

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

GABRIELA OLIVEIRA SILVA

EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS ECOLÓGICAS DA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA
EMPREGANDO DADOS OBTIDOS POR VANT

LAGES, SC

2020

GABRIELA OLIVEIRA SILVA

**EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS ECOLÓGICAS DA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA
EMPREGANDO DADOS OBTIDOS POR VANT**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Marcos Benedito Schimalski

Co-Orientador: Veraldo Liesenberg

**LAGES, SC
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Silva, Gabriela Oliveira
EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS ECOLÓGICAS DA
FLORESTA OMBRÓFILA MISTA EMPREGANDO DADOS
OBTIDOS POR VANT / Gabriela Oliveira Silva. -- 2020.
106 p.

Orientador: Marcos Benedito Schimalski
Coorientador: Veraldo Liesenberg
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2020.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Processamento digital de imagens.
3. Estágio de sucessão ecológica. 4. Contagem de espécies. I.
Schimalski, Marcos Benedito . II. Liesenberg, Veraldo . III.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. IV. Título.

GABRIELA OLIVEIRA SILVA

**EXTRAÇÃO DE VARIÁVEIS ECOLÓGICAS DA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA
EMPREGANDO DADOS OBTIDOS POR VANT**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Banca Examinadora:

Orientador: _____
Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski
(UDESC/Lages-SC)

Membro: _____
Profª. Dra. Maria Madalena Santos da Silva
(UTFPR/Dois Vizinhos-PR)

Membro: _____
Prof. Dr. Adelar Mantovani
(UDESC/Lages-SC)

Suplente: _____
Prof. Dr. Veraldo Liesenberg
(UDESC/Lages-SC)

Lages, 28 de fevereiro de 2020

A minha família, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo apoio, incentivo e dedicação, sempre. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Benedito Schimalski, por ter acreditado no meu potencial desde o início, por todos os ensinamentos e paciência.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Veraldo Liesenberg, por todo o auxílio e ensinamento.

Ao grupo Lago Azul pelo apoio à pesquisa.

Também agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina -FAPESC e ao Sinapse da Inovação por todo o suporte.

Aos membros da banca Prof. Dr. Adelar Montovani e Profa. Dra. Maria Madalena Santos da Silva, que aceitaram o convite para participar da banca e contribuírem com a pesquisa.

Aos amigos que fiz em Lages, sem vocês essa experiência não estaria completa.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta etapa, agradeço.

RESUMO

O emprego de técnicas de Sensoriamento Remoto para o mapeamento de estágios de sucessão e de espécies arbóreas em florestas constitui-se em um grande desafio. Isto em função da alta diversidade florística e espectral nesses locais. Neste contexto, verifica-se o advento e a evolução de tecnologias de sensores remotamente situados e que são aplicadas ao monitoramento dos recursos florestais. As plataformas espaciais e aéreas dispõem dados espaciais e espectrais com elevada resolução que associadas a técnicas de inteligência artificial constituem-se em ferramentas auxiliares a resolução deste desafio. Esta dissertação pesquisou metodologias e técnicas para o processamento de imagens aéreas de ultra alta resolução espacial obtidas a partir de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Este estudo investigou dois tópicos principais relacionados aos estágios sucessionais e mapeamento de espécies arbóreas em um ambiente de floresta subtropical no sul do Brasil. O processamento fotogramétrico foi implementado no aplicativo *Agisoft PhotoScan* produzindo-se modelos digitais tridimensionais e ortomosaicos digitais. As nuvens de pontos fotogramétricos foram processadas com o algoritmo *LasTools* para derivação do *Canopy Height Model* (CHM). Para auxiliar na classificação da sucessão vegetal foram calculados índices de vegetação combinados as bandas espectrais no espectro visível. Foram testados os classificadores *Support Vector Machine* (SVM), *Random Tree* (RT) e *Maximum Likelihood Classifier* (MLC). Para avaliação das classificações foi calculada a matriz de confusão e índice Kappa, além da comparação com a classificação manual. Para a contagem do número de espécies foi calculado o GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) do ortomosaico digital no espectro visível. Essas matrizes de co ocorrência foram associadas com as bandas vermelha e verde e, então, segmentadas no aplicativo GEODMA. As métricas dos segmentos foram importadas no aplicativo WEKA. O algoritmo *Cluster Simple EM* (*expectation maximizations*) calculou automaticamente o número de espécies a partir dos atributos fornecidos. A contagem automática dos indivíduos arbóreos foi validada com a fotointerpretação manual dos mosaicos. Os resultados para a classificação de estágio de sucessão que apresentou melhor resultado foi a que utilizou o DTM (Modelo Digital de Elevação) associado às bandas vermelha e verde, com o classificador RT, com um índice kappa de 94,57%. A variável textural que apresentou os melhores resultados para a contagem do número de espécies arbóreas foi a dissimilaridade do nível de cinza das bandas RGB. O estudo demonstrou ser possível a classificação de estágios de sucessão da vegetação de forma automática com resultados classificados como excelentes. As variáveis texturais demonstraram influenciar positivamente na contagem automática do número de espécies presentes no dossel superior.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Processamento digital de imagens, Estágio de sucessão ecológica, Contagem de espécies.

ABSTRACT

The use of Remote Sensing techniques to map succession stages and tree species in forests is a major challenge. This is due to the high floristic and spectral diversity in these places. In this context, there is the advent and evolution of Remote Sensing technologies that are applied to the monitoring of forest resources. Space and aerial platforms have high-resolution spatial and spectral data that, combined with artificial intelligence techniques, are auxiliary tools to solve this challenge. This dissertation research methodologies and techniques for the processing of ultra-high spatial resolution aerial images obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs). This study investigated two main topics related to the successional stages and mapping of tree species in a subtropical forest environment in southern Brazil. The photogrammetric processing was implemented in the Agisoft PhotoScan, producing digital three-dimensional models and digital orthomosaic. The photogrammetric point clouds (PPC) were processed with the LasTools algorithm to derive the Canopy Height Model (CHM). To assist in the classification of successional stages, vegetation indices were calculated combined with spectral bands in the visible spectrum. The Support Vector Machine (SVM), Random Tree (RT) and Maximum Likelihood Classifier (MLC) classifiers were tested. To evaluate the classifications, the confusion matrix and Kappa index were calculated, in addition to the comparison with the manual classification. To count the number of species, the GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) of the digital orthomosaic in the visible spectrum was calculated. These co-occurrence matrices were associated with the red and green bands and then segmented in the GEODMA. The metrics of the segments were imported into the WEKA. The Cluster Simple EM algorithm (expectation maximizations) automatically selected the number of species based on the provided attributes. The automatic counting of tree individuals was validated with the manual photointerpretation of the mosaics. The results for the classification of successional stage that presented the best result was the one that used the DEM (Digital Elevation Model) associated with the red and green bands, with the RT classifier, with a kappa index of 94.57%. The textural variable that presented the best results for counting the number of tree species was the gray level dissimilarity of the RGB bands. The study demonstrated that it is possible to classify vegetation succession stages automatically with results classified as excellent. The textural variables demonstrated to positively influence the automatic counting of the number of species present in the upper canopy.

Keywords: Remote Sensing, Digital image processing, Successional stages, Counting species.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- 1A: Demonstração de uma sucessão primária. 1B: Demonstração de sucessão secundária e os grupos de sucessão.	28
Figura 2- Classificação do Sensoriamento Remoto quanto a Plataforma.	32
Figura 3- Detalhamento das cores e comprimentos de ondas do Espectro eletromagnético.	32
Figura 4- A imagem exemplifica as diferentes formas de interação da radiação eletromagnética incidente (I) na folha: Absorção (A), Transmissão (T) e Reflexão (R).	33
Figura 5- Superior: Espectro de absorção das clorofilas a e b e de carotenóides em função do comprimento de onda, entre 400-700nm. Inferior: Taxa fotossintética relativa, dentro da mesma banda espectral.	34
Figura 6- Curva de refletância espectral típica de uma folha verde e sadia.	35
Figura 7- Nomenclatura dos VANTs com suas respectivas alturas de voo e duração em horas.	37
Figura 8- Representação do DSM, DTM e CHM.	40
Figura 9 - Limite do Parque Natural de Lages –PARNAMUL e indicação as áreas de estudo.	44
Figura 10- Fluxograma das etapas para o planejamento de voo.	45
Figura 11 - VANT Phantom 4 Pro.	46
Figura 12 - Fluxograma das etapas para o processamento de fotografias aéreas.	47
Figura 13 - Fluxograma das etapas para a filtragem da nuvem fotogramétrica de pontos.	49
Figura 14 - Fluxograma para a classificação do estágio de sucessão florestal.	50
Figura 15- Fluxograma das etapas realizadas para a contagem automática de morfoespécies.	53
Figura 16 - Distribuição dos transectos amostrais na área 2.	55
Figura 17- 17A: Ortomosaico com composição R-G-B. 17B - Ortomosaico com composição R-G-Nir. 17C - PPC.	61
Figura 18- 18A: Ortomosaico com composição R-G-B. 18B - Ortomosaico com composição R-G-Nir. 18C - PPC. Fonte – Elaborado pela autora (2020).	62
Figura 19- Apresentação da filtragem da nuvem de pontos. 19A-Digital Elevation Model. 19B-Digital Terrain Model. 19C-Canopy Height Model.	64
Figura 20 - Apresentação da filtragem da nuvem de pontos. 20A-Digital Elevation Model. 20B-Digital Terrain Model. 20C-Canopy Height Model.	65
Figura 21- Classificação utilizando o Random Tree e composição de bandas com o DEM.	67
Figura 22- Figura 21A- Classificação obtida com Random Tree. Figura 21B - Classificação manual da mesma composição.	68
Figura 23- Verdade de campo para o transecto 1.	71
Figura 24 - Contagem manual de morfoespécies das cinco parcelas pertencentes ao transecto 2.	72
Figura 25 - Contagem manual de morfoespécies das cinco parcelas pertencentes ao transecto 3.	73
Figura 26- Figura 26A- Ortomosaico digital do voo 2. Figura 26B - Recorte do ortomosaico digital do voo 2.	77
Figura 27-Contagem automática de morfoespécies utilizando a dissimilaridade da banda vermelha.	78
Figura 28- Contagem automática de morfoespécies utilizando a dissimilaridade da banda azul.	78
Figura 29 - Contagem automática de morfoespécies utilizando a dissimilaridade da banda verde.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Legislações federais que dispõem sobre os estágios sucessionais da vegetação.	26
Tabela 2- Indicadores e valores utilizados em cada tipo de vegetação para atestar recomposição.	29
Tabela 3- Classificação dos VANT de acordo com o peso e suas exigências.	39
Tabela 4 - Programas utilizados e finalidade.	43
Tabela 5- Parâmetros do voo utilizados.	45
Tabela 6-Especificações da aeronave/sensor.	46
Tabela 7- Índices de Vegetação calculados.	51
Tabela 8 - Combinações com índices de vegetação e modelos digitais testados.	51
Tabela 9- Parâmetros texturais calculados.	56
Tabela 10- Composições multiespectrais utilizadas.	57
Tabela 11- Categorização de uma classificação a partir o valor do índice Kappa.	58
Tabela 12- Estatística descritiva da nuvem de pontos fotogramétrica (PPC) não filtrada e filtrada do voo 1.	63
Tabela 13- Estatística descritiva da nuvem de pontos fotogramétrica (PPC) não filtrada e filtrada da área 2.	64
Tabela 14- Índice Kappa obtido por classificador e composições de bandas.	66
Tabela 15- Áreas obtidas pela classificação manual e automática.	68
Tabela 16- Número de morfoespécies identificadas manualmente e pelo inventário convencional.	70
Tabela 17- Quantidade de acertos de acordo com a variável e banda espectral.	74
Tabela 18 - Comparação da quantidade de espécies e Índice de Shannon obtidos pela metodologia automática e pela metodologia convencional.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CCD	<i>Charge Coupled Device (Dispositivo de Carga Acomplada)</i>
CFS	<i>Correlation-based Feature Selection</i> (Seleção de Atributos baseada em Correlação)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAP	Diâmetro a altura do peito
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
FOM	Floresta Ombrófila Mista
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	Índice de Vegetação
MDS	Modelo Digital de Superfície
DTM	Modelo Digital de Terreno
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MSI	MultiSpectral Instrument
ND	Números Digitais
NDVI	<i>Normalized Vegetation Difference Index</i> (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)
NIR	<i>Near infrared</i> (Infravermelho próximo)
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PPC	<i>Photogrametric Points Cloud</i> (Nuvem de pontos fotogramétricos)
REM	Radiação Eletromagnética
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
SC	Estado de Santa Catarina
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados

UTM	Universal Transversa de Mercator
WEKA	<i>Waikato Environment for Knowledge Analysis</i> (Ambiente Waikato para Análise do Conhecimento)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA VEGETAÇÃO	25
3.1.1 Biodiversidade	25
3.1.2 Monitoramento e avaliação do processo de restauração da vegetação nativa	27
3.1.3 Índices de diversidade	29
3.2 SENSORIAMENTO REMOTO	31
3.2.1 Comportamento espectral da vegetação	33
3.2.2 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)	36
3.2.3 Modelos Digitais	39
3.2.4 Índices de Vegetação	41
4. MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1 MATERIAIS	43
4.2 DESCRIÇÃO DA ÁREA	43
4.3 RECOBRIMENTO AÉREO	45
4.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS AÉREAS	46
4.5 FILTRAGEM DA NUVEM Densa DE PONTOS	48
4.6. PARÂMETROS ECOLÓGICOS	50
4.6.1. Classificação de estágio de sucessão	50
4.6.2. Contagem automática de morfoespécies	53
4.7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 GERAÇÃO DOS PRODUTOS FOTOGRAFÉTRICOS	61
5.2 FILTRAGEM DA NUVEM Densa DE PONTOS	62
5.3 CLASSIFICAÇÃO DE ESTÁGIO DE SUCESSÃO	66
5.4 CONTAGEM AUTOMÁTICA DE MORFOESPÉCIES	70
6 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE I	97
APÊNDICE II	99
APÊNDICE III	105
APÊNDICE IV	107

1. INTRODUÇÃO

Uma informação útil para a preservação da biodiversidade é o entendimento da dinâmica espaço-temporal da comunidade ecológica (BERVEGLIERI et al, 2016). Assim, se faz necessária a definição de técnicas para a obtenção de dados dos fragmentos naturais e metodologias para seu monitoramento.

Há diversas técnicas de restauração florestal que tem como fundamento o conhecimento da estrutura de florestas naturais, onde os processos de sucessão são recriados e a heterogeneidade de espécies é tida como prioridade (BARBOSA, 2004). Engel e Parrota (2008) listam como principais chaves para o sucesso da restauração ecológica: a) definição clara dos objetivos b) conhecimento do ecossistema a ser restaurado, c) identificação das barreiras ecológicas que diminuem a resiliência do ecossistema e d) a integração entre o projeto de restauração e o desenvolvimento rural. Para o grupo Lago Azul a importância de se ter o conhecimento da estrutura florestal é para um melhor monitoramento da restauração de suas áreas de preservação permanente.

Para avaliar a eficácia das técnicas de restauração florestal adotadas, são necessárias avaliações periódicas. Além de se tratar de técnicas relativamente recentes, as avaliações quanto ao andamento da restauração não ocorrem com a frequência recomendada (SILVEIRA; DURIGAN, 2004; PULITANO; DURIGAN; DIAS, 2004, SOUZA; BATISTA, 2004; MELO; DURIGAN, 2007).

Desta forma, o desenvolvimento de metodologias para o monitoramento de áreas em restauração permite avaliar quantitativamente e qualitativamente esses locais. Tais informações podem subsidiar estudos de fitossociologia, florística, recuperação, educação, proteção e fiscalização ambiental, além do estabelecimento de áreas prioritárias para conservação, entre outros (AMARAL et al., 2009). Podem servir também como base para averbações e adequações de propriedades rurais como, por exemplo, demarcação e monitoramento de áreas de preservação permanente (APP) e de reserva legal (RL).

Assim, o mapeamento e a classificação dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, e seus estágios de sucessão ecológica, estrutura, distribuição e evolução temporal, consistem em uma etapa fundamental para implantação de diversos estudos, ações de fiscalização e manejo ambiental (RIBEIRO et al. 2009).

No entanto, os métodos de mapeamento da sucessão vegetal através de trabalhos de campo são dispendiosos em diferentes aspectos. Os custos financeiros finais normalmente são elevados e os intervalos de tempo entre os mapeamentos geralmente são longos e irregulares

(ANDRESEN et al., 2007). Surge então uma demanda de investigação de novas técnicas e metodologias, que sejam eficientes no mapeamento da cobertura vegetal, podendo ser fundida às técnicas tradicionais de inventário em campo (CINTRA, 2007).

Neste contexto, o Grupo Lago Azul encontra dificuldade na obtenção de variáveis ecológicas, das áreas englobadas em projetos de seus contratantes pela metodologia tradicional, pelos motivos anteriormente citados (atividade que requer tempo, trabalhadores a campo, etc). O Grupo Lago Azul é especializado na prestação de serviços socioambientais que oferece ao mercado soluções em gestão, fiscalização e execução de programas relacionados ao processo de licenciamento ambiental em suas diferentes etapas.

Dessa forma, as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) têm se destacado, no mapeamento e obtenção de informações de grandes e pequenas extensões geográficas, assim como em locais de difícil acesso. Estas técnicas são viáveis e menos custosas que os trabalhos a campo (JANOTH et al., 2007; BARBIER et al., 2011).

As imagens provenientes de sensores ópticos possuem características únicas quanto à resolução radiométrica, espectral, espacial e temporal e têm se tornado fontes primárias para classificação da cobertura da terra e da vegetação em diversas escalas (Lu e Weng 2007, Lu et al. 2014).

Porém, segundo Pinho (2005), a utilização de imagens com alta resolução espacial, como é o caso das imagens obtidas por VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), impõe novos desafios para a classificação automática de uso e cobertura da terra.

Assim, com dados oriundos de sensores remotos, pretendem-se desenvolver metodologias para a extração dessas variáveis ecológicas para auxiliar no monitoramento de áreas em processo de restauração.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver metodologias para a extração de variáveis ecológicas da Floresta Ombrófila Mista (FOM) empregando dados remotamente situados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar a literatura acerca da obtenção de dados ecológicos utilizando ferramentas de Sensoriamento Remoto;
- Identificar as métricas geradas a partir de dados de sensores remotos que possibilitem o monitoramento da vegetação;
- Aprimorar metodologias para a extração de dados oriundos de imagens de altíssima resolução espacial;
- Extrair o estágio de sucessão das áreas florestais avaliadas de forma automática;
- Determinar automaticamente o número de morfoespécies florestais presentes no dossel superior das áreas analisadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA VEGETAÇÃO

3.1.1 Biodiversidade

O Brasil é o país com maior diversidade de espécies no mundo, distribuídas nos seis biomas terrestres e nos três grandes ecossistemas marinhos sendo mais de 103.870 espécies animais e 43.020 espécies vegetais conhecidas no país (MMA, 2019).

O Bioma Mata Atlântica, um dos seis existentes no país, envolve uma área de 1,3 milhões de km², abrangendo 17 Estados (MMA, 2010). Atualmente, os remanescentes da vegetação nativa pertencentes a este bioma foram reduzidos a cerca de 29% de sua cobertura original (MMA, 2019).

A importância da conservação da biodiversidade é evidenciada quando depara-se com o aumento no número de acordos, tratados e ações desenvolvidas com este fim, tendo como exemplo, as 20 Metas de Aichi de Biodiversidade no Plano Estratégico para a Biodiversidade promovido pela Convenção da Diversidade Biológica (CDB, 2010), o PROVEG (2017), além de ações desenvolvidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2004 como o DETER (Detecção do Desmatamento em Tempo Real) que tem como objetivo o monitoramento do desmatamento e demais alterações na cobertura florestal em prol da biodiversidade na Amazônia, entre outros.

Assim, tendo em vista que o uso inadequado de ambientes naturais é a principal causa de perda de biodiversidade (CDB, 2005), tem-se como resposta, a restauração de ecossistemas, consequentemente há uma crescente demanda pela implementação e desenvolvimento de mais projetos com intuito de auxiliar a restauração de áreas degradadas e seu monitoramento.

Neste sentido, Sevegnani et al., (2012) afirmam que a classificação da vegetação em estágios de sucessão na Mata Atlântica ganhou importância para o licenciamento e fiscalização a partir do momento em que a modalidade de uso e norma para a supressão da vegetação foram regulamentadas pela legislação de forma diferente de acordo com o estágio sucessional. A Tabela 1 demonstra as legislações acerca do estágio de sucessão da vegetação.

Tabela 1- Legislações federais que dispõem sobre os estágios sucessionais da vegetação.

Legislação	Descrição
Resolução CONAMA 10/1993 (BRASIL, 1993):	Estabelece os parâmetros básicos para análise dos estágios de sucessão da Mata Atlântica.
Resolução CONAMA 04/1994 (BRASIL, 1994)	Define vegetação primária e secundária nos estágios inicial, médio e avançado de regeneração da Mata Atlântica, a fim de orientar os procedimentos de licenciamento de atividades florestais em Santa Catarina.
Lei 11.428/2006 (BRASIL, 2006)	Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Essa Lei coloca em seu Art. 8º que o corte, a supressão e a exploração da vegetação do Bioma Mata Atlântica far-se-ão de maneira diferenciada, conforme se trate de vegetação primária ou secundária, nesta última levando-se em conta o estágio de regeneração.
Resolução CONAMA 388/2007 (BRASIL, 2007)	Dispõe sobre a convalidação das Resoluções que definem a vegetação primária e secundária nos estágios inicial, médio e avançado de regeneração da Mata Atlântica para fins do disposto no art. 4º § 1º da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006.
Decreto nº 6.660/2008 (BRASIL, 2008)	Regulamenta dispositivos da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica.

Fonte- SOTHE (2015).

A Resolução CONAMA nº 04/1994 (BRASIL, 1994) determina a observação de um conjunto de critérios e indicadores qualitativos e quantitativos (estruturais) para a caracterização da vegetação primária e secundária nos estágios inicial, médio e avançado de regeneração:

- A) Estágio inicial de regeneração: Nesse estágio a área basal média é de até 8 m²/ha, com fisionomia herbáceo/arbustiva de porte baixo (altura total média de até 4 m), com cobertura vegetal variando de fechada a aberta; espécies lenhosas com distribuição diamétrica de pequena amplitude (Diâmetro a Altura do Peito - DAP médio de até 8 cm); diversidade biológica variável com poucas espécies arbóreas podendo apresentar plântulas de espécies características de outros estágios; abundância de espécies pioneiras, ausência de sub-bosque.
- B) Estágio médio de regeneração: Nesse estágio a área basal média é de até 15 m²/ha com fisionomia arbórea e arbustiva predominando sobre a herbácea podendo constituir diferentes estratos (altura total média de até 12 m); cobertura arbórea variado de aberta a fechada, com ocorrência eventual de indivíduos emergentes; a distribuição diamétrica com uma amplitude moderada, com predominância de pequenos diâmetros (DAP médio de até 15 cm), diversidade biológica significativa e com a presença de sub-bosque.

C) Estágio avançado de regeneração: Nesse estágio da vegetação a área basal média é de até 20,00 m²/ha, com fisionomia arbórea dominante sobre as demais, formando um dossel fechado e relativamente uniforme (altura total média de até 20 m); espécies emergentes ocorrendo com grau de intensidade variável; copas superiores horizontais amplas; distribuição diamétrica de grande amplitude (DAP médio de até 25 cm), serapilheira abundante; alta diversidade biológica podendo apresentar semelhança à fisionomia da vegetação primária, o sub-bosque normalmente menos expressivo que no estágio médio.

3.1.2 Monitoramento e avaliação do processo de restauração da vegetação nativa

Para avaliar as áreas em processo de restauração diversos atributos foram propostos (BRANCALION *et al.*, 2012; MÔNICO, 2012), porém os principais critérios utilizados atualmente são: a estrutura da vegetação, diversidade, indícios de regeneração natural além de processos ecológicos (RODRIGUES; GANDOLFI, 2000; MÔNICO, 2012; WORTLEY; HERO; HOWES, 2013).

Ainda quanto a avaliação, é de extrema importância que se empregue indicadores que avaliem não só a ocupação gradativa e crescente da área pela vegetação nativa, como também a distribuição das espécies desses indivíduos em grupos funcionais (BOENI, 2015).

Devido às dificuldades de se analisar todas as espécies e cada uma de suas funções no ambiente, agrupar as espécies quanto as suas características funcionais é a saída para se compreender as suas relações com o ambiente onde elas se encontram distribuídas (VALE, *et al.*, 2011). Para a formação de grupos funcionais é possível reagrupar as espécies de acordo com características semelhantes (MÉDAIL *et al.* 1998), como formato de copa, porte, tipo de folhas, entre outras. No entanto, as plantas possuem diversos atributos capazes de serem utilizados na busca de grupos funcionais (PENDRY *et al.* 2007).

Em ecossistemas florestais, os grupos funcionais são definidos por Hopper e Vitousek (1997) como agrupamento de espécies que compartilham semelhanças morfológicas e anatômicas, fisiológicas, estruturais ou qualquer outro tratamento relevante para o controle de processos ecossistêmicos, sendo que a escolha do grupo vai de acordo com o objetivo de pesquisa de cada autor.

Um traço funcional ainda pode ser definido como qualquer característica morfológica, fisiológica ou fenológica mensurável de um indivíduo, afetando de forma indireta a eficácia

biológica por meio de seus efeitos sobre crescimento, reprodução e sobrevivência (VIOLE et al. 2007).

De acordo com Silva Jr *et al.* (2004) o estrato da regeneração é outro indicador de grande importância quando se trata de monitoramento, uma vez que responde ao processo dinâmico da sucessão, representando a reserva potencial de indivíduos dentro da comunidade.

A sucessão ecológica é umas das teorias em que a restauração florestal se baseia, sendo um processo natural em que o ecossistema se recupera de alterações geralmente antrópicas. Assim, Odum (1988) afirma que quando o processo de formação de uma comunidade acontece em um substrato parcialmente desocupado, este é denominado de sucessão primária, enquanto o substrato que se desenvolve em uma área anteriormente ocupada por uma comunidade é denominado sucessão secundária (Figura 1).

Budowsky (1965) apresentou critérios para a classificação em grupos ecológicos ou de sucessão: pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax, como mostrado na Figura 1.

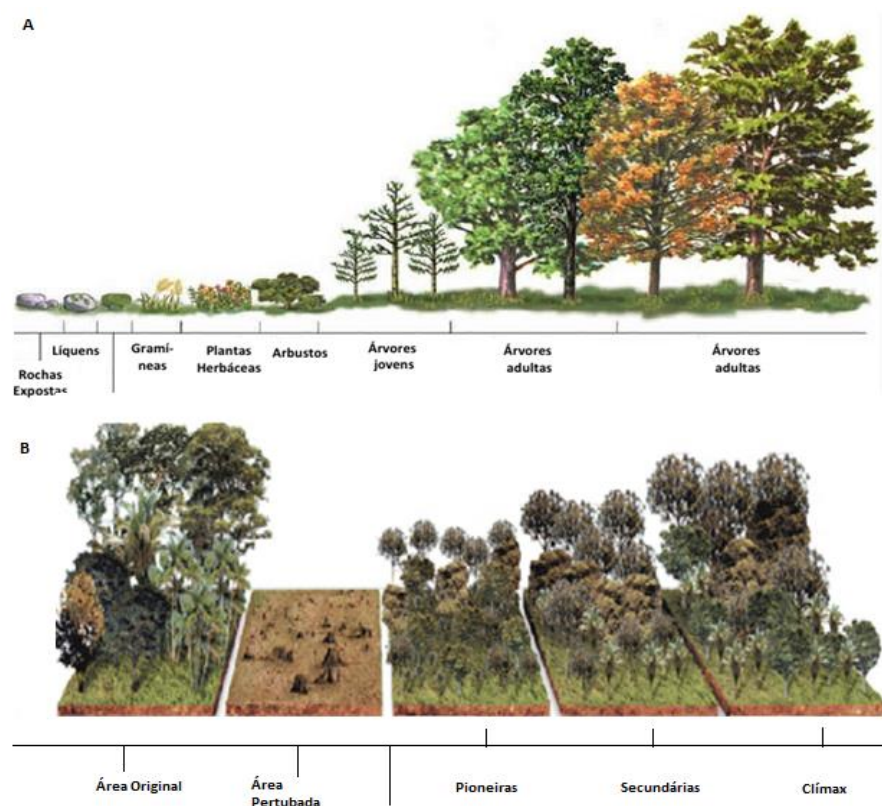


Figura 1- 1A: Demonstração de uma sucessão primária. 1B: Demonstração de sucessão secundária e os grupos de sucessão.

Fonte: Adaptado de FUNVERDE, 2020.

Alguns autores estudando a dinâmica de comunidades arbóreas classificaram as espécies de acordo com o seu grau de tolerância à sombra e fase de regeneração. Existem também estudos em que os autores fazem a separação das árvores pela forma da copa (ALVES; SANTOS, 2002) ou até mesmo pelo índice de iluminação de copa (KEELING; PHILLIPS, 2007).

Outros indicadores a serem considerados, segundo a Resolução da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo - SMA-SP 32/14, no monitoramento de áreas degradadas são: cobertura vegetal, densidade de indivíduos nativos regenerantes e número de espécies nativas regenerantes, de acordo com o tipo de vegetação, conforme explanado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2- Indicadores e valores utilizados em cada tipo de vegetação para atestar recomposição.

	Cobertura Vegetal (%)	Densidade de indivíduos regenerantes	Número de espécies nativas regenerantes
Florestas Ombrófilas e Estacionais	Acima de 80	Acima de 3.000	Acima de 30
Restinga Florestal	Acima de 80	Acima de 3.000	Acima de 30
Mata Ciliar em regiões de Cerrado	Acima de 80	Acima de 3.000	Acima de 30
Cerradão ou Cerrado stricto sensu	Acima de 80	Acima de 3.000	Acima de 30
Manguezal	Acima de 80		
Formações abertas e campestres no bioma Mata Atlântica*	Acima de 80		
Formações abertas no Bioma Cerrado**	Acima de 80		

*(Campos de Altitude; Restinga não - florestal).

** (Campo Cerrado, Campo Sujo, Campo Limpo ou Campo Úmido).

Fonte: Adaptado de Resolução SMA-SP 32/14.

Outra forma comumente utilizada para se qualificar uma formação vegetal seria por meio de índices de diversidade. Geralmente, estes índices consistem em equações matemáticas simples que relacionam a abundância relativa de cada espécie na amostra utilizada.

3.1.3 Índices de diversidade

Ter conhecimento da diversidade de espécies em uma área é fundamental para a compreensão do estado ecológico, consequentemente, possibilita a otimização do gerenciamento da área quanto as atividades de exploração, conservação de recursos naturais ou até mesmo quanto a recuperação de áreas degradadas (MELO, 2008).

Para se medir a diversidade, a forma usual considera a riqueza de espécies, que consiste basicamente na contagem de espécies encontradas em uma determinada área ou comunidade (WILSEY, *et al.*, 2005).

Outra forma comumente utilizada para se quantificar a diversidade seria por meio do uso de índices de diversidade. Citam-se os: Índice de Shannon-Weaver (1), Índice de Simpson (2), série de Hill que seria a unificação de índices de diversidade, entre outros.

Índice de Shannon-weaver

$$H' = \frac{\left[N \ln(N) - \sum_{i=1}^S n_i \ln(n_i) \right]}{N} \quad (1)$$

Onde:

H'= Índice de Shannon-Weaver

n_i = Número de indivíduos amostrados da i-ésima espécie.

N= número total de indivíduos amostrados.

S= número total de espécies amostradas.

ln= logaritmo de base neperiana.

Índice de Simpson

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (2)$$

Onde:

C= índice de dominância de Simpson;

n_i = número de indivíduos amostrados da i-ésima espécie;

N= número total de indivíduos amostrados.

Trabalhos como de Dias (2004), Melo (2008) e Lima *et al.* (2016), foram desenvolvidos com o intuito de auxiliar os pesquisadores na escolha do índice a ser utilizado de acordo com o objetivo de pesquisa.

Quanto a estudos desenvolvidos com enfoque de conservação, Ricotta (2005) afirma que índices de biodiversidade seriam mais indicados já que consideram além da riqueza de

espécies e equalibilidade, as distâncias ou diferenças entre espécies, quanto a morfologia, funcionalidade e a filogenética.

Neste sentido, tem sido proposto por pesquisadores uso do Sensoriamento Remoto (SR) como ferramenta de suporte para aquisição de informações acerca da vegetação (JANOTH et al. 2007; ADAM et al. 2014), devido a facilidade de obtenção de informações tradicionalmente obtidas a campo que demandariam a utilização de um esforço considerável para a obtenção das métricas necessárias.

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) é a ciência que permite obter informações da superfície ou alvos terrestres por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície através de sensores instalados em plataformas terrestres, orbitais ou aéreas (FLORENZANO, 2002; ANDRADE, 2011; MENESES e ALMEIDA, 2012). Este ainda envolve a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética (REM) emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores terrestres a bordo de plataformas aerotransportadas ou orbitais (NOVO, 2010.)

A radiação solar é do tipo eletromagnética (REM), constituída por ondas com diversas características físicas (FITZ, 2008). A REM é caracterizada como uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir da sua interação com o alvo, desta forma, a informação é transferida do objeto ao sensor (NOVO, 2010). Ela pode ser obtida por fontes naturais e artificiais (ROSA, 2009).

A intensidade da radiação refletida pode ser registrada sob diferentes formas e níveis de coleta de dados, como em laboratório, em campo, a bordo de aeronaves (aerotransportado) e a bordo de satélites artificiais (orbital) (PONZONI *et al.*, 2012). Ainda segundo Florenzano (2002) os sensores podem ser embarcados em diferentes plataformas, de forma que a distância do sensor em relação ao alvo pode ser classificada conforme os níveis de altitude: orbital, aéreo ou terrestre (Figura 2).

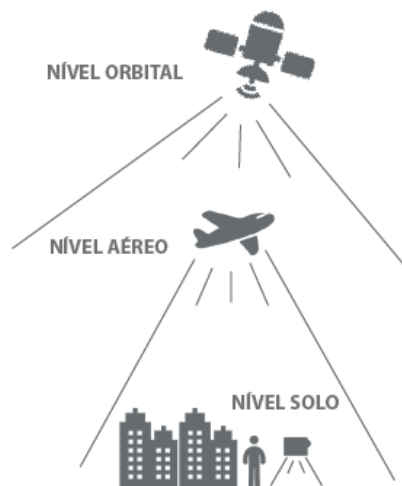


Figura 2- Classificação do Sensoriamento Remoto quanto a Plataforma.
Fonte: Barros (2018).

Para qualquer estudo envolvendo dados ou imagens de SR, compreender o processo envolvido com a energia radiante dos objetos é importante. Figueiredo (2005), afirma que a radiação eletromagnética (REM) conduz informações intrínsecas dos objetos. Assim, as principais medidas radiométricas são a irradiância, radiância, absortância, refletância e transmitância (NOVO, 2010).

A luz pode ser classificada em faixas de comprimento de onda (Figura 3). Assim, a cor que é enxergada do objeto na verdade é o comprimento de onda refletido do material constituinte (PETEAN, 2015). Por exemplo, uma folha verde absorve o vermelho e azul (síntese aditiva), entretanto, é na faixa do infravermelho próximo que a vegetação reflete mais energia e se diferencia dos demais objetos (FLORENZANO, 2013).

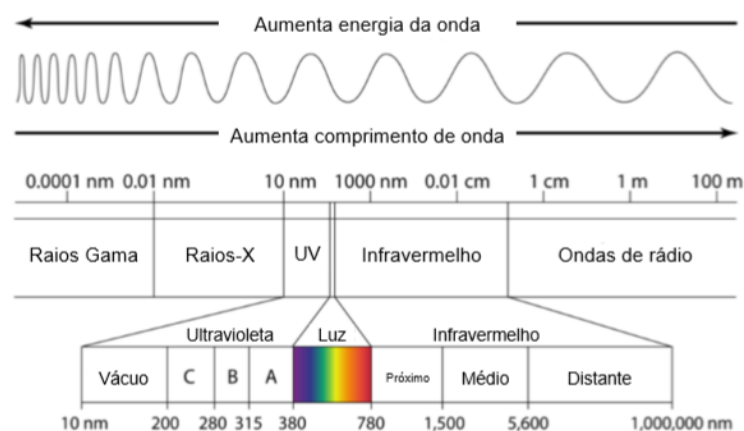


Figura 3- Detalhamento das cores e comprimentos de ondas do Espectro eletromagnético.
Fonte- Adaptado de Armstrong (2015)

3.2.1 Comportamento espectral da vegetação

A luz incidente na folha pode resultar em três processos distintos, como citado anteriormente (NOVO, 2010) a folha pode: refletir, absorver ou transmitir a REM, em proporções diferentes de acordo com propriedades fisiológicas e estruturais. Tais características permitem diferenciar grupos funcionais, até espécies de vegetais, sendo empregado como parâmetro de estudos em SR. As plantas absorvem luz em bandas específicas do espectro visível (chamada de Região da Radiação Fotossinteticamente Ativa) de acordo com os fotorreceptores associados a um processo fisiológico específico, tal como a fotossíntese (FIGURA 4). (PETEAN, 2015).

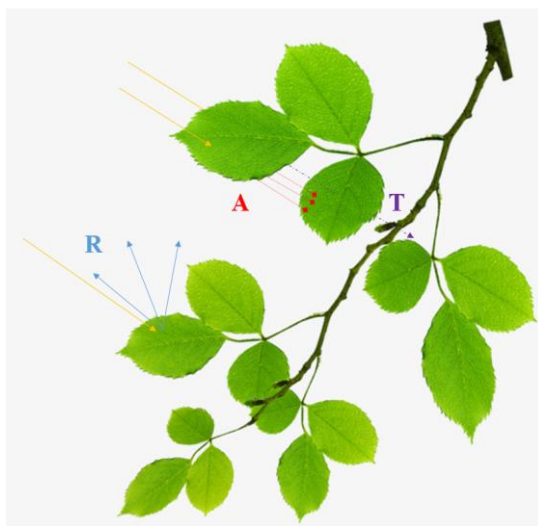


Figura 4- A imagem exemplifica as diferentes formas de interação da radiação eletromagnética incidente (I) na folha: Absorção (A), Transmissão (T) e Reflexão (R).

Fonte- Adaptado de DepositPhotos, 2019.

De acordo com Streit *et al.* (2005), para realizar a fotossíntese, a planta utiliza somente uma parte da REM, denominada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA, ou PAR, do inglês *Photosynthetically Active Radiation*) a chamada “luz visível”. Esta absorção varia de acordo com os fotorreceptores associados a um processo fisiológico específico, como por exemplo a fotossíntese. Este processo pode ser observado na Figura 5.

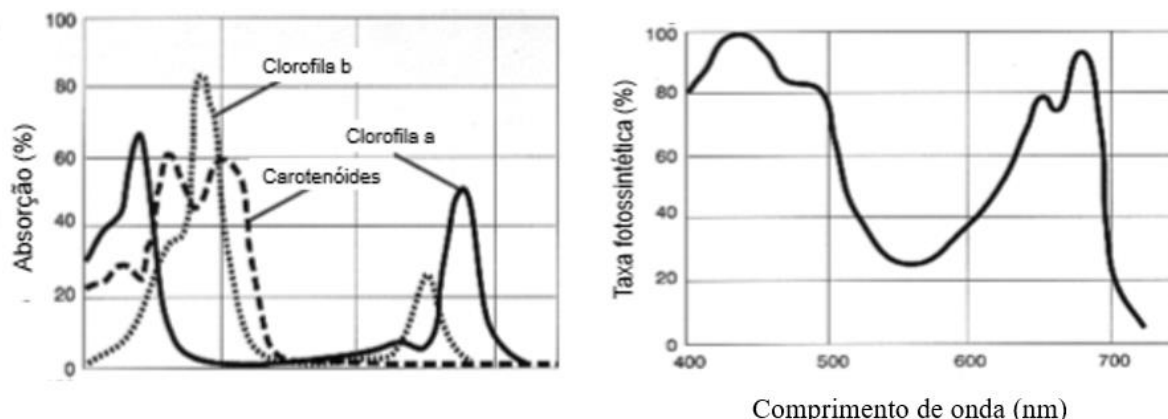


Figura 5- Superior: Espectro de absorção das clorofilas a e b e de carotenóides em função do comprimento de onda, entre 400-700nm. Inferior: Taxa fotossintética relativa, dentro da mesma banda espectral.

Fonte - GOVINDJEE e WHITMARSH, 1982.

A região do visível (VIS) abrange o intervalo entre 0,4 a 0,7 μm do espectro eletromagnético. O comportamento da vegetação nesta região é representado pela alta absorção da radiação incidente e baixa refletância, em função dos pigmentos fotossintéticos que há nas folhas (clorofila, xantofila, carotenóides) (SHIMABURUKO, et al., 1998; JENSEN, 2000; FLORENZADO, 2007;).

A região do infravermelho próximo (NIR) abrange o intervalo espectral entre 0,7 a 1,3 μm , nesta faixa Ponzoni e Shimabukuro (2012) afirmam ocorrer a maior reflexão da REM. Isso se dá em decorrência da relação dos índices de refração do conteúdo celular e do espaço intercelular, que acarretam reflexões e refrações da REM no interior da folha (KNIPLING, 1970; SHIMABURUKO, et al., 1998).

Por fim, a faixa do infravermelho médio (*Short-wavelength infrared* - SWIR), encontra-se no intervalo de 1,3 a 2,6 μm do espectro eletromagnético. Nesta faixa, a refletância das folhas diminui devido às fortes bandas de absorção da água (LILLESAND; KIEFER, 1999). Neste comprimento de onda, o conteúdo de água da folha e a refletância são inversamente proporcionais (SOUSA, 1997; PONZONI, et al., 2012).

O comportamento espectral da vegetação nas faixas do espectro eletromagnético resulta em uma curva de refletância específica como ilustrado na Figura 6.

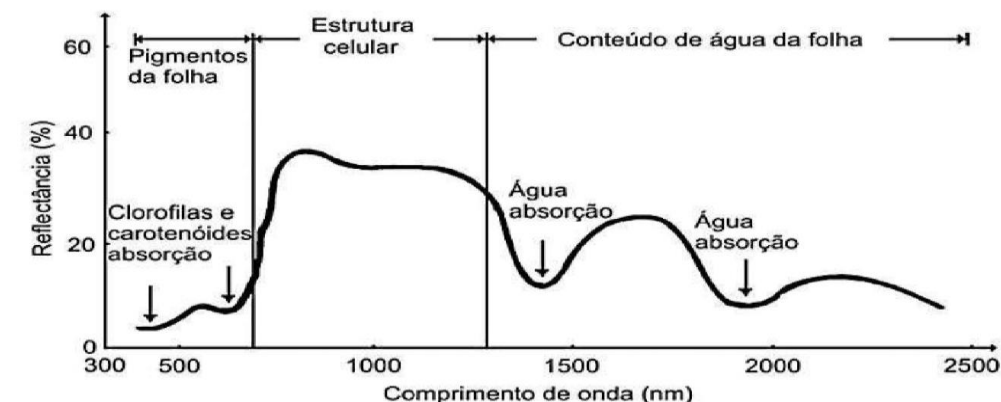


Figura 6- Curva de refletância espectral típica de uma folha verde e sadia.
Fonte- Ponzoni *et al.*, 2012.

A resposta espectral das plantas irá variar conforme as propriedades botânicas específicas. A espessura da folha é um exemplo significativo disso, já que influencia no conteúdo de pigmentos e estrutura fisiológica. Quanto mais grossa for a folha, menor será a transmissão e maior a absorção da REM (CURRAN, 1986).

O comportamento espectral da vegetação é considerado por Richards e Jia (1999), mais complexo do que o solo e da água, por poder apresentar diferentes comportamentos e na mesma espécie em função da morfologia, a fisiologia e o teor de umidade das folhas (OLIVEIRA, 1998). Podem ocorrer variações em relação às partes da árvore expostas à luz solar (HOWARD, 1991).

Moreira (2001) apresenta outros fatores que influenciam nessa diferença de comportamento, como o estágio fenológico, os aspectos sanitários e as condições climáticas. Pesquisas recentes ainda demonstram a diferença no comportamento quanto ao estágio de sucessão (SOTHE, 2015; PINTO, 2018) e idade do povoamento (ANDRADE, 2019).

Desta forma, estudos estabelecem relação lineares entre diversidade de espécies e a produtividade dos ecossistemas, com a implicação de que a perda da biodiversidade possa levar à perda ou diminuição de bens ou serviços ecossistêmicos (CHAPIN, *et al.*, 2000; VIHERRAARA, *et al.*, 2014).

Neste sentido, vem sendo realizados estudos que combinam dados obtidos por SR e dados de inventário coletados de forma convencional a fim de determinar as distribuições espaciais e temporais da biodiversidade (FOODY; CULTER, 2003; WILFONG *et al.*, 2009). O objetivo destes estudos é a elaborar metodologias de monitoramento da biodiversidade em escala regional e até global para superar limitações das metodologias tradicionais (YOCCOZ, *et al.*, 2001; HAN *et al.*, 2014).

3.2.2 Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)

Como alternativa às imagens provenientes de sensores orbitais ou de aeronaves tripuladas tem-se os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). De acordo com Hakala et al. (2010) os aerolevantamentos com essa tecnologia são mais flexíveis, além de possuírem uma resolução espacial ultra alta, baixo custo de aquisição e possibilidade de imagens aéreas sem obstáculos (AMORIM, et al., 2012).

De acordo com o Departamento de Defesa Norte Americano (DoD, 2005) os VANT são definidos como:

Veículo aéreo motorizado que não transporta operador humano, utilizam forças aerodinâmicas para se elevar, podem voar de forma autônoma ou ser pilotado remotamente, podem ser dispensáveis ou recuperáveis, e podem transportar carga bélicas ou não bélicas. Veículos balísticos ou não balísticos como mísseis de cruzeiro e projéteis de artilharia não são considerados veículos aéreos não tripulados (DOD, 2005).

De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), (2015) Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) são aeronaves projetadas para operações sem pilotos a bordo e que não sejam utilizadas para fins meramente recreativos. Em inglês, esses veículos são denominados como *Unmanned Aerial Vehicles/Systems* (UAV/UAS). Estas podem ser denominadas como RPA (Aeronaves Remotamente Pilotadas), ou ainda como Drones.

Mais recentemente Bahardwaj *et al.* (2016) definiram os VANT como um sistema composto por um segmento terrestre capaz de controlar remotamente um voo e por um segmento aéreo que consiste em um veículo aéreo não tripulado com sensores remotos, para a captura de dados sobre o terreno.

A classificação das plataformas VANT para emprego militar caracterizam-se em função de atributos como altura e duração do voo, tamanho das aeronaves, entre outras (WATTS *et al.*, 2012). Na Figura 7 são apresentadas as nomenclaturas e um esquema da designação dos VANT em concordância com a nomenclatura militar.

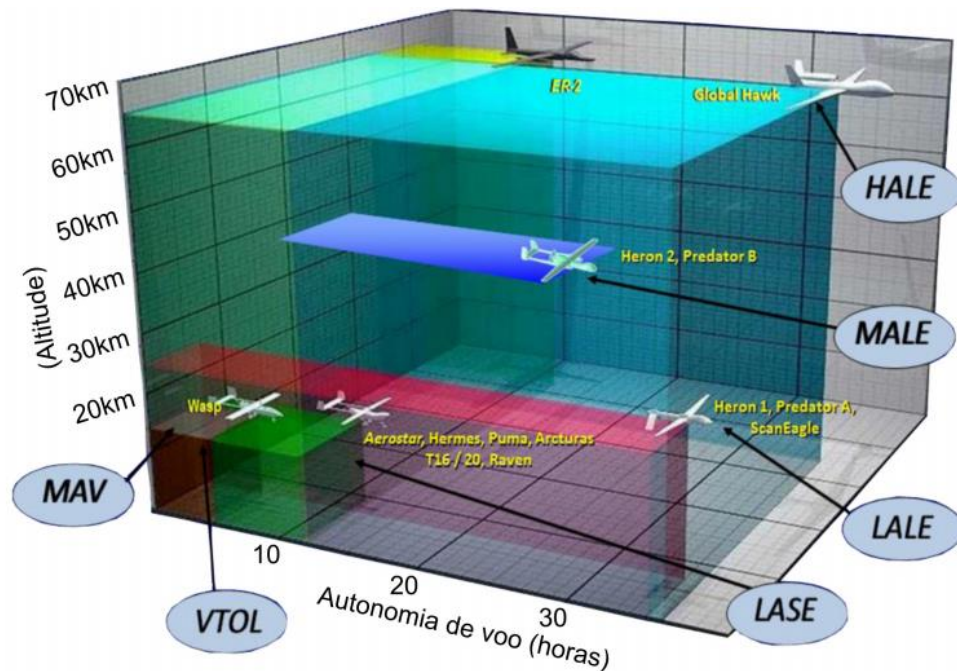


Figura 7- Nomenclatura dos VANTs com suas respectivas alturas de voo e duração em horas.

Fonte- Adaptado de Watts (2012).

1. MAV (Micro (ou Miniature) ou NAV (Nano) Air Vehicles)
2. VTOL (Vertical Take-Off; Landing);
3. LASE (Low Altitude, Short-Endurance);
4. LASE Close;
5. LALE (Low Altitude, Long Endurance);
6. MALE (Medium Altitude, Long Endurance);
7. HALE (High Altitude, Long Endurance).

Quanto a essas classificações de plataformas, vale ressaltar que em SR e Aerofotogrametria são comumente utilizados VANT classificados nas categorias MAV, VTOL e LASE, devido a característica de menores custos para a obtenção das imagens, além de sua maior facilidade de manuseio (RUIZ, 2015). Neste estudo o VANT utilizado é classificado como VTOLE e LASE.

Os VANT usualmente voam a alturas entre 10 e 200 metros para adquirir dados de SR (OLLERO; MERINO, 2006; HUANG et al., 2018). Esse tipo de aquisição de dados é conhecido como LARS (*Low Altitude Remote Sensing*) (SABERIOON et al., 2014). Para este tipo de voo, a maioria dos VANT, são de asa fixa ou rotativa e com baixa carga (*payload*) e curta capacidade de duração de voo (SENTHILNATH, 2017). Estes sistemas podem voar entre 150 e 200 metros de altura do solo, embora a legislação vigente determina que os voos realizados devem ser feitos a uma altura de até 120 metros. Possuem restrição de cobertura de área devido a sua baixa altitude, porém são muito atrativos para grupos de pesquisa que envolvem pesquisas temáticas devido ao baixo custo e facilidade em adquirir dados (EVERAERTS, 2008).

Em comparação com plataformas tradicionais para a aquisição de dados de SR (satélites e aeronaves tripuladas), os VANT são mais eficazes quando usados para atender às necessidades de levantamentos altamente precisos em áreas de 1 a 10 km² (WHIETEHEAR, et al, 2014; DANDOIS, ELLIS, 2013). As imagens adquiridas por esses veículos possuem uma resolução espacial ao nível de centímetros e com possibilidade de não sofrer com a cobertura de nuvens (ZHANG; KOVACS, 2012). Ou a facilidade de se refazer o voo de imediato em caso de necessidade, diferentemente de quando se trabalha com imagens de satélite.

Atualmente, os VANT possuem as mais diversas áreas de aplicações, variando desde entrega de produtos (RODRIGUES, 2014), monitoramento de doenças e infestações de pragas (GARCIA-RUIZ et al., 2013; PERTILLE, 2019), monitoramento de impactos ambientais e incêndios (LONGHITANO, 2010; SOUZA, 2019), classificação do estágio sucessional da vegetação (SOTHE, 2015; PINTO, 2018).

Sothe (2019) apresenta aplicações para a classificação de espécies florestais utilizando ortoimagem proveniente de VANT e nuvem densa de pontos fotogramétricos (PPC), para classificação de 12 espécies.

Para Junior (2015), o VANT é uma excelente ferramenta de obtenção de imagens de ultra alta resolução espacial, e alta resolução temporal. Por isso, tem-se popularizado

o uso do mesmo, principalmente para a atualização e confecção de ortomosaicos digitais em áreas de difícil acesso ou áreas pequenas, onde o uso da Fotogrametria com aeronaves tripuladas torna-se a execução do trabalho economicamente inviável em alguns casos.

Em aplicações ambientais, os VANT se sobressaem devido a uma maior flexibilidade operacional e à possibilidade de adquirir dados de forma remota em momentos precisos no tempo e condições diversas de acessibilidade (WHITEHEAR, *et al.* 2014), dentre outras. Entretanto, tem-se restrições quanto a ventos e a chuva.

A atividade de aerolevantamento é regulada no Brasil pelo Decreto-Lei nº 1.177/1971, Decreto nº 2.278/1997 e Portaria nº 953/2014 do Ministério da Defesa (MD). Para a realização do aerolevantamento é necessário estar autorizado pelo MD, por meio de uma Autorização de Voo do Ministério da Defesa (AVOMD). Além da homologação da Anatel, só poderá operar um drone quem possuir uma autorização da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) ou o “Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE)”, que permite o uso de aeronaves apenas em operações experimentais sem fins lucrativos e sobre áreas pouco povoadas.

Os drones de uso comercial, corporativo ou experimental foram classificados pela ANAC, de acordo com o peso máximo de decolagem do equipamento conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Classificação dos VANT de acordo com o peso e suas exigências.

Classe	Peso máximo de decolagem	Exigências de aeronavegabilidade
Classe 1	Acima de 150 kg	A regulamentação prevê que equipamentos desse porte sejam submetidos a processo de certificação similar ao existente para as aeronaves tripuladas, promovendo ajustes dos requisitos de certificação ao caso concreto. Esses drones devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.
Classe 2	Acima de 25 kg e abaixo ou igual a 150 kg	O regulamento estabelece os requisitos técnicos que devem ser observados pelos fabricantes e determina que a aprovação de projeto ocorrerá apenas uma vez. Além disso, esses drones também devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula
Classe 3	Abaixo ou igual a 25 kg	A norma determina que as RPA Classe 3 que operem além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés (120m) deverão ser de um projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registrados e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. Drones dessa classe que operarem em até 400 pés (120m) acima da linha do solo e em linha de visada visual (operação VLOS) não precisarão ser de projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC por meio do sistema SISANT, apresentando informações sobre o operador e sobre o equipamento. Os drones com até 250g não precisam ser cadastrados ou registrados, independentemente de sua finalidade (uso recreativo ou não).

Fonte- ANAC (2017).

Quando se opta por utilizar um VANT, diferentes produtos podem ser gerados para a extração de informações: a nuvem densa de pontos, modelo digital de elevação (*Digital Elevation Model* -DEM) e o Ortomosaico. A partir destes produtos pode-se fazer a extração do Modelo Digital do Terreno (*Digital Terrain Model* – DTM) e o Modelo Digital de Altura de Copa (*Canopy Height Model* – CHM).

3.2.3 Modelos Digitais

Um Modelo Digital do Terreno (*Digital Terrain Model* – DTM) representa a topografia da superfície da terra “nua”; portanto, os pontos pertencentes aos objetos acima do solo devem ser removidos da nuvem de pontos para gerar um DTM, chamado de "filtragem de solo". A filtragem do solo é um processo desafiador, especialmente para áreas com topografias heterogêneas e mudanças bruscas (Meng et al. 2009).

Quando considerado os pontos pertencentes às edificações e vegetação, o modelo gerado é denominado Modelo Digital de Superfície (DSM) ou Modelo Digital de Elevação (DEM). Segundo Balasubramanian (2017) o DEM é a representação digital da elevação da superfície terrestre em relação a qualquer dado de referência. Este é frequentemente usado para se referir a qualquer representação digital de uma superfície topográfica. Possui aplicações como: determinar atributos do terreno, determinar elevação em qualquer ponto, declive e aspecto, etc.

O Modelo de Altura de Copa (CHM) é a altura dos objetos acima do solo. Pode ser obtido através da diferença dos dados provenientes do DTM e DEM (Figura 8). A fonte de dados para o cálculo do CHM pode ser: nuvem densa fotogramétrica (PPC), através de dados LiDAR, ou ainda utilizando dados Radar. Neste caso, o DEM que caracteriza o terreno e os objetos presentes da superfície, passam a ter informações somente referente aos objetos, já que o terreno é subtraído.

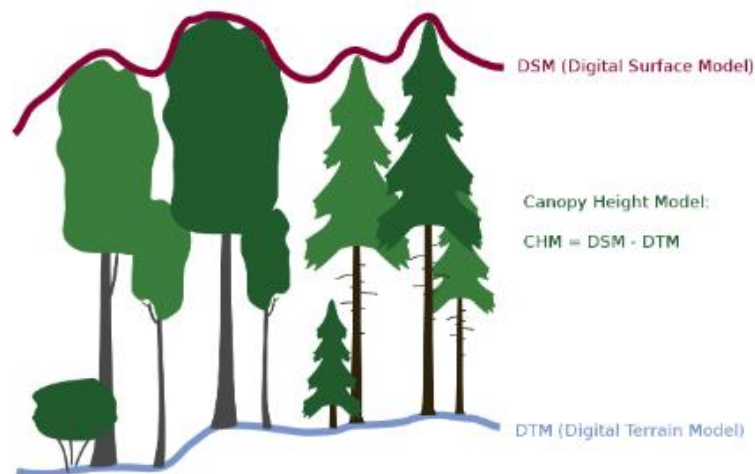


Figura 8- Representação do DSM, DTM e CHM.
Fonte- Lisein, et al (2012).

Para gerar os modelos digitais, a nuvem de pontos depende do processo denominado filtragem. O sucesso da filtragem de pontos depende de diversos fatores incluindo o relevo da área de estudo (YILMAZ; GUNDOR, 2016), tamanho dos objetos acima do solo (MENG *et al.*, 2010), declividade do terreno (VOSELMAN, 2000) e a densidade da nuvem de pontos (SITHOLE; VOSELMAN, 2004).

Por meio da filtragem de pontos torna-se possível a extração do CHM, subtraindo o DSM do DTM (WASER, et al 2008), que dará a informação quanto a estrutura vertical da floresta.

O CHM possibilita a extração de diversas informações, citam-se: quantificação de biomassa (LU et al., 2012), mapeamentos (SINGH et al., 2012), avaliação de mudanças na estrutura florestal (WASER et al., 2008), extração de variáveis dendrométricas (MONTAGHI et al., 2013), dentre outras.

3.2.4 Índices de Vegetação

Índices vegetativos derivados de dados remotamente situados têm sido empregados para identificar informações de interesse, como biomassa (NAKAI, 2016), ataque de pragas (PERTILLE, 2019), diferenciação de espécies (SOTHE, 2019), estágio de sucessão, (BERVEGLIERI, et al., 2016), entre outros.

O interesse por mensurar informações referentes a vegetação, a partir de dados qualitativos e quantitativos, e também dados espectrais resultaram em Índices de Vegetação (IV) (BANNARI *et al.*, 1995; FERREIRA *et al.*, 2008). Os índices de

vegetação são modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal e relacionam a assinatura espectral e os parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente (BARBOSA, 2006).

Os IVs são apontados como indicadores de crescimento e vigor da vegetação e podem ser utilizados para diversas finalidades como, diagnosticar parâmetros biofísicos os quais apresentam altas correlações incluindo o índice de área foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (PONZONI, 2001). Além da aplicação em monitoramento de mudança na vegetação em escala regional, continental e mundial (BANNARI, *et al.*, 1995 apud BARBOSA, 2006).

Na literatura são encontrados diversos índices de vegetação, sendo os mais comumente usados os que utilizam a informação contida nas refletâncias de dosséis referentes aos comprimentos de onda das regiões do vermelho e do infravermelho próximo.

Os índices de vegetação exploram o dinamismo de resposta espectral de acordo com a faixa em que se encontram, caracterizado por contrastes nos valores de refletância do visível e infravermelho (JACKSON; HUETE, 1991; MYNENI *et al.*, 1995).

Na região do visível, quanto maior for a densidade da cobertura vegetal em uma determinada área, menor será a refletância, devido à maior oferta de pigmentos fotossintetizantes. Por outro lado, maior será a refletância no infravermelho próximo, devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética nas diferentes camadas de folhas.

Assim, as análises da vegetação e detecção de mudanças são realizadas com o intuito de avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal. Consequentemente, a detecção qualitativa da vegetação verde é uma das principais aplicações do SR na tomada de decisões e gerenciamento ambiental do “alvo vegetação” (MARCUSSE *et al.*, 2010).

Sothe (2015) estudando identificação de estágio de sucessão com Sentinel-2 percebeu que ao adicionar o NIR houve uma melhor diferenciação. Enquanto Pinto (2018), utilizando imagens provenientes de VANT na faixa do VIS, ao adicionar o Índice TGI em sua composição teve uma melhor separação de cada estágio.

O Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation*

Index) (NDVI), é um dos IVs mais utilizado. Foi proposto por Rouse et al. (1973) e compara a refletância da radiação do vermelho (RED) com a refletância da radiação do NIR. Esse índice foi desenvolvido para diminuir os efeitos de diferença de iluminação, sombra, atenuação atmosférica e variação topográfica (HUETE et al., 2002). É um índice sensível a radiação fotossinteticamente ativa, sendo uma forma simples e confiável de mensurar o vigor da vegetação (THENKABAIL et al., 2002).

O Índice de Vegetação Realçado (*Enhanced Vegetation Index* - EVI), foi criado por Huete et al. (1997) para otimizar o sinal da vegetação em regiões de alta biomassa. Modificado por Jianget al. (2008), o Índice de Vegetação Realçado 2 (*Enhanced Vegetation Index 2* – EVI2), foi desenvolvido para sensores que não possuem a banda do azul.

Gitelson et al. (1996) examinaram imagens orbitais sobre áreas de vegetação adulta e áreas ocupadas por vegetação sob estado de senescência, objetivando avaliar taxas de concentração de pigmentações fotossinteticamente ativos e deficiências das vegetações. A partir dessa análise, os autores desenvolveram o Índice de Vegetação Verde da Diferença Normalizada (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) (GNDVI).