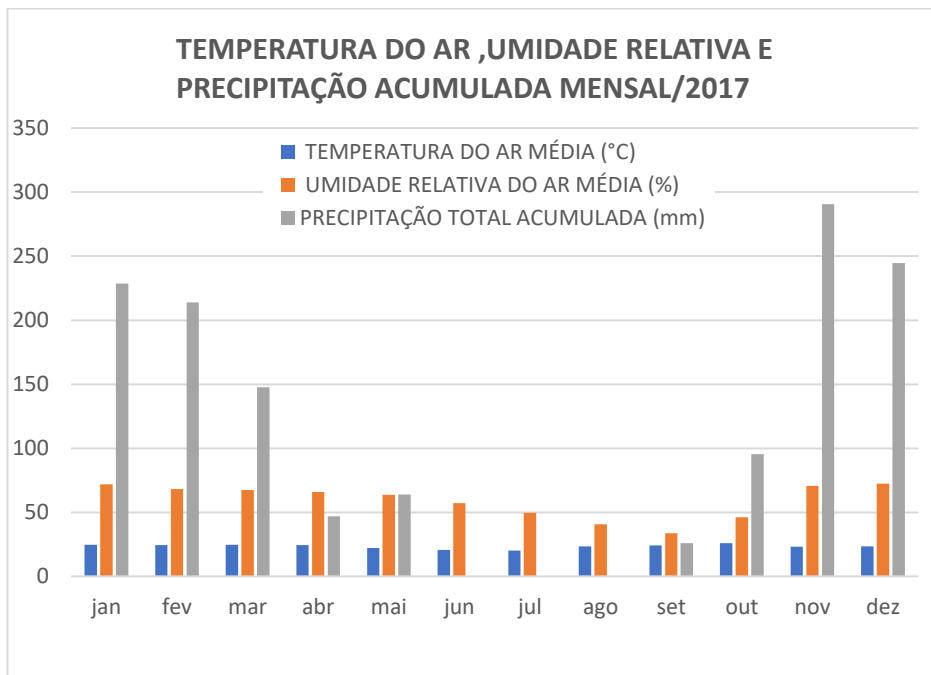
Figura 13: Mapa de quantificação do grau de queimada



Analisando o foco do incêndio no dia 13/09/2017 é possível perceber que mesmo tendo começado no setor leste, as regiões mais afetadas pelo incêndio foram o setor sul e oeste. Possivelmente à presença de um campo úmido fez com que o fogo desviasse da região de vereda e atingisse mais severamente a região sudoeste caracterizada por um cerrado mais denso e com mais biomassa a ser queimada, Figura 13. Ainda nesta Figura, é possível identificar essa região húmida, visto a clara distinção da região em verde que aparece ilhada nos tons vermelhos a sudeste do mapa.

Algumas variáveis meteorológicas podem ajudar a entender os efeitos e intensidade do incêndio. Para isso foram utilizados os dados da estação automática A507 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que fica em Uberlândia- MG, na UFU.

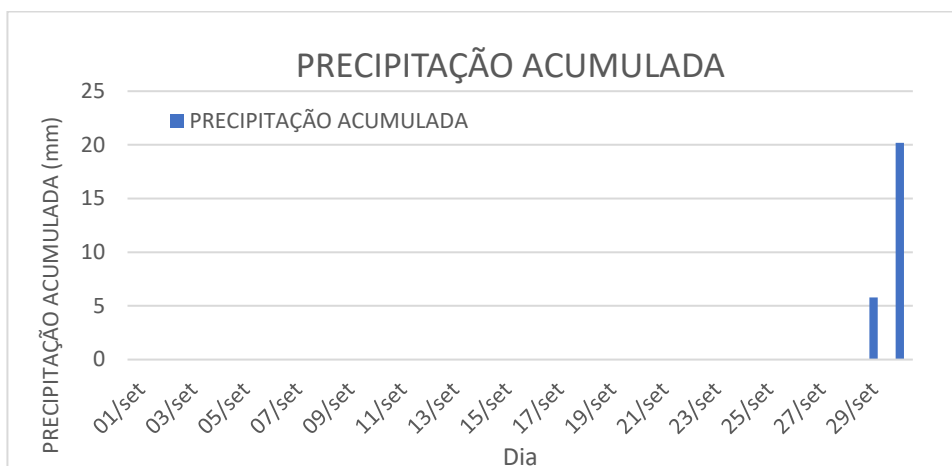
Figura 14: Dados da estação automática A507



Através da figura 14 é possível analisar a relação entre a temperatura e umidade do ar na estação. Considerando o horário da coleta da imagem pelo sensor do satélite no dia 13/09/2017 às 14 h:25 min no horário de Brasília, vemos que a temperatura do ar na estação A507 estava a 26°C e com umidade relativa do ar de 33%, o que caracteriza um clima bem seco.

A direção predominante do vento é de nordeste na estação meteorológica A507, no entanto ao analisar a Figura 11 é visto que a fumaça do incêndio na Estação Ecológica do Panga é levada para o sudoeste, o que pode ser considerado um indicativo que o vento fez com que o fogo se alastrasse ao sul e oeste da estação. Considerando que no período seco do ano as direções leste e norte são predominantes para o vento na região, para evitar novos incêndios no futuro, é importante que estes setores da estação sejam monitorados durante o período seco para evitar que focos de incêndio se alastrem pela estação.

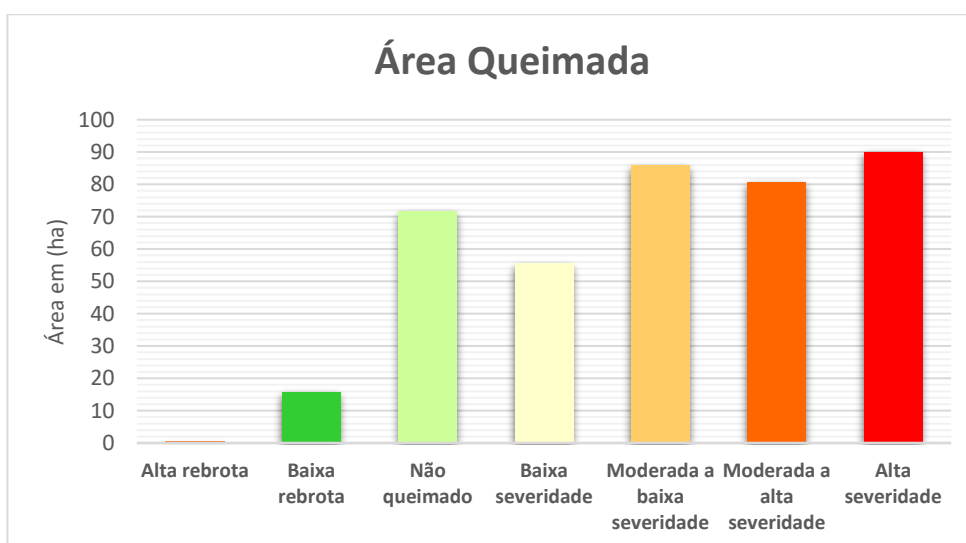
Figura 15: Precipitação no mês de setembro de 2017



Os dados da Figura 15 mostram que no mês de setembro de 2017 foi registrada a ocorrência de precipitação na estação meteorológica de Uberlândia, somente após a data do incêndio, o que indica que a vegetação estava bem seca, potencializando queimadas e incêndios.

Por meio da classificação da tabela 1 foi possível quantificar as áreas de cada classe do dNBR, Figura 13. Verificando os dados da Figura 16, é provável que o fogo tenha atingido de forma intensa mais da metade da estação. Considerando as classes moderada a baixa severidade, moderada a alta severidade e alta severidade, juntas essas classes representam mais de 256 hectares (64%) de área da estação que tiveram perdas significativas de biomassa.

Figura 16: Classes de área queimada por hectare



As demais classes simbolizam efeitos amenos do fogo, a categoria de baixa severidade retrata as áreas onde o fogo foi perdendo intensidade, possivelmente devido a presença de campos com pouca biomassa, uma vez que as áreas classificadas como baixa severidade apresentem campos sujos de acordo com a Figura 4.

Já para as áreas de rebrota são regiões que o fogo não atingiu, por fatores geográficos, climáticos ou vegetativos, na Figura 16 não é possível visualizar a classe de alta rebrota por ela representar apenas 0,39 hectares dos 400 da Estação Ecológica do Panga.

Da área da Estação cerca de 64% sofreu com uma alta severidade na queimada, sendo que grande parte dessa área é caracterizada pelas fitofisionomias cerradão e cerrado stricto sensu de acordo com (SANTOS; ZUZA, 2010). Essas fitofisionomias são definidas por estratos arbóreos densos, que quando queimados perdem grandes quantidades de biomassa.

O rebrotamento das espécies do cerrado após o fogo é relativamente rápido devido a esse bioma ter sua vegetação adaptada ao fogo. Com o intuito de entender o tempo de rebrota das plantas do cerrado após a eventos de queimada (SARTORELLI et al., 2007) estudou seis espécies arbóreas de Cerrado stricto sensu de três diferentes grupos fenológicos (Decíduas, Semidecíduas e Sempre-Verde) analisando o tempo e a diferença na rebrota nos diferentes grupos fenológicos. Sendo que não houve uma diferença significativa no tempo médio de surgimento de novos ramos entre os grupos foliares.

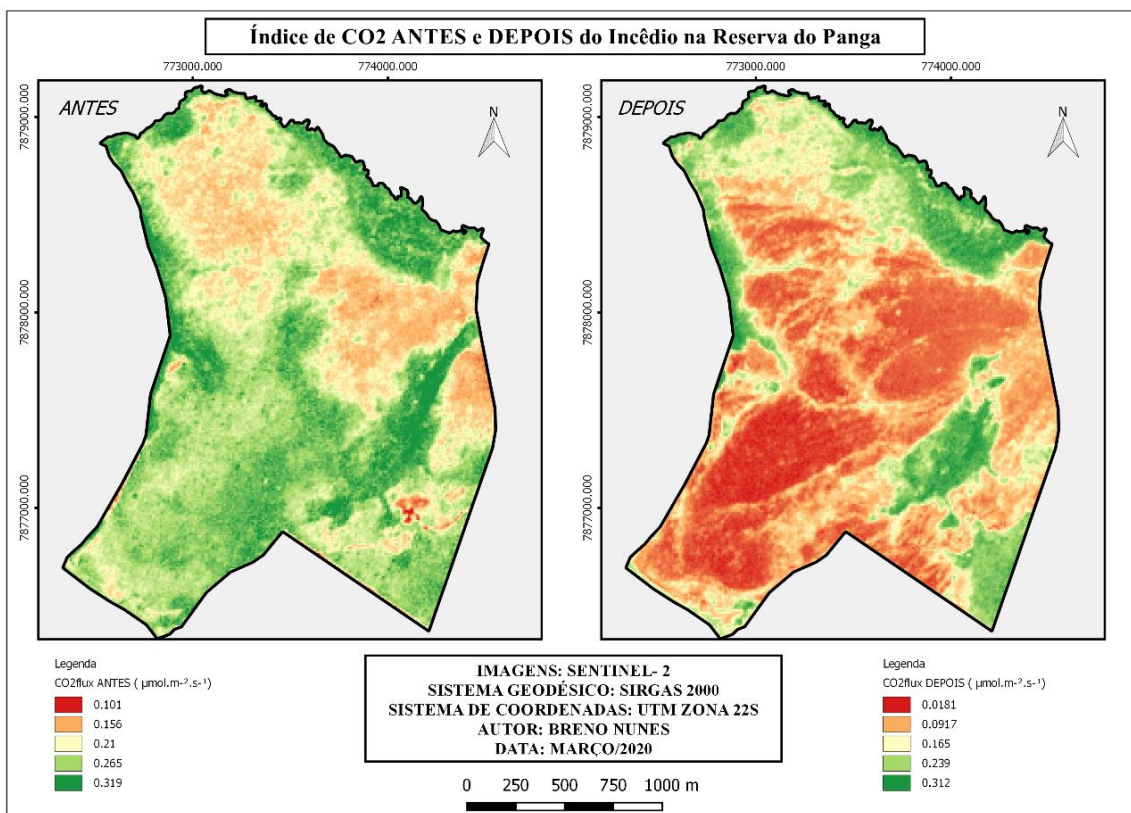
O que mostra que os diferentes grupos fenológicos se comportaram de maneira parecida na emissão de novos ramos após a passagem do fogo, tendo em média um período de surgimento de novos ramos de 1,45 semanas.

As espécies do estudo tiveram uma relação entre o tamanho de ramo e o número de folhas, quanto maior o tamanho do ramo, maior é o número de folhas, ou seja, quanto mais lento o período de rebrotamento dos ramos mais lento será a recuperação do ambiente. O que indica que mesmo adaptado ao fogo, Estação Ecológica do Panga demorará um certo tempo para recuperar suas espécies (SARTORELLI et al., 2007).

5.3 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE SEQUESTRO DE CO₂ PELA VEGETAÇÃO

A Figura 17 ilustra a eficiência do sequestro de CO₂ pela vegetação da Estação Ecológica do Panga, através do índice CO₂flux. Antes do evento de queima com a vegetação praticamente saudável, existe uma grande capacidade de absorção do CO₂ pelas plantas, diferentemente da situação observada após o incêndio, onde a queima faz com que as plantas percam biomassa, diminuindo os teores de clorofila e consequentemente absorvendo menos CO₂.

Figura 17: Eficiência no Processo de absorção de CO₂ pela vegetação.



Analisando a Figura 17 e notável que os maiores valores de absorção de CO₂, representados pelos tons verdes estão presentes no setor sul da estação, região ocupada por um tipo de cerrado mais denso, que consequentemente absorve mais CO₂. Contudo essa mesma área foi a que mais sofreu com a queimada o que reduziu a eficiência no sequestro de carbono da estação a níveis baixos.

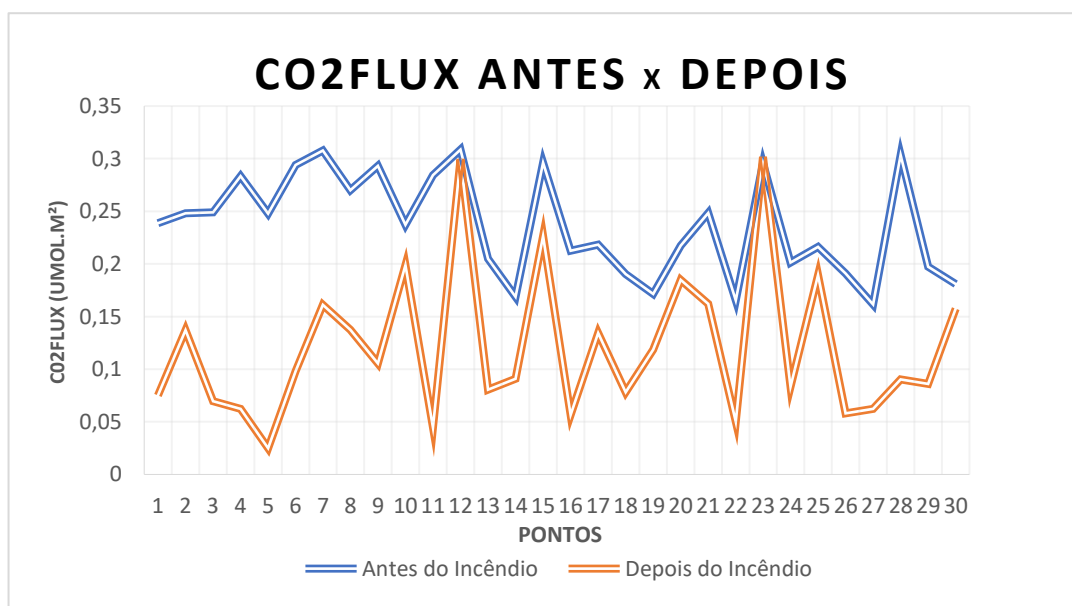
Observando a legenda da Figura 17 é visto que os menores valores da eficiência de sequestro de carbono diminuiram drasticamente após a passagem do fogo. Antes da queimada as áreas que menos absorviam CO₂, assimilavam cerca de 0,101 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$,

enquanto com a ação do fogo esses valores diminuíram para aproximadamente $0,0181 \mu\text{mol.m}^2$, o que indica que após a passagem do fogo a assimilação de absorção de CO_2 pela vegetação diminuiu aproximadamente 5 vezes.

Os maiores valores de CO_2 flux ficaram em torno de $0,26$ a $0,30 \mu\text{mol.m}^2$, o que está próximo dos valores encontrados por (SILVA; BAPTISTA, 2015) em ambientes na Amazônia Brasileira, onde foi visto valores em torno dos $0,3$ a $0,4 \mu\text{mol.m}^2$. As áreas de estudo em questão foram reservas, fazendas e florestas destinadas a preservação e estudo da Amazônia, o que pode refletir em uma leve alta dos valores de CO_2 flux comparados ao presente trabalho, uma vez que esses biomas são cobertos por florestas tropicais que tendem a ter uma taxa fotossintética maior, assim tendo um fluxo de CO_2 mais intenso.

Com a amostragem dos 30 pontos pela estação, é possível analisar a Figura 18, que indica a eficiência de sequestro de CO_2 , antes e depois da queimada sobre os pontos amostrados.

Figura 18: Fluxo de CO_2 nos pontos amostrados



É visto que os valores do índice de CO_2 flux diminuíram após o incêndio. Apenas os pontos selecionados ao norte da estação não apresentaram variações, provavelmente porque o fogo não chegou nessa região.

Em média cada ponto amostrado teve redução de $0,116 \mu\text{mol.m}^2$, os pontos que mais apresentaram diferenças no valor de CO_2 flux foram 5 e 11 localizados na região onde o fogo foi mais intenso. Analisando os valores mínimos e máximos do ponto 5

(0,248 – 0,025 $\mu\text{mol.m}^2$) é visto que houve uma redução de 89% da eficiência no sequestro de carbono após o incêndio, já para o ponto 11 (0,284 – 0,045 $\mu\text{mol.m}^2$) a perda da eficiência foi em torno dos 84%.

A diminuição da eficiência do processo de sequestro CO_2 pelas plantas sugere que grande parte do carbono acumulado antes do incêndio foi liberado na atmosfera como material particulado, COVS, CO, CO_2 , que são produtos da combustão incompleta. Embora os COVs e CO não sejam considerados gases do efeito estufa de forma direta, eles podem ser transformados na atmosfera em CO_2 , além de contribuírem para a formação de ozônio troposférico que é um gás estufa (IPCC 2018).

Além disso o material particulado, dependendo de sua composição química e propriedades físicas (ex. diâmetro) podem atuar tanto no sentido de aquecimento quanto resfriamento da atmosfera (IPCC 2018). Dessa forma, esta análise permitiu estimar a quantidade de carbono que a vegetação deixou de sequestrar da atmosfera.

No software Q-GIS é possível realizar uma estatística de zonas sobre as imagens de satélite, dessa maneira foi realizada uma análise estatística sobre os pixels das imagens que armazenam as informações do índice CO_2 flux antes e depois do fogo, os valores encontrados seguem na tabela 2.

Tabela 2. Valores de CO_2 flux antes e depois do incêndio

Análise dos pixels do CO_2flux ($\mu\text{mol.m}^2$)				
	Mínimo	Máximo	Média	Soma
ANTES	0,0654	0,3564	0,2447	9826,1281
DEPOIS	0,0122	0,3284	0,1322	5309,7910

Analisando os valores mínimos (0,0654 – 0,0122 $\mu\text{mol.m}^2$) e máximos (0,3564 – 0,3284 $\mu\text{mol.m}^2$) encontrados é evidente que não houve tanta variação no valor de fluxo de CO_2 . Em parte, isto pode ser explicado pelo fato de o fogo não ter afetado toda a estação. No entanto, há pontos onde está variação entre mínimos e máximos, antes e depois do incêndio apresentaram variações de até 89%. O valor médio apresentou redução de 46%, indicando uma redução significativa do fluxo de CO_2 pela Estação Ecológica do

Panga. Esta redução era esperada após o incêndio, já que a vegetação queimada absorve menos CO₂ da atmosfera.

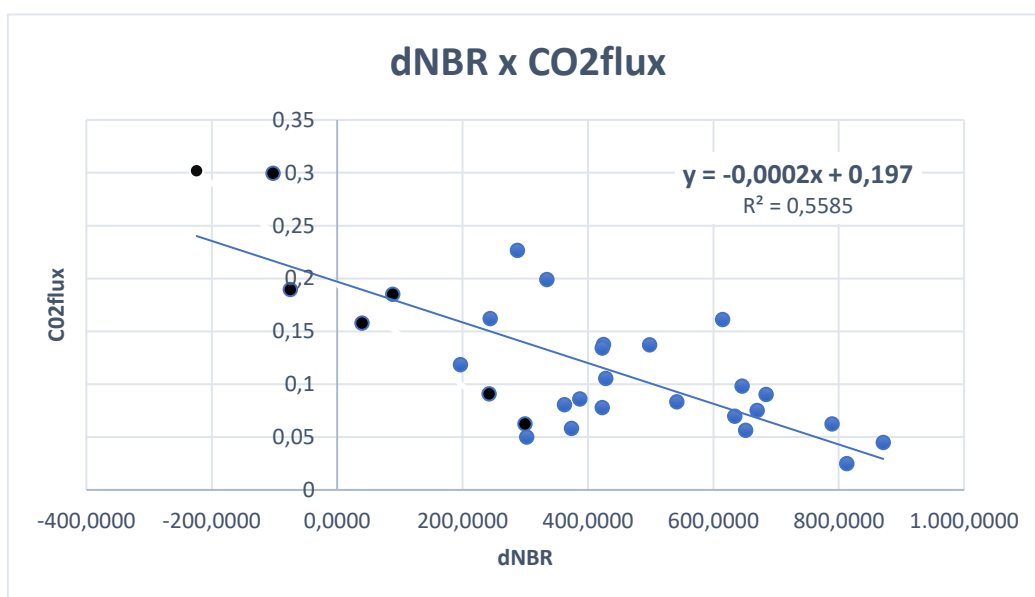
O valor mais característico sobre o efeito que a queimada teve é a soma de todos os pixels da estação. Antes do fogo a área em questão absorvia cerca de 9.826,1281 μmol.m² de CO₂, depois do fogo passou a absorver apenas 5.309,7910 μmol.m². Este resultado sugere uma diminuição de 46% da eficiência do sequestro de carbono da estação após o evento de queimada.

5.4 RELAÇÃO dNBR x CO₂flux

Avaliar a relação entre a severidade da queimada e o sequestro de carbono pela vegetação é um dos principais objetivos deste trabalho. Tal relação é relevante nos estudos sobre aquecimento global, considerando que as florestas são grandes sumidouros de CO₂ e quando queimadas acabam liberando o carbono retido para a atmosfera.

Dessa forma na Figura 19 observa-se a relação entre os índices dNBR e CO₂flux com a amostragem dos 30 pontos pela estação:

Figura 19: Relação entre o dNBR x CO₂flux



É possível perceber pelos pontos da Figura 19 que a relação entre o dNBR e o CO₂flux é inversamente proporcional. Os resultados da regressão linear mostram que quanto mais severa a queimada (alto dNBR), menores são os valores de sequestro de CO₂ pela vegetação.

O valor de $R^2 = 0,56$ indica uma boa correlação entre os índices, que corrobora com a hipótese de que incêndios florestais ocasionam a liberação de CO_2 estocado pela vegetação. Outros estudos também analisaram a relação entre o CO_2 flux e dNBR como o trabalho de (TEIXEIRA, 2019) que estudou tal relação e encontrou um valor de $R^2 = 0,77$ para um evento de queimada no Parque Nacional de Brasília – PARNA Brasília.

Fazendo uma analogia com a equação da Figura 19, pode-se considerar que $\text{CO}_2\text{flux} = -0,0002 \times (\text{dNBR}) + 0,197$ permitindo concluir que queimadas mais severas diminuiriam o valor de 0,197 que é o valor de CO_2 flux quando o valor do dNBR é nulo, ou seja, quando a queimada é de baixa intensidade. Se houvesse um valor acima de 0,197 a área suportaria melhor o efeito da queimada, mantendo uma absorção de CO_2 melhor, contudo, valores menores indicam que a estação é mais suscetível a deixar de absorver CO_2 durante a queimada.

Observando os pontos do gráfico de dispersão da Figura 19 é visto que existe um afastamento dos pontos sobre a linha de ajuste linear, que pode ser explicado pelo fato da amostragem dos pontos coletar informações de diferentes níveis de queimada, pontos coletados ao norte da estação (pontos na cor preta), não sofreram com o fogo, fazendo com que exista essa dispersão entre os pontos.

Ademais a Estação Ecológica do Panga apresenta diferentes tipos de cerrado que possuem distintos tipos de vegetação que absorvem mais ou menos CO_2 , sendo influenciado pela quantidade de biomassa que esses ambientes mantêm. Quanto maior os índices de sequestro de CO_2 , espera-se que exista uma maior quantidade de biomassa, por outro lado, também se espera que a intensidade do fogo seja maior.

6. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi mensurar a quantidade de CO₂ que deixou de ser absorvido pela vegetação em um incêndio, por meio de Sensoriamento Remoto utilizando índices de vegetação. Os dados utilizados foram os do satélite SENTINEL-2 com uma resolução espacial de 10 metros apresentando um potencial para a identificação e monitoramento de queimadas e consequentemente a absorção de CO₂ pela vegetação.

Com o processamento das informações coletadas pelo satélite pôde-se entender o fluxo de carbono pelas plantas durante o incêndio, uma vez que o sequestro de carbono pelas plantas após o incêndio é muito menor, acarretando em uma possível liberação CO₂ e outros gases, que estavam retidos nas plantas para a atmosfera, intensificando o efeito estufa e as mudanças climáticas.

Também foi analisado a relação entre os índices de vegetação dNBR e CO₂flux, que medem a severidade da queimada e o fluxo de CO₂, sendo observado que existe elevada relação inversamente proporcional entre os índices, pois, os resultados mostram que baixos valores de absorção de CO₂ ocorrem quando as queimadas são de grande impacto na vegetação.

No entanto a metodologia referente a absorção de CO₂ pelas plantas proposta no presente estudo, ainda não conta com a validação dos resultados para o bioma Cerrado, na literatura nacional e internacional ainda não foi feito estudos sobre a validação do índice CO₂flux no Cerrado, o que dificulta a comparação dos resultados deste trabalho com outras referências.

Por fim, vale ressaltar a importância de estudar os incêndios, em virtude deles se tornarem cada vez mais frequentes. Compreender o potencial de desprendimento de CO₂ é fundamental para que possamos entender a influência que os incêndios tem na intensificação do aquecimento global, a fim de tomarmos medidas de preservação e proteção de áreas como o cerrado.

REFERÊNCIAS

AMERICANO, S. G. **USGS**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. **XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil**, v. 510, p. 1037-1044, 2003.

CAMPOS, C. P. DOS. A conservação das florestas no Brasil, mudança do clima e o mecanismo de desenvolvimento limpo no Protocolo de Quioto. **Tese- UFRJ, COPPE**, 2001.

CIAIS, P. et al. **Carbon and Other Biogeochemical Cycles Change, IPCC Climate**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/review/WG1AR5_SOD_Ch06_All_Final.pdf %5Cn<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A023>>.

CLARA, A. et al. Utilização de intervalos de índices de vegetação e temperatura da superfície para detecção de queimadas Use of intervals of vegetation index and surface temperature to detect fires. p. 30–40, 2014.

CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin User Manual Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. n. July 2014, 2016.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma_Biomas brasileiros.pdf. **Acta Botânica Brasileira**, v. 20, n.

DA SILVA¹, Rosane Gomes; DA ROCHA MIRANDA¹, Jonathan; NASCIMENTO, Cristina Rodrigues. **Detecção de áreas queimadas no Parque Estadual de Serra Nova/MG utilizando os índices espectrais NDVI e NDBR**. 2013.

DE MELLO BAPTISTA, Gustavo Macedo; MUNHOZ, Cássia Beatriz Rodrigues. Comportamento do seqüestro florestal de carbono, do conteúdo de CO₂ atmosférico e do conteúdo de umidade da vegetação no Pantanal de Nhecolândia, MS, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. **XIV SBSR, Natal, Brasil**, p. 1071-1078, 2009.

DEPRÁ, B. et al. Identificação De Queimadas Nos Campos De Cima Da Serra , Rs , Através Dos Índices Ndvi E Nbr. **III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA**,

n. Bristot 2001, p. 199–202, 2012.

DOUGLAS GOMES DOS SANTOS, R. DE C. B. A aplicação de técnicas de cartografia e suas contribuições para o zoneamento ecológico da estação ecológica do panga (uberlândia-mg). **XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA APLICADA**, 2009.

ENGESAT. **SENTINEL-2**. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/sentinel-2/>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

FIDELIS, A.; PIVELLO, V. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos? *Biodiversidade Brasileira*, v. 1, n. 2, p. 12–25, 2011.

GAMON, J. A.; PENUELAS, Josep; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of environment**, v. 41, n. 1, p. 35-44, 1992.

JENSEN, John R.; EPIPHANIO, José Carlos Neves. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. **USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR**, n. 164 RMRS-GTR, 2006.

LIMA, Isabella Caixeta. **Monitoramento dos focos de queimadas nos biomas Amazônia e Cerrado nas estações seca e chuvosa de 2017. 2018. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.**

MEDEIROS, J. D. D. Guia de campo: vegetação do Cerrado 500 espécies. **Série Biodiversidade**, 43, v. 1, p. 532, 2011.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MGTV. **Incêndio na Reserva Ecológica do Panga em Uberlândia destruiu mais de 60 hectares, segundo bombeiros**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/incendio-na-reserva-ecologica-do-panga-em-uberlandia-destruiu-mais-de-60-hectares-segundo-bombeiros.ghtml>>.

MORENO, C. Fatores edáficos influenciando na estrutura de fitofisionomias do cerrado 1. p. 173–194, 2008.

PINTO, E. DE P. P. et al. perguntas e respostas sobre AQUECIMENTO GLOBAL. **IPAM**, 2010.

QGIS. “**QGIS: um sistema de informação geográfica livre e aberto**”. Disponível em: <<https://qgis.org/en/site/>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

RAHMAN, A. et al. Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California.**, p. 8, 2000.

RIBEIRO, J. F., & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado : ambiente e flora**, p. 556, 1998.

RIBEIRO, J. F. et al. **Os Principais tipos Fitofisionômicos da Região dos Cerrados**, 1983.

ROSA, R. Introdução Ao Geoprocessamento. **Universidade Federal De Uberlândia**, p. 142, 2013.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. E DEERING, D. W. “Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS”. In: ERTS-1 Symposium, 3., 10-14 December, Washington, DC. Proceedings. Washington, NASA SP, v. 351. 1973.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; TRIGG, S. N. Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 1, p. 112–116, 2006.

SANTOS, D. G. DOS; ZUZA, M. L. R. Avaliação qualitativa das trilhas da RPPN Panga - Uberlândia - MG. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 34, p. 22–33, 2010.

SANTOS, Paula Resende; PEREIRA, Gabriel; ROCHA, Leonardo Cristian. Análise da distribuição espacial dos focos de queimadas para o bioma Cerrado (2002-2012). **Caderno de Geografia**, v. 24, n. 1, p. 133-142, 2014.

SARTORELLI, P. A. R. et al. Rebrotas após fogo de espécies arbóreas de diferentes grupos fenológicos foliares em cerrado stricto sensu. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. VI, n. 10, p. 1678–3867, 2007.

SILVA, S. C. P. DA; BAPTISTA, G. M. D. M. Análises Espectrais Da Vegetação Com

Dados Hyperion E Sua Relação Com a Concentração E O Fluxo De Co2 Em Diferentes Ambientes Na Amazônia Brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 354–370, 2015a.

SILVA, S. C. P. DA; BAPTISTA, G. M. DE M. Sequestro Florestal de Carbono nas Torres Micrometeorológicas em Diferentes Ambientes na Amazônia Brasileira e sua relação com dados Hyperion. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 2009, p. 310–317, 2015b.

TEIXEIRA, A. L. S. Estudo Por Meio De Índices Espectrais Da Correlação Entre Incêndios Florestais E Estoque Florestal De Dióxido De Carbono. **XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, p. 1394–1397, 2019.