



Observatório de Tecnologias Espaciais

**Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 6, Número 1**

Radar de Abertura Sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) para satélites de pequeno porte



cgée

Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 6, Número 1

Radar de Abertura Sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*)
para satélites de pequeno porte

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

Projeto – Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE)

**Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 6, Número 1**

**Radar de Abertura Sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar)
para satélites de pequeno porte**



Brasília, DF
Dezembro, 2022

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI)

Presidente

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores

Ary Mergulhão Filho

Luiz Arnaldo Pereira da Cunha Junior

Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial. Ano 6, Número 1. Radar de Abertura Sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar) para satélites de pequeno porte. Projeto – Observatório de Tecnologias Espaciais – OTE. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2022.

81 p.: il.

1. Tecnologias espaciais. 2. Radar de Abertura Sintética. 3. SAR. 4. CubeSats. 5. CGEE.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

SCN Quadra 2 Bloco A

Edifício Corporate Financial Center salas 1102/1103

70712-900 - Brasília, DF

Telefone: (61) 3424.9600

<http://www.cgee.org.br>

Referência bibliográfica:

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE. **Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial. Radar de Abertura Sintética para satélites de pequeno porte.** Observatório de Tecnologias Espaciais - OTE. Brasília, DF:2022. (Ano 6, Número 1).

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos neste relatório poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.

Este relatório é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2º Contrato de Gestão CGEE – 38º Termo Aditivo/Projeto: Observatório de Tecnologias Espaciais – OTE – 8.10.56.01.50.01/MCTI/2022.

Projeto – Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE)

**Série Documentos Estratégicos para o Setor Espacial
Ano 6, Número 1**

**Radar de Abertura Sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar) para satélites
de pequeno porte**

Supervisão

Ary Mergulhão Filho

Equipe técnica do CGEE

Thyrso Villela Neto (Coordenador)

Alessandra de Moura Brandão

César Augusto Costa

Fernando Teixeira Bueno

Apoio administrativo

Genilda Carlos da Mota

Larissa Rocha

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	8
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. PRINCÍPIO RADAR	12
1.2. RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA	16
2. TECNOLOGIA SAR.....	24
2.1. PRINCÍPIOS DE SISTEMAS ESPACIAIS SAR	24
2.2. VANTAGENS, DESVANTAGENS E APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA SAR	26
2.3. GEOMETRIA SAR	37
2.4. MODOS DE IMAGEAMENTO.....	40
2.5. TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE IMAGENS SAR	43
2.6. ANÁLISE DE IMAGENS SAR.....	48
2.7. POLARIMETRIA	51
2.8. TECNOLOGIA INSAR.....	54
3. CUBESATS SAR.....	56
3.1. INTRODUÇÃO.....	56
3.2. CUBESATS SAR	56
4. PRINCIPAIS FONTES DE INFORMAÇÕES SOBRE SAR.....	58
4.1. REVISTAS CIENTÍFICAS E EVENTOS.....	58
4.2. MERCADOS.....	62

5. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	64
5.1. HORIZONTE PARA OS PRÓXIMOS ANOS	64
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	69
LISTA DE FIGURAS	74
LISTA DE TABELAS	77
LISTA DE ABREVIATURAS	78
ANEXO A – MISSÕES SAR	81
ANEXO B – DESIGNAÇÃO DAS BANDAS SAR	85
ANEXO C – PUBLICAÇÕES E EVENTOS RELEVANTES	87

APRESENTAÇÃO

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) desenvolveu um projeto denominado Observatório de Tecnologias Espaciais (OTE), que tem o propósito de acompanhar o desenvolvimento e a evolução de tecnologias do setor espacial no Brasil e no mundo.

O OTE tem como objetivo identificar tendências e oportunidades tecnológicas nesse setor e gerar informações sobre tecnologias consideradas relevantes para o Programa Espacial Brasileiro. As informações obtidas pelo OTE são compiladas em relatórios periódicos enviados ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e podem apoiar os tomadores de decisão no âmbito do Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (SINDAE), coordenado pela Agência Espacial Brasileira (AEB). Além disso, o OTE sugere ações que possam auxiliar processos de gestão tecnológica e de estabelecimento de estratégias de domínio tecnológico para o setor espacial brasileiro.

Resumidamente, o OTE utiliza o conceito de inteligência tecnológica para programar as suas observações e usa metodologias próprias ou adaptadas para auxiliar o processo de análise dessas observações, de forma a transformá-las em informações que possam ser úteis para os gestores tecnológicos do setor espacial brasileiro.

Um dos produtos do OTE é a série “Documentos Estratégicos para o Setor Espacial”, da qual o presente documento faz parte, que tem como objetivo fornecer informações sobre tópicos tecnológicos específicos, de forma a propiciar um entendimento mais aprofundado sobre temas de interesse para o Brasil no setor espacial.

No primeiro documento dessa série foi tratada uma categoria de satélites de pequeno porte, que são os nanosatélites conhecidos como CubeSats. O segundo documento dessa série foi dedicado a veículos lançadores de satélites de pequeno porte, mostrando um panorama sobre veículos lançadores no mundo. O terceiro documento dessa série tratou de sistemas de propulsão elétrica para satélites de pequeno porte. O quarto documento foi dedicado a sistemas de telecomunicações baseados em satélites de pequeno porte. Já no quinto documento foi tratado um

tópico relacionado ao segmento solo de satélites de pequeno porte, que são as estações portáteis para recepção de dados e controle desses artefatos.

O presente documento, o sexto dessa série, tem como objetivo apresentar informações sobre outra tecnologia de interesse nacional, que é radar de abertura sintética (SAR, da sigla em inglês para *Synthetic Aperture Radar*) para uso em satélites. Em particular, será mostrado o uso dessa tecnologia em satélites de pequeno porte. Essa tecnologia tem vários atrativos para o Brasil. Por exemplo, com satélites SAR é possível observar a superfície terrestre durante a noite, uma grande vantagem em relação a satélites que operam na faixa do visível do espectro eletromagnético.

De acordo com o relatório *Global Synthetic Aperture Radar Market (2021-2026)*, da Mordor Intelligence, o mercado global de SAR foi avaliado em USD 3,32 bilhões em 2020, e espera-se que chegue a USD 6,47 bilhões até 2026, registrando uma CAGR¹ de 11,6%, durante o período de 2021-2026.

Em 2021, o mercado espacial global foi avaliado em US\$ 388,50 bilhões e deve chegar a US\$ 540,75 bilhões até 2026, segundo a *Benchmark International (2022)*. O setor expandiu 70% entre 2010 e 2020, e espera-se que a economia espacial cresça a uma CAGR de 6,84% entre 2022 e 2026.

É previsto que indústria espacial alcance US\$ 1 trilhão em receita anual até o ano de 2040, com custos de lançamento reduzidos em até 95%. À medida que o custo de acesso ao espaço cai, as oportunidades de expansão e inovação aumentam. Prevê-se que o crescimento mais rápido venha de novas aplicações e indústrias espaciais.

A pandemia levou ao aumento da demanda por imagens de satélite, incluindo o estudo do impacto econômico do vírus e a realização de monitoramento remoto de instalações e infraestrutura.

¹ CAGR (*Compound Annual Growth Rate*), ou taxa de crescimento anual composta, é a taxa de retorno que é necessária para que um investimento parta de um valor inicial para um valor final esperado em um período estipulado. A CAGR é considerada um dos principais indicadores para analisar a viabilidade de um investimento.

A demanda cresceu a partir da indústria de petróleo e gás. Por exemplo, a Ursa Space Systems, que oferece dados e análises de satélite, observou o impacto da Covid-19 nos estoques globais de petróleo, pois a empresa fornece relatórios semanais sobre 11.000 tanques de armazenamento de petróleo, observados com satélites SAR.

No passado, os sistemas SAR eram usados para estudar a interação de ondas eletromagnéticas com a superfície da Terra. Nos últimos anos, o desenvolvimento de sistemas SAR multicanais permitiu o desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas para atividades de vigilância. O instrumento SAR fornece dados de alta resolução para vigilância sob várias condições meteorológicas.

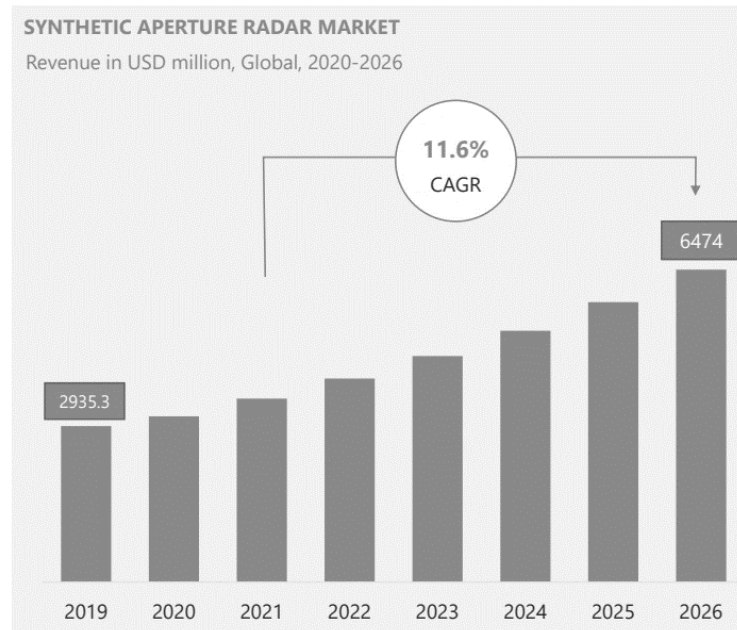
Esses sistemas estão sendo cada vez mais usados para visualizar superfícies oceânicas, embarcações, derramamentos de óleo e realizar atividades de vigilância, de mineração e petróleo, de exploração de campos, entre outros.

Apesar das várias vantagens oferecidas pelos sistemas SAR, eles ainda são uma tecnologia subutilizada em comparação com sistemas ópticos tradicionais.

Para contornar isso, o Departamento de Comércio e a Administração Nacional dos Oceanos e Atmosfera (NOAA) anunciaram o licenciamento de sistemas espaciais de sensoriamento remoto privado, que revisou os regulamentos para licenciar a operação de sistemas espaciais privados de sensoriamento remoto, no âmbito da Lei de Política de Sensoriamento de 1992, visando tornar os atores privados norte-americanos competitivos com seus homólogos.

Sendo a América do Norte um dos principais mercados, espera-se que tais regulamentações ajudem expandir ainda mais o mercado SAR. Espera-se que legislação semelhante de outros países ajude desenvolver provedores privados de dados SAR.

Na figura a seguir são mostrados os valores movimentados por aplicações SAR desde 2009, com previsão para até 2026. Em particular, é esperado uma CAGR de 11,6% entre 2021 e 2026, o que mostra a importância da tecnologia SAR para as aplicações espaciais.



SOURCE: Mordor Intelligence Analysis

Figura 1: Mercado de satélites SAR.

Fonte: Mordor Intelligence Analysis

Em vista do exposto, é clara a necessidade de domínio dessa tecnologia pelo Brasil. É com essa visão que o OTE confeccionou o presente documento. Com as informações disponibilizadas nele, o OTE espera contribuir para que projetos estratégicos brasileiros possam ser implementados tempestivamente, fazendo com o que o Brasil não perca oportunidades importantes nessa área tecnológica.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PRINCÍPIO RADAR

RADAR é um acrônimo do termo em inglês *RAdio Detection And Ranging* (Rádio detecção e localização). Em sua concepção básica, um radar é um sistema eletromagnético para detecção e localização de objetos. Esta concepção se mostrou interessante para fins militares nos primeiros anos de sua implementação.

Após o final da I Guerra Mundial, mais especificamente em 1920, países como os Estados Unidos, Grã-Bretanha, Itália, Japão e Alemanha envidaram esforços tecnológicos e passaram a desenvolver radares de forma independente. Já no período da II Guerra Mundial, de 1939 até 1945, os radares passaram a ser aplicados na detecção de aeronaves em voo e de navios (HUBER, 2013; WOODHOUSE, 2006). Somente após este segundo conflito global, o radar passou a ser empregado também para fins civis.

O funcionamento de um radar é baseado no princípio da ecolocalização, pelo qual um sinal é transmitido em direção à uma área de interesse, também referida como área a ser “iluminada”, “imageada”, ou “alvo”. Uma vez no alvo, o sinal sofre um processo físico denominado espalhamento (ou difração), no qual parte do sinal retorna ao sensor e outra parte é retro-espalhada em direções diferentes, conforme as propriedades geométricas e físicas dos alvos.

A distância ao alvo (ou *range (R)*, em inglês) é dada pela medida do tempo levado para a onda eletromagnética percorrer o trajeto de ida e volta até o alvo. A direção até o alvo, ou azimute (*Azimuth (Az)*, em inglês), é obtida pela posição angular na qual se encontra a antena, considerando um radar com sistema de antena rotatória (HUBER, 2013; MERRILL I. SKOLNIK, 2001; PEYTON Z. PEEBLES, 1998; SILVA, 2010; WOODHOUSE, 2006).

Na Figura 2 é ilustrado um sistema radar básico, em que uma antena radar fixa em um terreno transmite sinais em direção a algumas árvores (linha em azul

claro). Notar que parte do sinal sofre espalhamento (linhas pontilhadas em azul escuro), enquanto um sinal eco retorna ao radar (em azul claro).

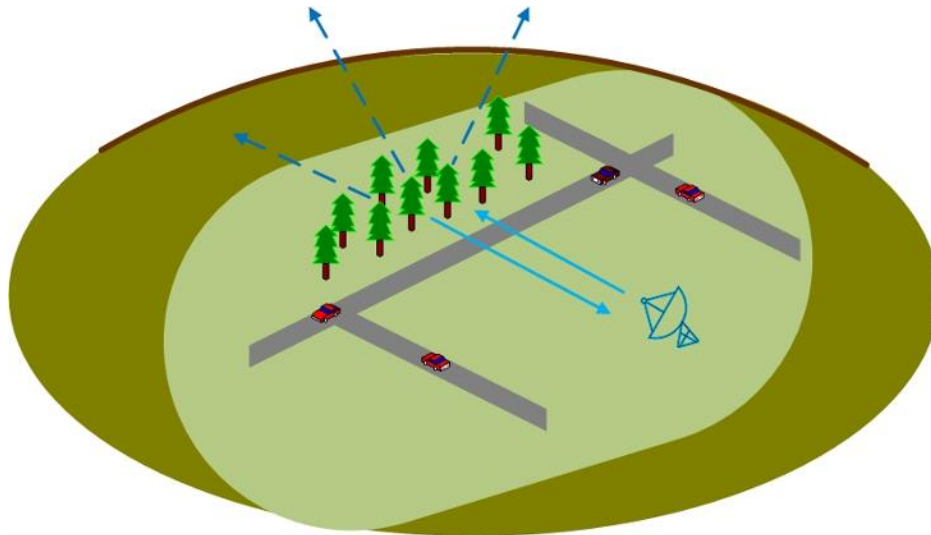


Figura 2: Princípio Radar

Fonte: HUBER, 2013

Dentre as características e funções realizadas por um sistema radar, três delas são consideradas fundamentais, quais sejam (MERRILL I. SKOLNIK, 2001; PEYTON Z. PEEBLES, 1998; SILVA, 2010):

- 1) Resolução;
- 2) Detecção; e
- 3) Medição.

A **resolução**, muitas vezes citada como resolução espacial, corresponde à habilidade do radar de separar (ou distinguir) dois alvos que estejam próximos. Esta característica é um dos principais critérios que identificam a qualidade de um sistema radar.

Possuindo relação direta com a faixa de frequências empregada pelo radar, frequências mais altas, ou seja, que possuem menores comprimentos de onda, apresentam melhores resoluções espaciais, observada a relação

$$f = c/\lambda, \quad (1.1)$$

em que f é a frequência, c corresponde à velocidade da luz e λ é o comprimento de onda.

Em outras palavras, a onda eletromagnética transmitida consegue transitar pelos dois alvos, distinguindo ambos pelo fato de o comprimento da onda ser menor do que a distância que os separa.

Por outro lado, frequências menores possuem maior comprimento de onda, dificultando o radar a indentificar dois alvos que estejam em distância menor em relação ao referido comprimento de onda.

A Figura 3 apresenta o conceito da resolução radar a partir do exemplo de uma folha de seringueira, tradicional árvore-da-borracha da floresta amazônica (AGROSSILVIPASTORIL, 2022), cujo comprimento médio varia de 7,5 a 10 cm.

Para a frequência mais alta, optou-se pela banda Ku, cuja faixa de frequência vai de 12 a 18 GHz e o comprimento de onda varia de 1,67 a 2,5 cm (

Tabela 5, do Anexo B).

Para a frequência mais alta, considerou-se a banda L, de 1 a 2 GHz, com comprimento de onda de 15 a 30 cm.

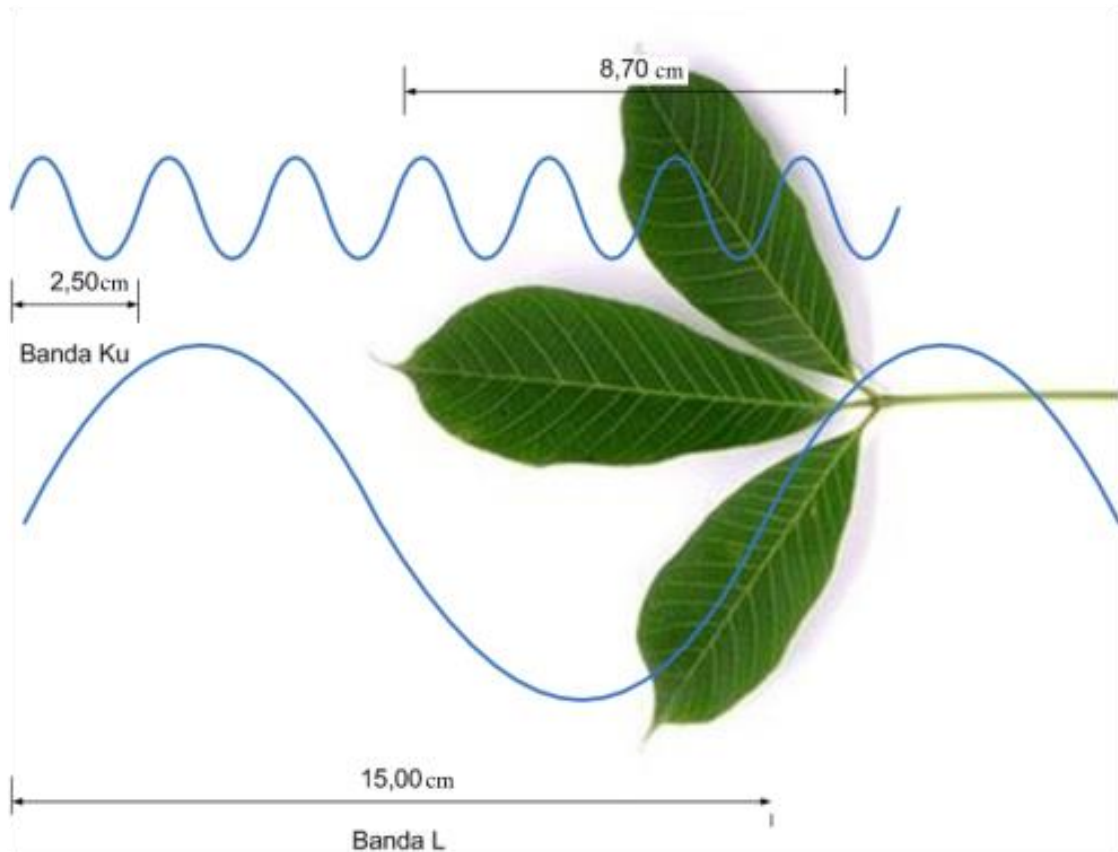


Figura 3: Resolução Radar.

Fonte: AGROSSILVIPASTORIL, 2022

Note que a onda é capaz de percorrer toda a folha na distância de um comprimento de onda. A ordem de grandeza desse comprimento de onda implica em uma alta frequência, o que faz com o sinal recebido tenha maior intensidade. Uma frequência mais baixa, por sua vez, pode não apresentar o mesmo resultado no processamento da onda refletida, dado que o sinal eco poderá não ter parâmetros que possibilitem distinguir as folhas individualmente.

A **detecção** corresponde à capacidade de o radar de identificar no sinal eco a presença ou não de um alvo. Embora a função pareça intrínseca ao funcionamento do equipamento, caso o sinal retornado seja mais fraco do que ruídos locais, a detecção pode ficar prejudicada.

Por fim, a função de **medição**, que, na origem do conceito denotava a capacidade de medir a distância radial do alvo, hoje se expande para novas possibilidades, tais como a medição de vetores velocidade, direção angular, entre outras.

1.2. RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

1.2.1. Breve histórico

Um SAR é um sistema de radar coerente² que utiliza a trajetória de voo da plataforma, que pode ser um avião ou um satélite, para simular eletronicamente uma antena, ou abertura, de grandes dimensões, o que permite a geração de imagens alta resolução. A distância que a plataforma se desloca ao longo da trajetória de voo cria uma grande “abertura sintética” (tamanho da antena). Quanto maior a abertura, maior a resolução da imagem. Em resumo, um SAR consiste em um radar posicionado em uma plataforma móvel que permite o processamento combinado de dados obtidos em diferentes instantes para a obtenção de uma imagem mais completa de determinada região. Assim, com um instrumento SAR, é possível gerar imagens de alta resolução com antenas físicas relativamente pequenas.

O conceito de Radar de Abertura Sintética (SAR, do inglês *Synthetic Aperture Radar*) é atribuído a Carl A. Willey, da então empresa Goodyear Aircraft Corporation. Suas pesquisas sobre a geração de imagens terrestres a partir de aeronaves permitiram a publicação de uma patente nos Estados Unidos no ano de 1965. Mais tarde, no final dos anos 60, a tecnologia SAR chamou a atenção da agência espacial estadunidense, a NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço, do inglês *National Aeronautics and Space Administration*), a qual decidiu incluir uma carga útil radar na missão lunar Apollo 17, denominada *Lunar sounder*. Essa carga útil consistia de sistema SAR de baixíssima frequência, operando nas faixas de 5 MHz, 15 MHz e 150 MHz (*coherent synthetic aperture radar*) com emprego de uma antena HF de 80 pés (cerca de 24 metros de largura) como mostrada na Figura 4.

² Radares coerentes propiciam a detecção da diferença de fase entre o sinal que vai e o que volta em relação ao alvo. Radares não-coerentes são incapazes de medir a diferença entre o pulso que vai e o que volta.

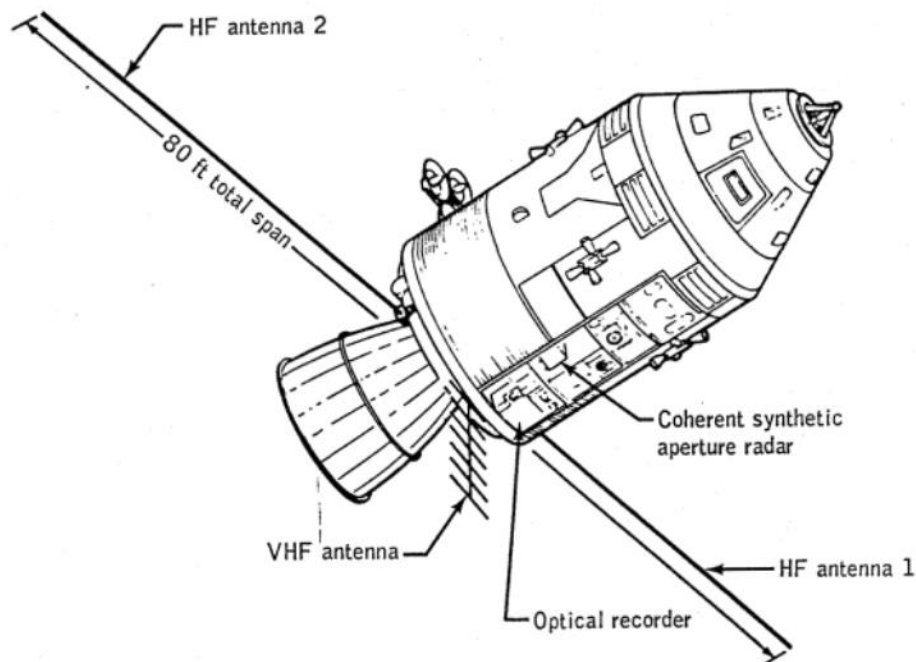


Figura 4: *Lunar sounder*.

Fonte: PHILLIPS et al. (1973)

Transmitindo uma série de pulsos ao longo da órbita lunar, foram recebidos sinais ecos equivalentes a essas respectivas faixas, sendo gravados em fitas cassete e mais tarde processados pela NASA. Por ocasião da análise, a variação de amplitude e tempo de recepção dos pulsos recebidos nas diferentes faixas de frequência permitiram gerar um modelo estrutural de uma camada lunar desde a superfície até cerca de um quilômetro de profundidade³. Dessa forma, a missão realizou com sucesso o mapeamento da superfície e do interior da Lua no ano de 1972, convencendo a NASA a incluir uma carga útil SAR no experimento SEASAT-A (PHILLIPS et al., 1973; WILEY, 1965).

Assim, o SEASAT-A passou a ser o primeiro satélite SAR, com uma massa de 2.290 kg, lançado em junho de 1978, em uma órbita com 108° de inclinação e na altitude de 795 km. Com a missão de coletar dados sobre ventos, ondas, temperaturas e topografia oceânica, o satélite teve vida curta de cerca de 105 dias, encerrando suas atividades em 09 de outubro de 1978, devido a um curto-

³ A capacidade de penetrabilidade das ondas eletromagnéticas radar serão objeto do subitem 1.4 deste relatório.

circuito entre o painel solar e a fonte de distribuição de energia do módulo de serviço.

No entanto, as aproximadas 42 horas de dados coletados pelo sensor SAR foram suficientes para gerar mais informações dos oceanos do que as pesquisas conduzidas a bordo de navios nos 100 anos anteriores (CANTAFIO, 1989; EOPORTAL DIRECTORY, 2022; FRANCESCHETTI; LANARI, 1999).

O desenvolvimento da tecnologia do SEASAT serviu de base para uma série de imagens radar SAR, como as obtidas pelas missões SIR-A e SIR-B (do inglês *Shuttle Imaging Radar*), realizadas entre 240 e 220 km, nos anos de 1981 e 1984, respectivamente, como teste de emprego das bandas C (5,6 cm de comprimento de onda) e X (3cm de comprimento de onda), mostradas na

Tabela 5, do Anexo B.

Após esses marcos iniciais da utilização da tecnologia embarcada em sistemas espaciais, diversos outros satélites foram lançados, conforme mostrado Tabela 3 do Anexo A.

Na Tabela 4 do mesmo anexo, são apresentadas algumas missões espaciais SAR com previsão de lançamento em 2022, 2024 e 2026. Não foram listadas missões ainda em concepção preliminar, anterior à Fase 0 (TRAINING, 2003), ou ainda em tratativas comerciais. Na Figura 5, é mostrada uma imagem da costa de Massachusetts, EUA, obtida pelo satélite SEASAT em 27 de agosto de 1978.

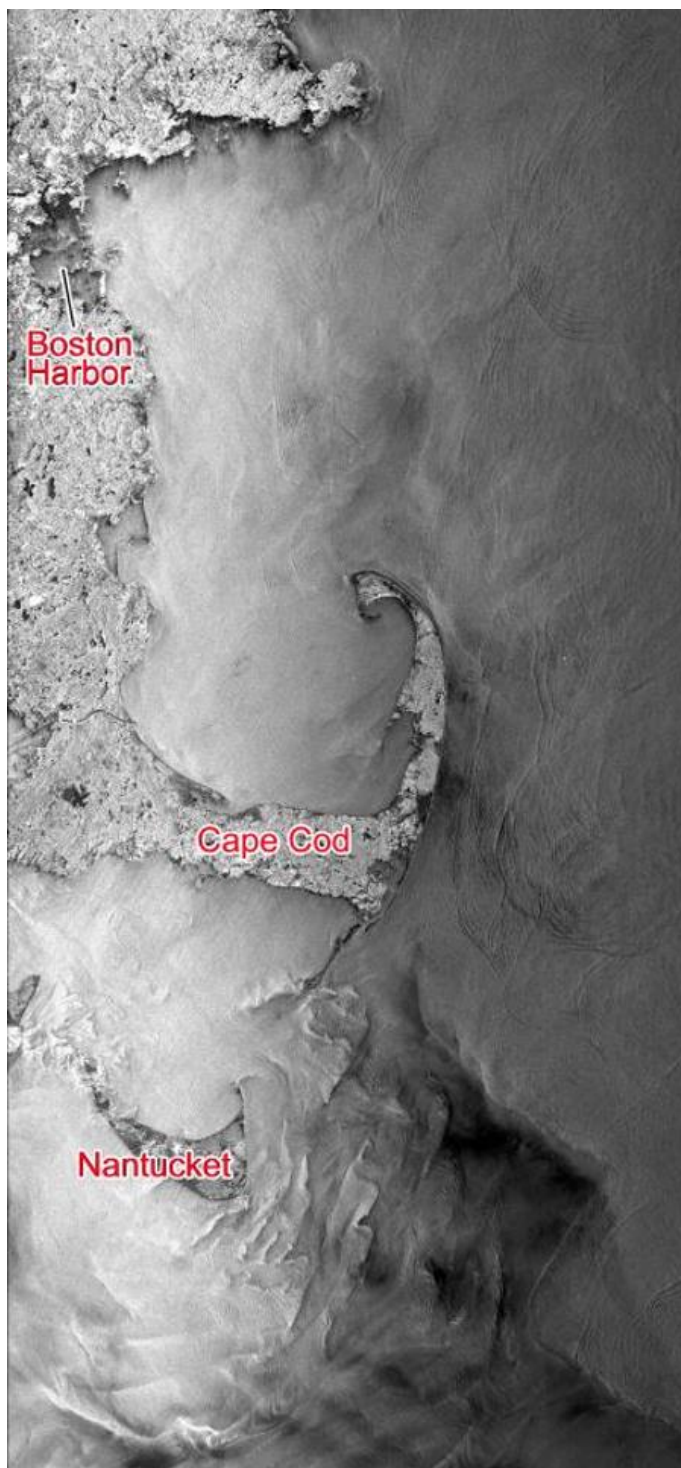


Figura 5: Imagem SEASAT da Costa de Massachusetts, EUA.

Fonte: NASA/JPL-Caltech/Alaska Satellite Facility (NASA/JPL-CALTECH/ALASKA SATELLITE FACILITY, 2014).

1.2.2. Objetos espaciais brasileiros – SAR Carcará

Os satélites Carcará I e II (NORAD ID 52749 e ID 52758), lançados em 25 de maio de 2022 pelo Falcon 9, ganham destaque entre os objetos espaciais pertencentes ao Brasil. Os dois satélites pertencem à frota de satélites Lessonia, prevista no Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE) (BRASIL; MINISTÉRIO DA DEFESA, 2018), cujo programa representa os interesses da Defesa para a área espacial.

Esses satélites são os primeiros satélites SAR nacionais constantes da lista de objetos espaciais brasileiros, disponibilizada pela AEB (AEB, 2022).

A concepção desses satélites foi realizada no período de 2018 a 2020 pela então Comissão de Coordenação e Implantação de Sistemas Espaciais (CCISE), sendo esta uma Comissão da Força Aérea Brasileira (FAB) responsável pela gestão do PESE, com apoio do Centro Espacial do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (CEI-ITA).

Após a fase de concepção do projeto Lessonia, realizada observando as normas da FAB (AERONÁUTICA, 2007) e da Comissão Européia para a Normatização Espacial (ECSS, do inglês *European Cooperation for Space Standardization*) (TRAINING, 2003), a responsabilidade do projeto foi passada para a Comissão Coordenadora do Programa Aeronave de Combate (COPAC). Esta comissão, observando seus processos internos de licitação, conduziu as ações que levaram à aquisição de dois satélites similares da empresa finlandesa ICEYE (ICEYE-X18 e ICEYE-X19).

Ambos os satélites são hoje controlados pelo Centro de Operações Espaciais (COPE), localizado em Brasília e no Rio de Janeiro (controle secundário), oferecendo serviços para a Defesa, especialmente para o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam) e para a sociedade brasileira como um todo, mediante o estabelecimento de acordos com a FAB.

A Figura 6 é uma imagem SAR do estado do Acre obtida ao longo de 12 dias no “modo strip” (subitem 2.4.1) com resolução espacial de 3 metros. Trata-se de

uma composição de passagens orbitais realizadas em um período de 12 dias, ilustrando os futuros produtos da constelação Carcará que se encontra em fase inicial de operação.

Após a imagem, apresenta-se a Tabela 1 na qual são mostradas algumas características dos referidos satélites, conforme dados disponibilizados na página da empresa ICEYE na internet (FULL et al., 2022; ICEYE, 2022) e em outras páginas, tais como *orbit.ing-now.com* e *n2yo.com*. Demais características são consideradas sigilosas, de propriedade do Ministério da Defesa, conforme informado pela ICEYE.

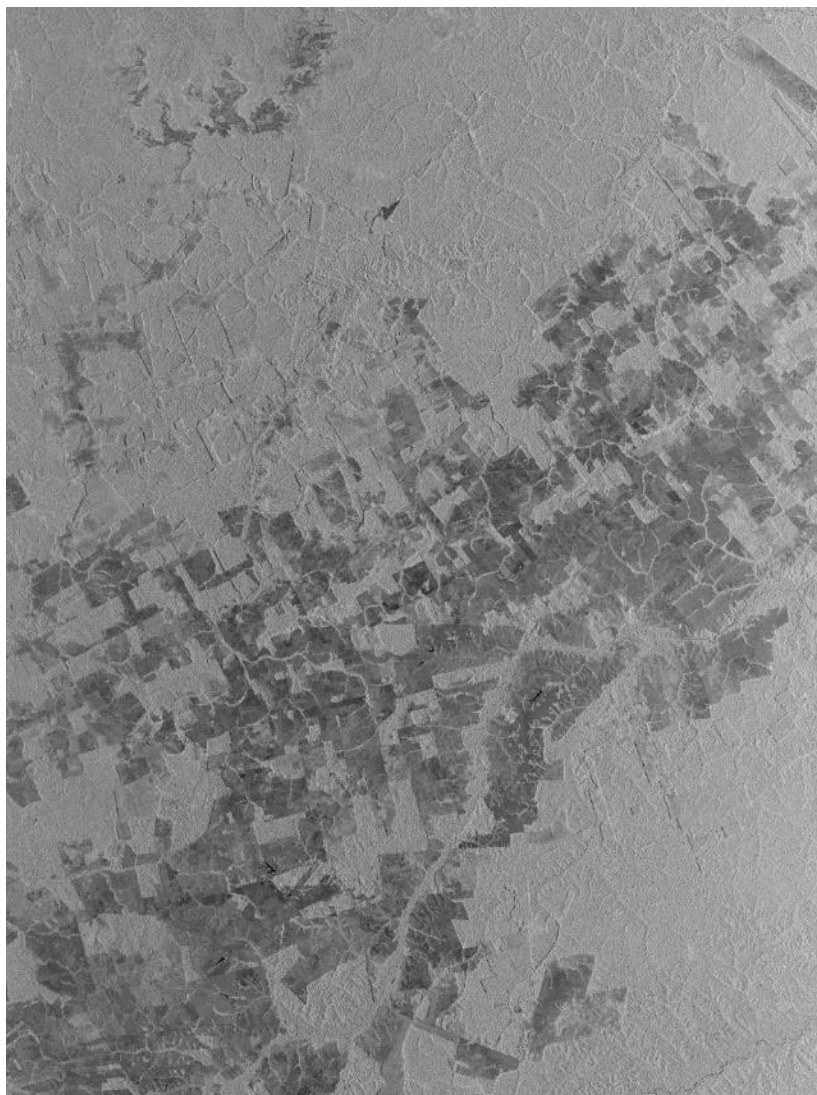


Figura 6: Imagem, obtida pelo satélite ICEYE, do Estado do Acre.

Fonte: ICEYE.

Tabela 1: Características básicas dos satélites Carcará I e II (Lessonia).

Especificações do satélite		Especificações da carga útil SAR	
Massa	80 kg	Frequência	Banda X
Comunicação	Bandas S / X	Direção da visada	Esquerda e direita
Altitude média (média entre o perigeu a apogeu dos satélites)	533 km	Polarização	VV
Órbita	Heliossíncrona	Modos de imageamento	Strip Spot Slea Scan
Período	95,2 minutos	Resolução	0,25 m (Spot) 3 m (Strip) 1 m (Slea) 15 m (Scan)
Semi eixo maior da órbita	6904 km	Largura de faixa	5 x 5 km (Spot) 30 x 50 km (Strip) 15 x 15 km (Slea) 100 x 100 km (Scan)

Fonte: Elaboração própria.

2. TECNOLOGIA SAR

2.1. Princípios de sistemas espaciais SAR

Todo sistema espacial possui uma arquitetura dedicada para alcançar os objetivos propostos de uma missão espacial. Esta arquitetura possui alguns elementos essenciais, tais como o segmento espacial e o objeto da missão. O primeiro deles é composto pelo módulo de serviço, também chamado de plataforma ou *bus* (em inglês), acrescido do módulo de carga útil, ou simplesmente carga útil, ou ainda *payload* (em inglês). O segundo, o objeto, é o elemento com o qual a carga útil irá interagir para alcançar os objetivos da missão (BOGOSSIAN, 2012; WERTZ; EVERETT; PUSCHELL, 2011).

As cargas úteis são únicas para cada missão, com a possibilidade de serem empregadas mais de uma vez em um mesmo segmento espacial, sendo cada uma delas específica para cada objeto considerado. Por exemplo, cargas úteis compostas por transponders de comunicação irão atender missões neste contexto; sensores capazes de medir radiação também podem ser incorporados como cargas úteis, permitindo o monitoramento da radiação espacial; cargas úteis com sensores ópticos podem, ao seu turno, realizar aquisições de imagens na faixa visível do espectro eletromagnético.

Os exemplos citados ilustram aplicações de cargas úteis com sensores passivos, ou seja, com sensores que dependem de estímulos externos para realizar algum registro do objeto com o qual interagem. Por sua vez, cargas úteis com sensores ativos emitem algum tipo de energia para que o objeto seja capaz de produzir o estímulo externo necessário ao registro de algum dado de interesse ao sistema.

Sistemas espaciais radar ou sistemas espaciais dotados de carga útil com sensor SAR, sistemas espaciais SAR, ou ainda, satélites SAR são sistemas que possuem sensores ativos que operam normalmente na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético.

Entre as características que envolvem o funcionamento de um sistema espacial SAR, destacam-se:

- a) Necessidade de recebimento de maior potência pelo módulo de serviço, por conta de se tratar de um sensor ativo que demanda energia para a transmissão da onda radar;
- b) São sistemas que operam em baixa órbita (LEO, do inglês *Low Earth Orbit*), considerando uma altitude máxima de 1000 km (COSTA; FERNANDES, 2014).
- c) Operando em órbita LEO, evita-se a necessidade de empregar uma antena maior que requer mais energia para ser alimentada.

- considerando que a relação existente entre o comprimento de onda (λ), a largura real exigida para uma antena (D_{AT}), a resolução (δ_{AT}) e a distância do radar ao alvo (R) é expressa por:

$$\lambda = \frac{\delta_{AT} D_{AT}}{R}, \quad (2.1)$$

Observa-se uma proporcionalidade entre R e D_{AT} . Logo, quanto maior a altitude, maior será a necessidade de incrementar a largura real da antena (CANTAFIO, 1989; OFFICE, 2007).

- d) Geralmente são lançados em órbitas heliosíncronas que permitem o recebimento constante da iluminação solar e, conseqüentemente, mantêm as baterias carregadas e o imageamento constante; e
- e) São sistemas que atuam dia e noite, independentemente de condições climáticas, entre outras, conforme desdobrado no subitem 2.2 (COSTA, 2019; MOREIRA et al., 2013)

2.2. VANTAGENS, DESVANTAGENS E APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA SAR

Devido à complexidade do desenvolvimento de um sistema espacial SAR, muitas vezes os custos mostram-se mais elevados do que aqueles observados em sistemas considerados mais simples, tais como os ópticos. Essa era uma desvantagem considerável há alguns anos, quando o foco estava na construção de grandes satélites.

Todavia, cada vez mais, essa desvantagem vem perdendo campo para o **New Space**, em que as relações entre as *partes interessadas* em um projeto (ou, do inglês, *stakeholders*) criam ambientes propícios para implementação de novas tecnologias, miniaturização, entre outras possibilidades, permitindo, assim, a redução no custo de uma missão espacial (COSTA, 2019; DEMANDAS NACIONAIS DO SETOR ESPACIAL - RELATÓRIO PARCIAL, 2018; GOLKAR; SALADO, 2020).

Ao seu turno, as vantagens são diversas.

Um sistema espacial SAR tem a habilidade de monitorar longas áreas independentemente da luz do dia, uma vez que a sua própria energia é utilizada para iluminar e receber o sinal eco que fornece os dados para a composição da imagem.

Dependendo da faixa de frequência utilizada, alguns obstáculos podem ficar invisíveis ao radar. Nesse contexto, quanto menor a frequência (bandas L e P – Anexo B), maior a penetrabilidade da onda eletromagnética radar.

Retornando à Figura 3, observa-se que pelo fato do comprimento de onda menor (banda Ku) possuir dimensões inferiores à da folha, ele consegue percorrer todo o alvo, devolvendo ao sensor radar sinais ecos que permitem discriminar o objeto. No caso da banda L, parte do comprimento de onda não devolve ao receptor sinais ecos completos sobre o alvo. Algumas informações são perdidas, impedindo a discriminação dos alvos e até mesmo pode atravessar o alvo sem identificá-lo. Em outras palavras, a onda eletromagnética pode cruzar o alvo sem

enxergá-lo, ou sem devolver ao radar sinais ecos com informações do objeto capazes de se tornarem percebíveis após o processamento da imagem.

A capacidade de penetração da onda radar também possui relação com a constante dielétrica do meio. Na Figura 7 é ilustrada a capacidade de penetração da onda eletromagnética SAR, em função do comprimento de onda.

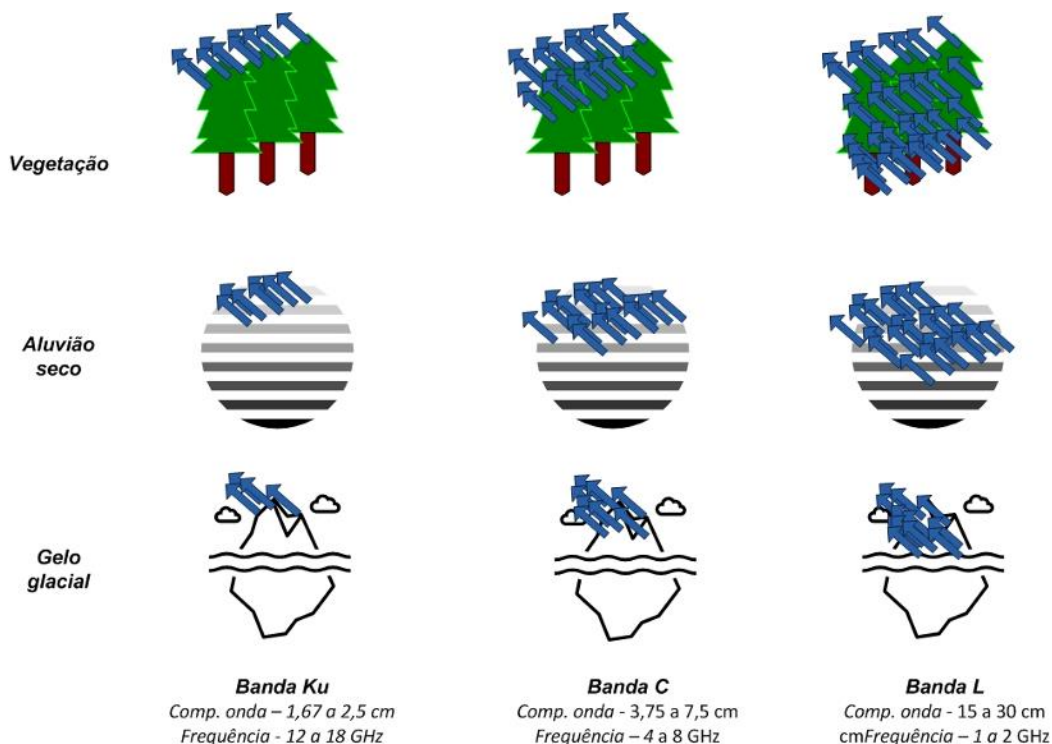


Figura 7: Penetração da onda eletromagnética SAR em relação ao comprimento de onda.

Crédito: adaptada de (FLORES et al., 2019).

Foram considerados, na figura, três cenários diferentes (vegetação, aluvião seco e gelo glacial) e três faixas de frequência que vão da mais alta (banda Ku) até a mais baixa (banda L).

Dada a expressão que quantifica a penetração em função da constante dielétrica do meio e o comprimento de onda,

$$\delta_p = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_r'}}{(2\pi \epsilon_r'')}, \quad (2.2)$$

em que δ_p quantifica a profundidade de penetração, λ é o comprimento de onda, ϵ'_r é a parte real da constante dielétrica do meio e ϵ''_r é a parte imaginária, normalmente são observadas as relações a seguir para diversos tipos de solo.

Quanto maior a frequência f , menor é o comprimento de onda λ , a parte real ϵ'_r reduz e a parte imaginária ϵ''_r incrementa, levando à um valor baixo de penetração.

Por outro lado, quanto menor a frequência f , maior é o comprimento de onda λ , a parte real ϵ'_r tem seu valor incrementado e a parte imaginária ϵ''_r reduz, levando à maiores valores de δ_p , ou seja, maior será a penetração no solo.

A Figura 8 ilustra esta relação entre frequência f , a parte real ϵ'_r , e a parte imaginária ϵ''_r da constante dielétrica de solos como a areia, o lodo e a argila (FLORES et al., 2019).

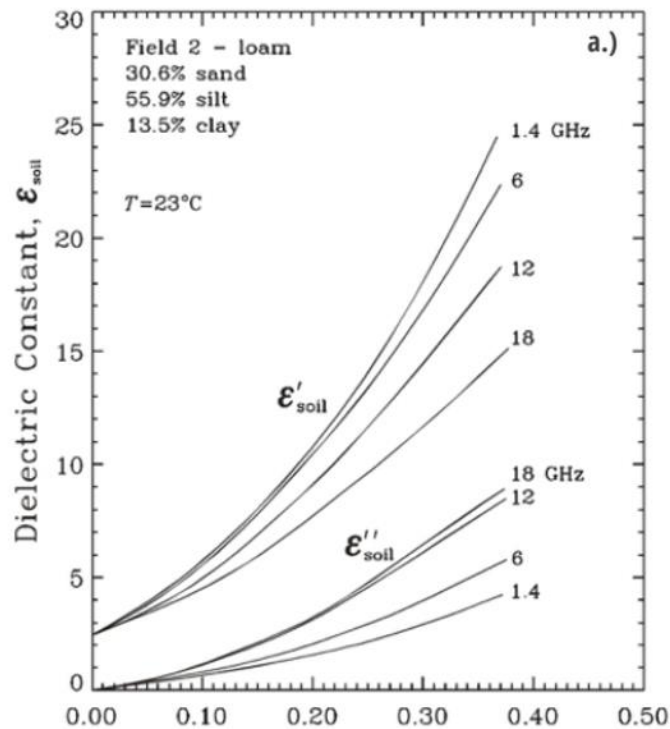


Figura 8: Relação entre frequência f , a parte real ϵ'_r , e a parte imaginária ϵ''_r da constante dielétrica de solos como a areia, o lodo e a argila.

Fonte: FLORES et al. (2019).

Por meio das imagens da Figura 7 e da Expressão (2.2), observa-se uma proporcionalidade entre o comprimento de onda e a penetração do sinal radar na superfície do alvo. Quanto maior o comprimento de onda, maior a capacidade de penetração. Por sua vez, quanto maior a densidade do meio, maior a influência de sua constante dielétrica, que vai permitir ou não uma maior penetrabilidade da onda SAR.

Ainda considerando a Figura 7, a densidade das folhas no canopi das árvores (parte superior delas) dificulta a penetrabilidade de pequenos comprimentos de onda, enquanto que as bandas C e L penetram com maior facilidade. Situação similar ocorre em cenários com outras constantes dielétricas. No caso do gelo glacial, a banda L penetra com ainda maior facilidade.

Assim, a exemplo de emprego de alta frequência, é possível *ver* trilhas abertas em florestas que antecedem a ação de desmatamento. É possível ainda *ver* poços de aquicultura irregular cobertos por materiais cuja constante dielétrica permite a penetrabilidade da onda radar. Ilustrando, telas podem ser colocadas sobre estes tanques impossibilitando a visibilidade deles por meio de sensores ópticos, mas a resposta espectral da água do tanque embaixo da tela estará visível após o processamento do sinal radar.

É possível identificar a umidade do solo em benefício das atividades agropecuárias. Solos úmidos costumam apresentar menor rugosidade. Essa menor rugosidade reduz significativamente o retorno dos sinais ecos ao receptor, gerando uma imagem mais escura da região após o processamento.

De acordo com o critério de Fraunhofer (FLORES et al., 2019), define-se como rugosidade a relação entre o comprimento de onda e o ângulo de incidência da onda radar (θ_i):

$$h_{rugosidade} > \frac{\lambda}{(32 \cdot \cos \theta_i)}. \quad (2.3)$$

Quando a relação for expressa por $h < \lambda/32$, não há retorno do sinal radar e a superfície apresenta-se em tons escuros no processamento SAR. Se a relação for expressa por $\lambda/32 < h < \lambda/2$, há um retorno moderado do sinal eco e a imagem adquire tons mais claros. Por fim, se a relação for expressa por $h > \lambda/2$, a imagem irá possuir tons bem claros, tendenciando ao branco, indicando forte retorno do sinal.

A transparência para elementos em solo também ocorre para elementos que estejam na atmosfera. Dessa maneira, poeira e nuvens costumam não ser obstáculos para imagens radar.

As Figura 9 e Figura 10 comparam duas imagens (óptica e radar, respectivamente) do mesmo evento da erupção do vulcão Kliutchevskoi, localizado na península de Kamchatka, na Rússia, ocorrida em 30 de setembro de 1994 (NASA/JPL, 1999, 2009).



Figura 9: Imagem óptica da erupção do vulcão Kliutchevskoi, localizado na península de Kamchatka, Rússia, ocorrida em 30 de setembro de 1994.

Fonte: NASA/JPL.

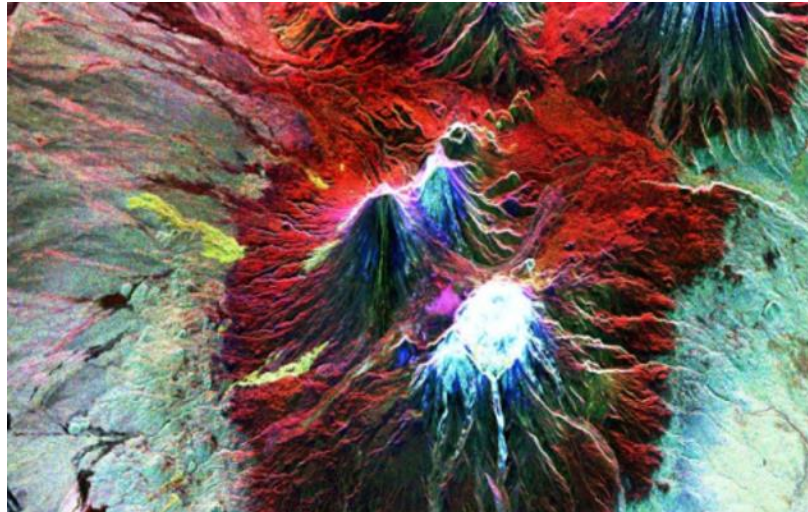


Figura 10: Imagem radar da erupção do vulcão Kliutchevskoi, localizado na península de Kamchatka, Rússia, ocorrida em 30 de setembro de 1994.

Fonte: NASA/JPL.

Na Figura 9, tem-se a foto óptica tirada pelos astronautas que se encontravam no Space Shuttle. Na Figura 10, tem-se a imagem adquirida pelo sensor SIR-C / X-SAR (Anexo A) obtida no mesmo momento da aquisição da imagem óptica.

Enquanto a fumaça da primeira imagem impede a observação de alguns pontos da superfície por sensores ópticos ou pelo olho humano, a imagem SAR não sofre, ou pouco sofre, o efeito da poeira vulcânica, permitindo uma visão clara das condições do terreno embaixo da nuvem.

Observe-se que no entorno dos picos em tons claros circundados há uma faixa vermelha ao redor deles. Trata-se de neve derretida misturada com cinzas vulcânicas, desencadeando fluxos de lama nos flancos do vulcão.

Esse exemplo evidencia a capacidade de imageamento SAR e seu potencial de aplicação.

Embora as altas frequências não possuam a mesma capacidade de penetrabilidade mencionada anteriormente, elas também são de extrema utilidade para diversas aplicações.

Com o emprego de altas frequências é possível *ver* o dossel das árvores, ou seja, a parte superior das florestas e realizar pesquisas atinentes à biomassa. Dada a capacidade de alta resolução espacial dessa faixa de frequências,

atingindo marcas milimétricas, é possível monitorar rachaduras em barragens de sedimentos, por exemplo. Altas frequências também permitem a realização da chamada agricultura de precisão, auxiliando agricultores na estimativa da colheita de suas plantações.

Na Figura 11 é ilustrada uma aplicação interessante de SAR de alta frequências (banda X), na qual foi realizada, no período de 2011 a 2017, uma medição das alterações de solo na cidade de Londres com emprego do satélite TerraSAR-X (Anexo A). As áreas em vermelho apresentam as regiões onde ocorreu afundamento do solo da ordem de 2mm ao ano, equivalente a áreas por onde passam dutos elétricos ou possuem alguma infraestrutura de subsolo. As áreas em azul representam as regiões onde o solo subiu em aproximadamente 2 mm ao ano devido às obras preventivas no metro da cidade (LONDON, 2018).

Esse valor mínimo de 2 mm foi obtido após o processamento de cerca de 150 imagens, empregando recursos de interferometria, que possibilitaram detectar as alterações no terreno.

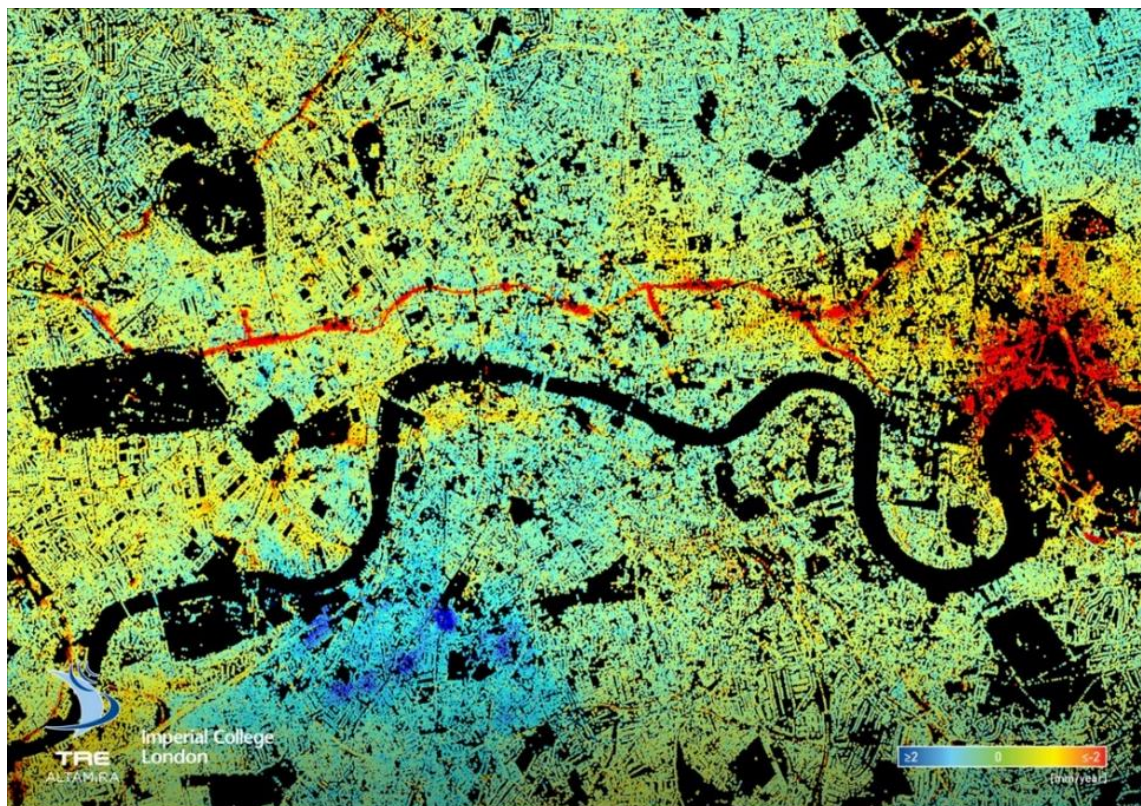


Figura 11: Medição das alterações de solo na cidade de Londres com emprego do Satélite TerraSAR-X.

Fonte: LONDON, 2018.

Na Figura 12, adaptada da referência (NASA, 2022), são apresentadas as faixas do espectro eletromagnético onde são empregadas as bandas SAR citadas anteriormente, designadas pelas letras X, C, S, L e P, as quais compõem as classes de sensores.

Como a faixa de frequências influencia no tamanho da antena a ser empregada, conforme tratado na expressão 2.1, faixas de frequências mais baixas implicam maior largura para a antena e, conseqüentemente, sistemas espaciais maiores, mais complexos, com mais massa e de maior valor. Faixas de frequências mais altas não necessitam de grandes antenas, permitindo uma redução da complexidade, da massa e do custo. Aqui se enquadram os CubeSats.

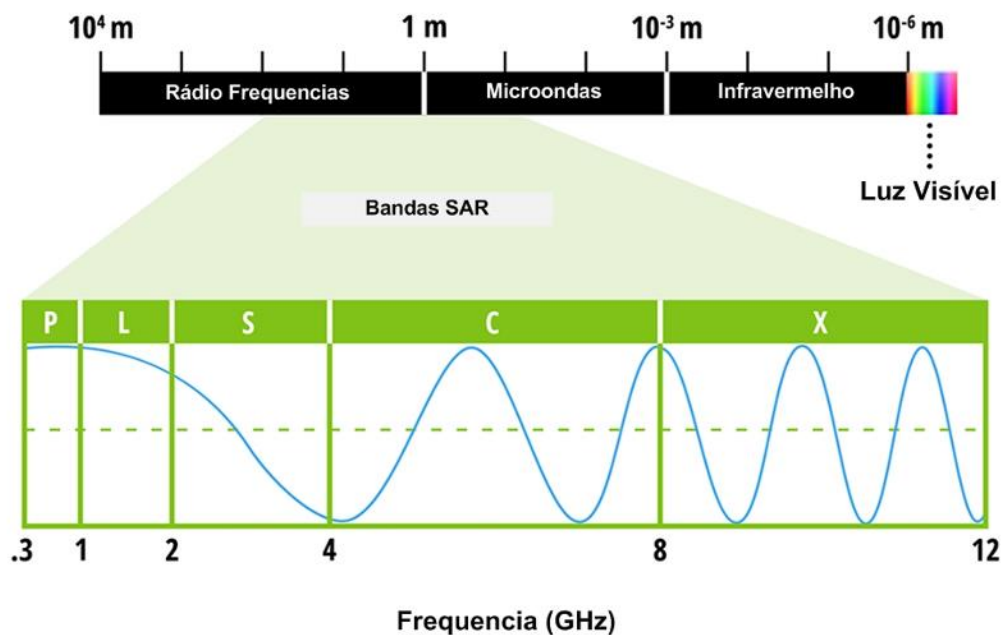


Figura 12: Espectro eletromagnético e bandas SAR.
Adaptado de (NASA, 2022).

Além das aplicações citadas, segue uma lista genérica de aplicações, considerando cenários amplos tais como a biosfera, a geosfera, a litosfera, a hidrosfera, a criosfera, entre outras descritas a seguir (COSTA; PASSARO, 2015; COSTA, 2019; MOREIRA et al., 2013) :

- a) Biosfera - Plantação e desmatamento, mudança da biomassa florestal, altura da floresta, incêndio florestal, estrutura vertical da floresta, espécies, crescimento de plantações, classificação de culturas;
- b) Geosfera / litosfera - Atividades vulcânicas, terremotos, deslizamentos de terra, placas tectônicas;
- c) Hidrosfera / criosfera - Cobertura de gelo e mudança de massa, umidade do solo, inundações, correntes oceânicas, mudança do nível da água, poluição por óleo, fluxo de rios, recursos hídricos nos desertos;
- d) Urbanas - Urbanização, tráfego, densidade urbana, monitoramento de barragens, monitoramento de estações de energia em estações remotas, monitoramento de afundamento de áreas urbanas, entre outras.

Destaca-se que faixas de frequência ou bandas específicas ou associadas podem ser úteis em quaisquer uma destas aplicações. Dependerá da informação requerida pelo usuário e das soluções possíveis evidenciadas nos processos de engenharia de sistemas espaciais.

Todavia, algumas aplicações podem apresentar melhores resultados por bandas, conforme apresentado nos itens a seguir (AOKI et al., 2021; FLORES et al., 2019; GARESTIER; TOAN; DUBOIS-FERNANDEZ, 2007; ILARIA PANNACCIONE APA et al., 2016; MOREIRA et al., 2013; NATALE et al., 2011; VAN DER SANDEN et al., 2001):

a) banda P, frequência de 0,3 a 1 GHz (SAR experimental, de penetração):

- identificação de objetos enterrados em solo;
- alvos sob vegetação.

b) banda L, frequência de 1 a 2 GHz (SAR de média resolução):

- identificação de objetos sob vegetação;
- identificação de humidade no solo;
- monitoramento de atividades geofísicas do terreno;

- mapeamento de biomassa e vegetação.

c) banda S, frequência de 2 a 4 GHz (uso vem se intensificando para observação da Terra):

- mapeamento de monitoramento de desastres (deslizamentos, a exemplo);
- monitoramento agrícola;
- monitoramento da densidade da vegetação.

c) banda C, frequência de 4 a 8 GHz (SAR de maior emprego):

- monitoramento de gelo;
- monitoramento de ventos oceânicos;
- monitoramento de alagamentos;
- monitoramento da navegação marítima.

d) banda X, frequência de 8 a 12 GHz (SAR de alta resolução):

- monitoramento urbano;
- monitoramento de neve e gelo;
- monitoramento de barragens de sedimentos;
- agricultura de precisão.

e) banda Ku, frequência de 12 a 18 GHz (raramente usado):

- potencial aplicação em satélite 12U;
- altimetria de satélites;
- monitoramento meteorológico.

f) banda K, frequência de 18 a 27 GHz (raramente usado):

- monitoramento de aeroportos.

g) banda Ka, frequência de 27 a 40 GHz (raramente usado):

- monitoramento de aeroportos.

Essas aplicações também são apresentadas na

Tabela 5 em maiores detalhes.

Na área de Defesa, os dados SAR processados podem possuir as seguintes aplicações (NGA, 2006):

- a) Planejamento de missão em Sistemas de Informação Geográfica (SIG);
- b) Conscientização do ambiente operacional;
- c) Fiscalização de fronteiras;
- d) Fiscalização do tráfego de navios;
- e) Identificação de embarcações e navegação;
- f) Detecção e vigilância de alvos, entre outros.

No Anexo B, em sua

Tabela 5, são apresentadas de forma resumida as faixas que envolvem cada uma dessas classes e suas respectivas aplicações (FLORES et al., 2019).

2.3. GEOMETRIA SAR

Em termos conceituais e gerais, a geometria de um sistema SAR considera que o sensor, um radar pulsado, esteja se movendo em uma direção azimutal (azimuth) com velocidade v_p , em uma órbita de altura h , observando sua área de interesse por meio de uma visada lateral, na direção radial (range), ou alcance, conforme ilustrado na Figura 13.

O termo abertura sintética decorre da simulação de uma antena real com uma abertura extremamente grande capaz de imagear uma longa faixa no solo. Esta simulação se dá por meio do deslocamento do satélite em órbita. A abertura sintética da antena equivale à distância percorrida pela espaçonave do início até o fim da transmissão radar no momento do imageamento.

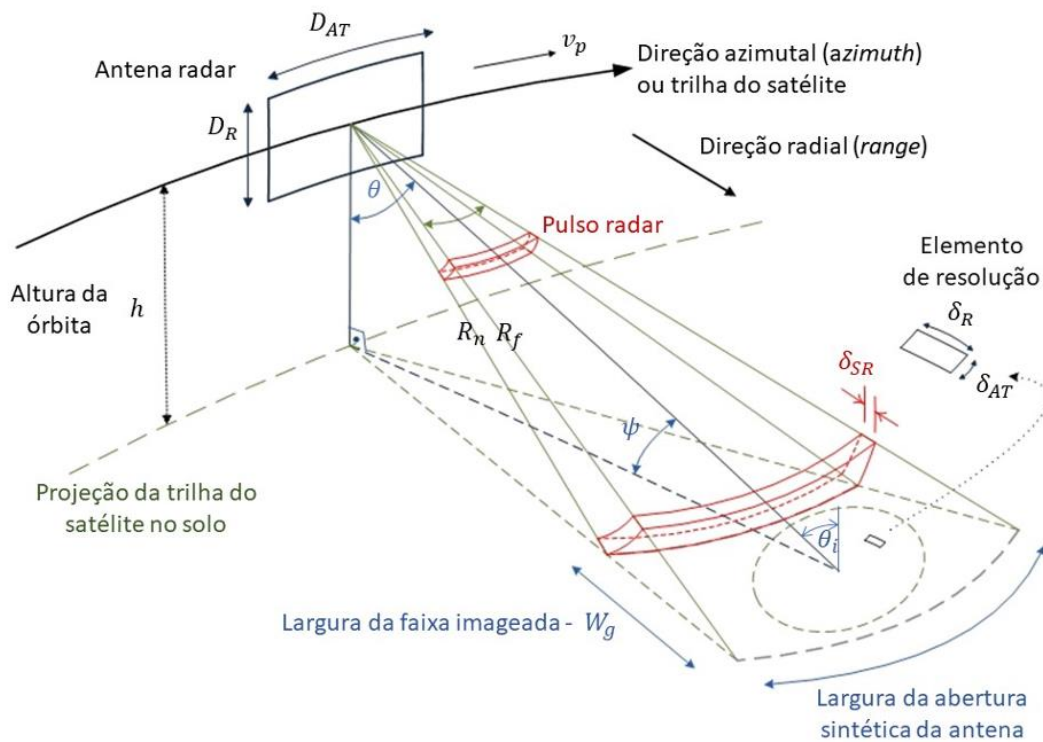


Figura 13: Geometria SAR, adaptada de COSTA e PASSARO (2015).

Nesse exemplo genérico é considerada uma antena planar de dimensões D_{AT} e D_R , em que o primeiro termo equivale à abertura real da antena; e o segundo, à largura da antena na direção radial.

O radar transmite pulsos de largura δ_{SR} , gerando células de resolução ou elementos de resolução de dimensões δ_R e δ_{AT} , as quais equivalem à menor distância nas direções radiais e azimutais capazes de distinguir dois objetos, sendo expressa por

$$\delta_{SR} = \frac{\tau c_0}{2}, \quad (2.4)$$

em que τ é a duração do pulso e c_0 é a velocidade da luz no vácuo.

Sendo δ_{SR} a resolução espacial na direção radial, no mesmo plano da onda incidente, ao projetá-la sobre o solo, se obtém a resolução espacial dada por

$$\delta_{SR} = \frac{\tau c_0}{2 \cos \psi}, \quad (2.5)$$

em que ψ é o ângulo que a onda incidente faz com o solo.

Cabe ressaltar que a resolução espacial em azimute δ_{AT} não depende da largura de abertura sintética da antena; mas, sim, da abertura real da antena, sendo expressa por

$$\delta_{AT} = \frac{D_{AT}}{2}. \quad (2.6)$$

Os pulsos são transmitidos a partir de um ângulo de visada θ , chegando à área imageada por um ângulo de incidência θ_i .

A área de incidência possui uma largura que equivale à largura da abertura sintética da antena, expressa por

$$L_{SA} = \frac{\lambda}{D_{AT}}. \quad (2.7)$$

em que λ é o comprimento de onda e D_{AT} equivale à abertura real da antena. A largura da faixa imageada (*swath*, em inglês), é dada por

$$W_g = \frac{R_f - R_n}{\cos \psi}, \quad (2.8)$$

em que R_f equivale à maior distância na qual o sinal radar alcança o solo; por sua vez, R_n equivale à menor distância.

A largura da faixa imageada também pode ser expressa em função da frequência de repetição de pulso ou (PRF, do inglês *Pulse Repetition Frequency*), a saber:

$$W_g \approx \frac{c_0}{2 \cdot \cos \psi \cdot PRF} \quad (2.9)$$

A partir desta arquitetura advêm diversos modos de operação conhecidos na literatura, sejam eles já aplicados ou ainda em prospecção. Nesse contexto, nos limitaremos a apresentar os mais usuais entre os sistemas espaciais SAR, tradicionalmente aplicados em satélites de pequeno porte (LEE; POTTIER, 2009a; MOREIRA et al., 2013).

2.4. MODOS DE IMAGEAMENTO

Há três modos de imageamento básicos encontrados na literatura, os quais são desdobrados nos subitens seguintes. No entanto, essa lista não se encerra em si, havendo outras tendências em desenvolvimento ou já sendo aplicadas (COSTA; PASSARO, 2015; MOREIRA et al., 2013). Mas o entendimento dessas já possibilita a compreensão dos demais.

2.4.1. Stripmap

Este é o modo de imageamento mais simples e mais adequado para aplicação em um CubeSat, por não exigir grande manobrabilidade do satélite.

Neste modo, o sistema SAR direciona a sua antena no sentido perpendicular ao de sua trajetória, enviando pulsos contínuos do início ao fim do imageamento. Como resultado, o radar realiza o registro de uma faixa (ou do inglês, strip).

Na Figura 14 é apresentada essa geometria de imageamento, em que o strip mode é destacado pela transmissão em azul do sinal radar e criação de uma faixa de imageamento retangular pontilhada no solo. Nesse modo de transmissão, geralmente se obtém valores médios na capacidade de resolução espacial e de faixa imageada.

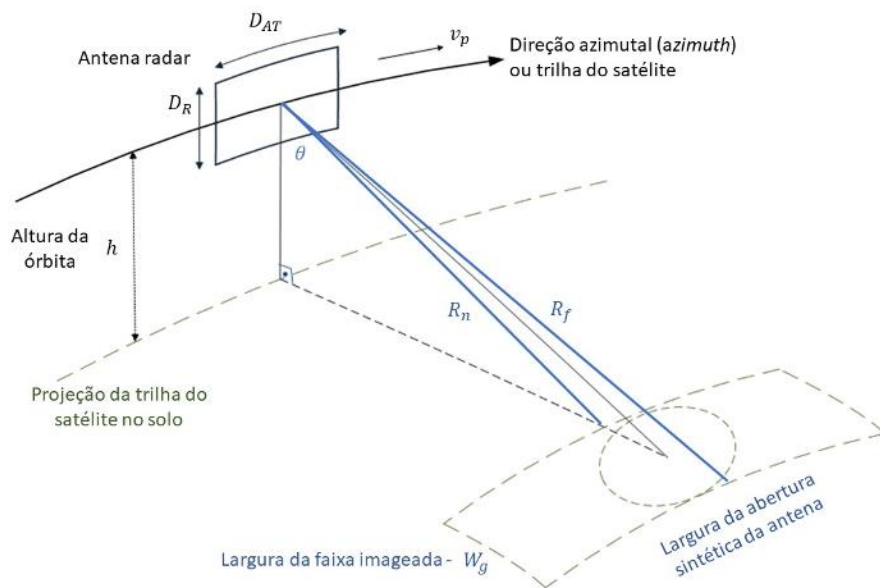


Figura 14: Modo de imageamento Stripmap.

Adaptado de LEE e POTTIER (2009b).

2.4.2. Spotlight

O modo Spotlight representado na Figura 15 busca iluminar uma área de interesse por maior tempo, fazendo uso do deslocamento eletrônico do feixe do radar. Essa técnica possibilita obter uma resolução espacial melhor que no modo Stripmap.

Diferente do Stripmap, nesse modo de imageamento não se obtém uma faixa de imageamento contínua, mas, sim, um pequeno trecho com alta resolução devido ao incremento da abertura sintética da antena.

Uma possibilidade de aplicação para esse modo poderia ser na agricultura de precisão, em que a alta resolução das imagens é um requisito essencial.

Outra possibilidade de interesse poderia ser o monitoramento de barragens com o uso de altas frequências (menor comprimento de onda) e alta resolução espacial, em que rachaduras centimétricas poderiam se tornar visíveis ao radar.

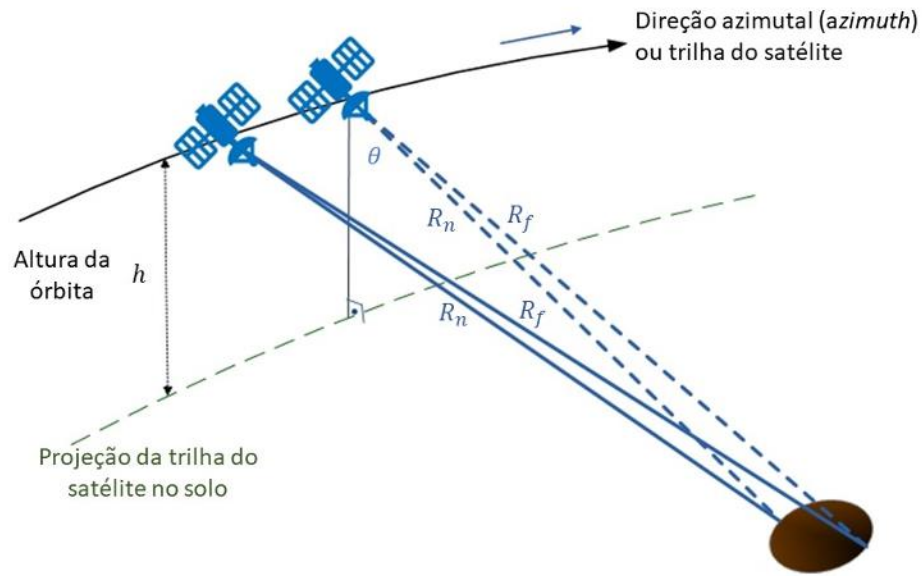


Figura 15: Modo de imageamento Spotlight.
Adaptado de MOREIRA et al. (2013).

2.4.3. ScanSAR

Nesse modo de operação, o feixe da antena é deslocado sucessivas vezes em elevação para imagear subfaixas no solo, permitindo se aumentar a faixa imageada (*swath*), todavia com perdas na resolução espacial em função da redução de sinais ecos, ou ainda, pela redução da abertura sintética da antena (Figura 16).

Esse modo de operação pode ser interessante quando se desejar imagear uma área maior sem a necessidade de alta resolução. Um exemplo de aplicação poderia ser o monitoramento de embarcações em uma faixa oceânica.

Para efeitos de comparação, observando a Tabela 1, onde foram apresentadas as características dos satélites Carcará I e II, note-se que, enquanto no modo Spotlight o SAR consegue obter resolução espacial da ordem de centímetros com uma faixa de 5 x 5 km, no modo Scan a resolução cai para 15 metros com faixas da ordem de 100 x 100 km.

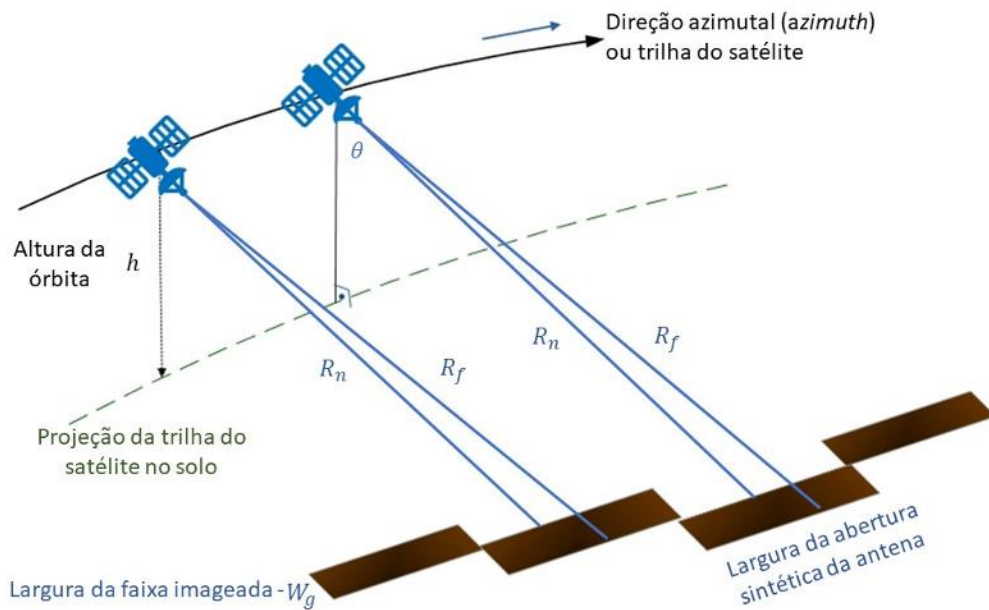


Figura 16: Modo de imageamento ScanSAR.

Adaptado de MOREIRA et al., (2013).

2.5. TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE IMAGENS SAR

Uma vez que o sensor SAR tenha adquirido os sinais ecos que contêm registros da área imageada, esses são transmitidos ao segmento terrestre encarregado da recepção por meio de telemetria e em forma de metadados. Em seguida, a partir da estação de solo, é realizada a distribuição desses dados para processamento e construção da imagem SAR.

A imagem SAR é formada por um conjunto de pixels, ou pontos, armazenados em duas dimensões, em azimute e alcance, em que cada um deles é formado por um número complexo que leva informações de amplitude e fase do sinal refletido na célula de resolução considerada. A resolução de cada pixel depende da faixa de frequência do sistema que estiver imageando, conforme mencionado no Subitem 2.2.

Essa imagem complexa ainda não traz consigo componentes visuais que identifiquem os alvos de interesse. Chamada de dados brutos, ela deve ser processada para se tornar compreensível aos olhos do usuário. Na

Figura 17 é ilustrado esse processo de construção da imagem SAR.

No primeiro passo, tem-se os dados brutos, cuja apresentação nas duas dimensões revela uma imagem em tons de preto, branco e cinza, sem nenhuma relação com a região imageada. No segundo passo, é aplicada uma função de referência em alcance, que é conjugado complexo da resposta esperada de um

alvo pontual no solo. Assim, os dados são comprimidos nessa dimensão, gerando uma nova imagem onde já se destacam alguns contrastes, sem evidenciar os alvos da área imageada. No terceiro passo, é repetido o mesmo processo para a dimensão em azimute. Uma vez comprimidos os dados em azimute, o processamento da imagem é finalizado, gerando uma apresentação visual compatível com a região imageada.

Nesse processo simplificado não foram consideradas algumas etapas que podem se fazer necessárias em função do processo de aquisição da imagem. Um exemplo é o não recebimento de alguns sinais ecos de algumas células de resolução. Para contornar este potencial problema na visualização da imagem, alternativas como o preenchimento de pixels com o valor zero ou com a média da amplitude dos pixels vizinhos são utilizadas.

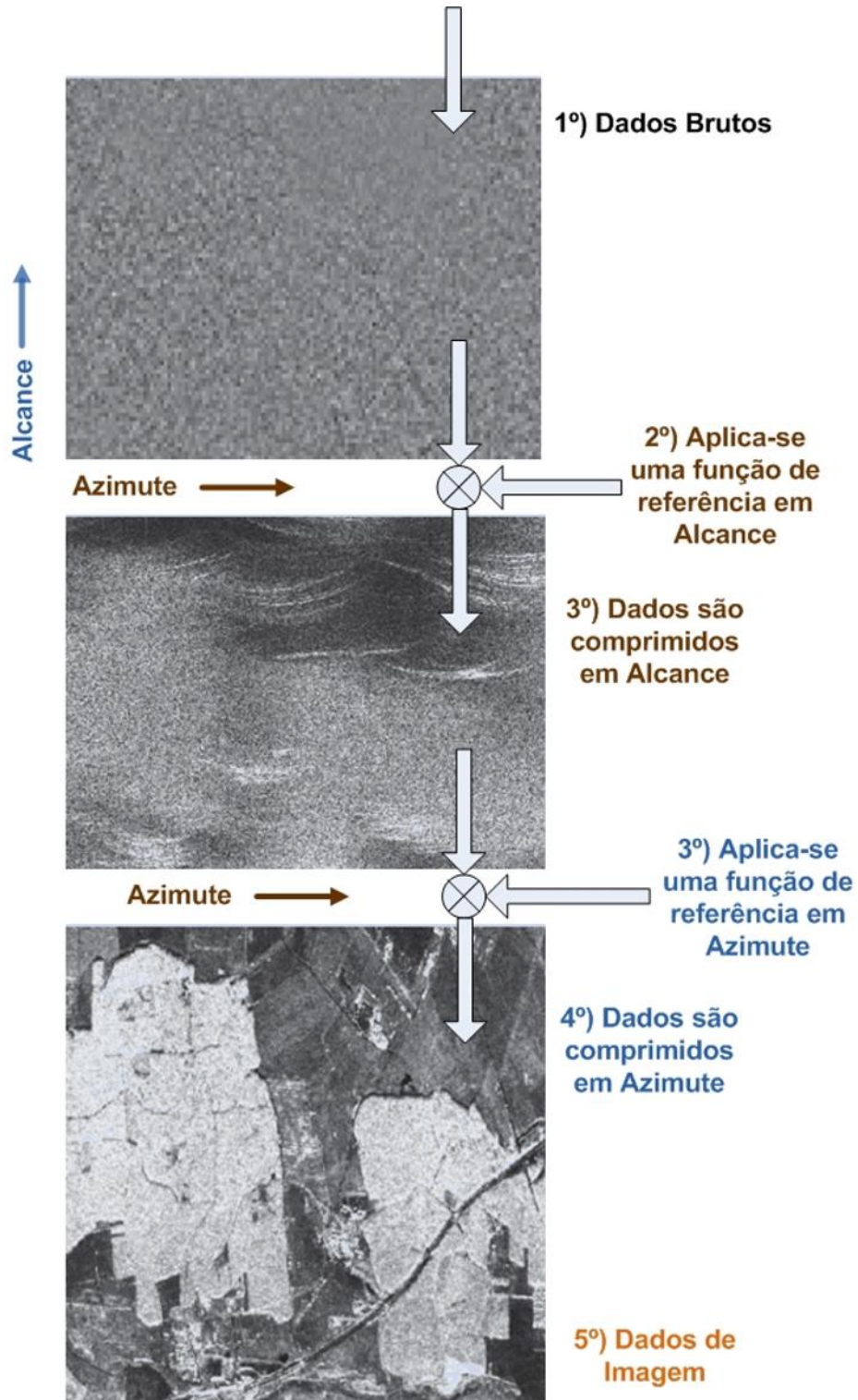


Figura 17: Construção da imagem SAR.
Adaptado de MOREIRA et al., (2013).

Outro ponto importante a se ressaltar é que esta imagem somente pode ser reconstruída se forem conhecidos os parâmetros de imageamento (altura do sensor, ângulo de visada, velocidade, entre outros). Caso contrário, não há como fazê-lo de forma independente do processamento a ser realizado, exceto se forem empregados softwares dedicados que já possuem parâmetros de aquisição de imagens customizados para algumas missões SAR, sendo capazes de importar dados brutos de imagem. A exemplo, softwares como o PolSARpro, fornecido gratuitamente pela Agência Espacial Européia (ESA, do inglês *European Space Agency*), permite o processamento de imagens de missões SAR, tais como TerraSAR-X, RADARSAT-2, entre outras (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2022).

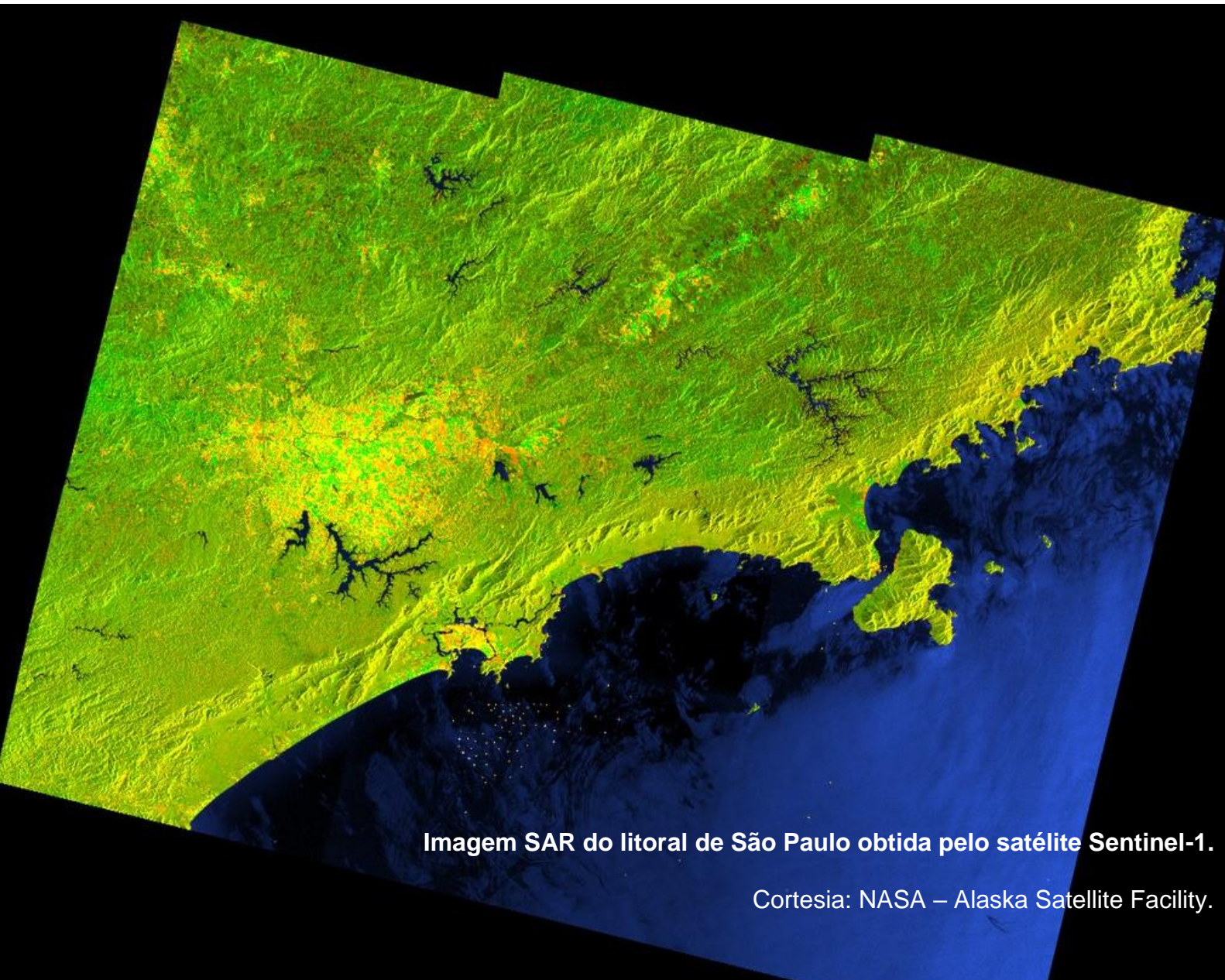


Imagem SAR do litoral de São Paulo obtida pelo satélite Sentinel-1.

Cortesia: NASA – Alaska Satellite Facility.

2.6. ANÁLISE DE IMAGENS SAR

Em função de a imagem óptica muitas vezes fornecer uma apresentação amigável, em cores e com a possibilidade de se observar com certa nitidez detalhes de terreno que poderiam ser vistos a olho nu, muitas vezes tais fatos fazem com que as imagens SAR sejam negligenciadas por alguns usuários ou até mesmo criticadas.

Todavia, a riqueza de informações está justamente naquilo que não se vê com os olhos humanos e que o processamento SAR é capaz de apresentar. Além dos comentários já mencionados referentes à Figura 10, no Subitem 2.2, observe-se agora a Figura 18, a qual ilustra a cidade de Brasília, DF.

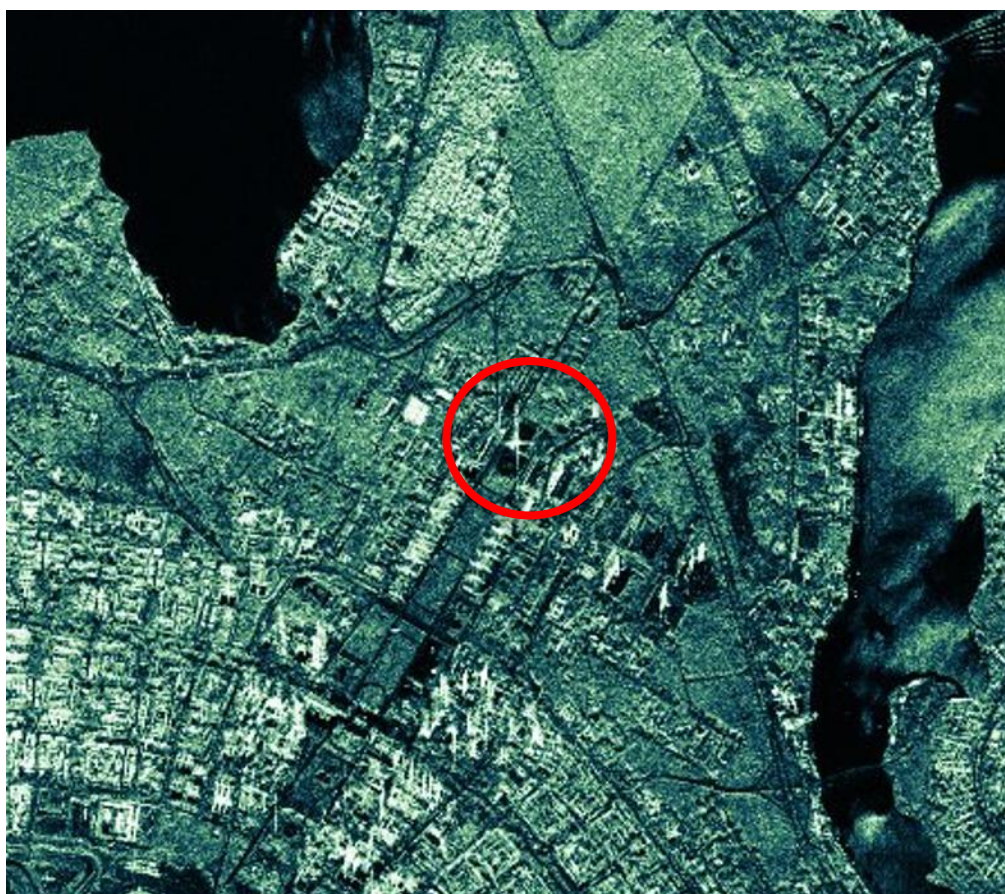


Figura 18: Imagem SAR (3m de resolução) da cidade de Brasília, DF.

Fonte: Cortesia ICEYE.

Note-se que no Congresso Nacional (ao centro) há duas retas brancas cruzadas em forma de cruz. Trata-se da reflexão radar das estruturas metálicas superiores de uma das torres do Congresso Nacional, indicada por um círculo vermelho.

Este efeito é muito comum quando o radar imageia superfícies metálicas. Cabe ressaltar que o metal não necessariamente precisa estar na superfície. Se houver alguma penetrabilidade da onda eletromagnética na superfície imageada, há a possibilidade de pontos metálicos se destacarem na foto.

Este efeito relacionado à superfície metálica pode ser observado também nas figuras a seguir, onde são apresentadas duas imagens do aeroporto da Agência Espacial Alemã (DLR), localizado na cidade de Oberpfaffenhofen, sul da Alemanha, adquiridas pelo E-SAR (Radar SAR aeroembarcado do DLR). A Figura 19 ilustra uma composição RGB SAR onde podem ser observados pontos brancos na área verde central. Estes pontos não aparecem na imagem óptica da Figura 20, mas estão nítidos na imagem radar demonstrando a capacidade do sensor de apresentar imagens que não estão no espectro óptico.

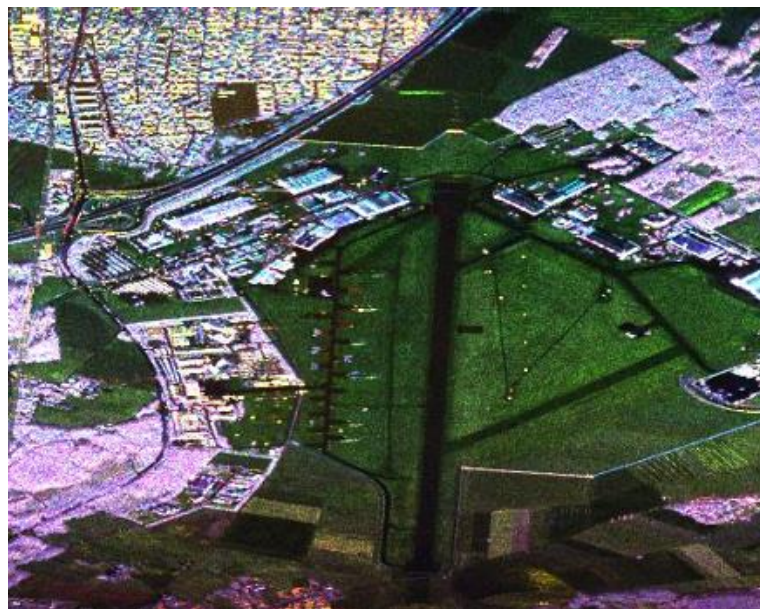


Figura 19: Composição RGB da cidade de Oberpfaffenhofen, sul da Alemanha, adquirida pelo E-SAR (Radar SAR aero embarcado do DLR), que considera HH (azul), HV (vermelho) e VV (verde).

Adaptado de COSTA (2019).



Figura 20: Imagem óptica adquirida por um satélite do Google Earth.

Fonte: Google Earth.

A análise apresentada é apenas um exemplo do potencial de extração de informações a partir de uma imagem SAR. Um relatório técnico específico poderia ilustrar, a exemplo, uma análise de aplicações SAR focadas em agricultura, mineração, ou entre tantas outras áreas de interesse, conforme já mencionado no Subitem 2.2.

2.7. POLARIMETRIA

Outro ponto que necessita ser esclarecido são as cores empregadas em algumas imagens SAR.

Conforme mostrado no algoritmo de reconstrução de uma imagem SAR, apresentado na

Figura 17, a imagem final apresenta cores em tons de cinza, branco e preto.

Mas, um recurso denominado polarimetria permite atribuir falsas cores que, muitas vezes, fazem com que a imagem fique muito próxima de uma aquisição óptica, principalmente nos dias atuais, quando a tecnologia já permite imagens SAR com resolução submétrica.

Considere que cada pixel de uma imagem SAR é formado pelo resultado do processo de retroespalhamento de uma onda radar que atinge o alvo. Se o radar estiver transmitido uma onda com polarização horizontal, o retroespalhamento irá ocorrer de acordo com a interação desta onda com os parâmetros mecânicos e químicos do alvo para aquele tipo de incidência. Se a incidência for de uma onda verticalmente polarizada, o espalhamento ocorrerá de outra forma diversa, gerando sinais ecos com outras informações sobre a região de incidência (VILLAÇA, 2008).

Logo, considerando que o transmissor radar transmita ondas com polarizações horizontal (H) e vertical (V), e que o receptor radar seja capaz de alternar a recepção de forma revezada, um conjunto de imagens SAR, ou canais, pode ser obtido por um sensor denominado completo ou Full-POL, sendo elas HH, HV, VH e VV, onde a primeira letra equivale à polarização transmitida e, a segunda, a polarização recebida.

Finalizado o processamento, chega o momento de reunir as imagens, quando são atribuídas cores para cada uma destas imagens. A exemplo da Figura 19, tem-se HH (azul), HV (vermelho), and VV (verde). O resultado é uma composição RGB, falsa cor, trazendo para a imagem SAR um realismo geralmente obtido apenas em imagens ópticas.

Existem ainda outras técnicas de transmissão e recepção que permitem emular canais ausentes em sistemas mais simples.

Um exemplo é a polarimetria compacta (COSTA, 2019). Um sistema SAR de menor porte, no qual não se tenha todos os canais polarimétricos (HH, HV, VH, VV), pode empregar, por exemplo, uma transmissão de ondas com polarização circular e receber a onda em uma das polarizações tradicionais H ou V. Por

fim, por meio de algoritmos dedicados, torna-se possível gerar uma imagem *Full-POL* ainda que não tenha se empregado quatro canais para a transmissão e recepção.

Além destes recursos, técnicas de decomposição de alvos, segmentação, classificação, entre outras deram nova dimensão à polarimetria, permitindo aos analistas uma análise mais específica de cada mecanismo espalhador de interesse existente nas imagens.

Hoje é possível analisar imagens SAR com foco na atividade de interesse do cliente com muito mais subsídios do que nos primeiros anos de emprego do sensor. Isto gera imagens e avaliações mais precisas que se revertem para os interessados. Um exemplo é o emprego de SAR na agricultura de precisão.

Como conclusão do subitem de polarimetria, ressalta-se que um projeto CubeSat 12U não comporta recursos polarimétricos devido ao tamanho extremamente reduzido da plataforma.

2.8. TECNOLOGIA InSAR

Entre outras tecnologias relevantes que utilizam SAR, a InSAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*) é muito eficaz para o monitoramento de longo prazo da superfície terrestre. Consiste na aplicação da técnica de interferometria em imagens obtidas por satélites SAR. Como o próprio nome sugere, técnicas de interferometria utilizam o fenômeno de interferência de duas ou mais ondas eletromagnéticas para medir distâncias a partir da diferença de fase dessas ondas. Distâncias medidas pelo radar são precisas em ordens de grandeza correspondentes a frações do comprimento de onda utilizado, o que pode equivaler a milímetros em movimentações do solo.

Ademais, o método se mostra vantajoso em relação ao imageamento no óptico, uma vez que aplica comprimentos de onda na faixa de micro-ondas, capazes de atravessar nuvens e tempestades, permitindo seu funcionamento independentemente de condições atmosféricas. Com a utilização de diversos comprimentos de onda, também é possível transpor vegetação e colher informações relativas à umidade do solo. Dependendo do comprimento de onda utilizado, a gama de aplicações pode variar. A Tabela 2 apresenta informações técnicas e possíveis aplicações para determinadas bandas e comprimentos de onda.

Tabela 2: Exemplos de aplicações de micro-ondas no sensoriamento remoto.

Banda	Comprimento de onda (cm)	Frequência (GHz)	Exemplos de Aplicação
P (UHF)	100 - 30	0,3 - 1	Arqueologia e corpos subterrâneos
L	30 – 15	1 - 2	Superfície e umidade do solo
S	15 – 7,5	2 - 4	Estrutura de vegetação
C	7,5 – 3,8	4 - 8	Estrutura de vegetação, movimento da superfície do solo
X	3,8 – 2,4	8 – 12.5	Identificação de deslizamentos de terra
Ku	2,4 – 1,67	12,5 - 18	Identificação de subsidência e deslizamentos de terra

Fonte: www.balamis.com/technology

A formação de uma imagem por meio de interferometria pode ser feita com diferentes técnicas. Inicialmente, é feita uma análise dos sinais de radar recebidos por duas antenas SAR localizadas em posições diferentes no espaço (Figura 21a), ou por uma única antena em momentos e posição diferentes (Figura 21b). Com esses sinais, são criadas imagens de amplitude e fase, armazenadas como imagens complexas, as quais constituem o par interferométrico. A técnica InSAR permite a geração de uma nova imagem, da qual cada pixel é formado pela diferença de fase entre os pixels correspondentes nas duas imagens originais. Uma vez que as posições e os instantes da(s) antena(s) reponsável(veis) pela obtenção dos sinais originais são conhecidos, é possível converter essa diferença de fase em diferença de altitude. Assim, a construção de modelos digitais de superfície pode ser gerado através da interferometria por radar de abertura sintética.

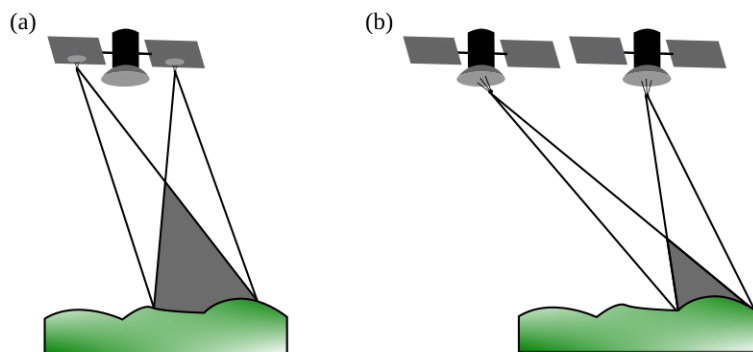


Figura 21: Exemplo de imagens obtidas por fontes diferentes no mesmo instante (a) e fonte única em instantes diferentes (b).

Fonte: Elaboração própria

3. CubeSats SAR

3.1. INTRODUÇÃO

Um CubeSat SAR consiste em uma plataforma com múltiplas unidades cúbicas de dimensões 10 x 10 x 10 cm, dotado de uma carga útil SAR.

De acordo com o apresentado na Tabela 3, os primeiros sistemas espaciais consistiam em grandes espaçonaves comportando massas que alcançavam até cerca de 3 toneladas. Tratavam-se de sistemas extremamente complexos, de massa considerável, para ser lançados em órbita, o que, por fim, tornava as missões espaciais SAR de alto custo.

Mas, com o avanço tecnológico, a miniaturização de sistemas e a opção por faixas de menor comprimento de onda, mais especificamente com o uso da banda X, foi possível reduzir as plataformas para pequenos satélites de massa inferior a 500 kg.

Em anos recentes, conforme apresentado no Subitem 4.2, empresas conseguiram reduzir significativamente as dimensões de sistemas espaciais SAR, sem perder a capacidade de entregar aos usuários insumos relevantes e com alto valor tecnológico e comercial agregados.

No entanto, sistemas espaciais de grande porte não foram extintos das mesas de projeto, tendo em vista que algumas necessidades dos usuários ainda carecem do emprego de faixas de frequência nas quais somente sistemas de maior massa podem atender. Logo, a perspectiva é de que a tecnologia de satélites SAR se bifurque em grandes e pequenos satélites no futuro.

3.2. CubeSats SAR

Em termos conceituais, CubeSats passam pelo mesmo processo de projeto e empregam os mesmos conceitos da tecnologia radar utilizada em satélites de grande e pequeno porte (PAEK et al., 2020).

Em função das limitações de emprego da antena e da necessidade de comportar em sua estrutura módulos capazes de serem acondicionados nas pequenas dimensões de um cubo, algumas soluções se tornam, com a atual tecnologia, ainda difíceis de serem implementadas.

Recursos de polarimetria completa (*Full-POL*), por exemplo, requerem a capacidade de transmissão de ondas eletromagnéticas polarizadas horizontalmente e verticalmente, o que se torna um desafio para engenharia equacionar em pequenos espaços.

Antenas de grande não são compatíveis com CubeSats, embora soluções infláveis ou desdobráveis possam compor objeto de estudos preliminares.

Satélites menores que 100 kg, ou microsatélites, até então, são capazes de transmitir e receber em uma única polarização (*Single-POL*), simplificando o sistema de uma forma geral e tornando possível o desenvolvimento em classes "U".

Outro problema é a questão da potência necessária à transmissão da onda radar que requer, no mínimo, 100 W, o que implica uma antena de no mínimo 39 dB de ganho.

Em função da alta frequência da banda Ka, a onda eletromagnética pode sofrer interferências ainda na atmosfera antes mesmo de atingir ao solo. Isto faz com que um dos empregos de CubeSats SAR possa se dar na área de meteorologia, auxiliando na identificação de massas atmosféricas volumosas.

Outras aplicações são possíveis considerando uma atmosfera menos densa e focando em alvos que não estejam localizados em profundidade, ou seja, abaixo de vegetação e outros tipos de cobertura.

Por fim, os projetos de CubeSats SAR ainda são considerados preliminares e focados em pesquisa e desenvolvimento, a exemplo da missão RainCube conduzida em poucos meses pela NASA/JPL.

4. PRINCIPAIS FONTES DE INFORMAÇÕES SOBRE SAR

4.1. REVISTAS CIENTÍFICAS E EVENTOS

Conhecer as principais fontes de informação sobre um determinado tema é vital para o sucesso de um projeto que busca inovar e ter sucesso, tanto na geração de conhecimento quanto no mercado. Por essa razão, buscou-se identificar quais são as principais fontes de publicações técnico-científicas que abordam a utilização da tecnologia SAR em satélites.

Para a busca de fontes internacionais mais relevantes, foi utilizado o acervo das duas bases de publicações científicas com maior prestígio e mais utilizadas, a base Scopus e Web of Science (WoS). Foram selecionados nos últimos 10 anos (2013 a 2022) os 400 artigos mais citados tanto em revistas quanto em conferências internacionais.

Nas Figura 22 e Figura 23, são apresentadas, por acervo, as vinte revistas científicas com os maiores conjuntos de artigos dentre os mais citados, assim, mostrando as que possuem maior impacto no meio acadêmico.

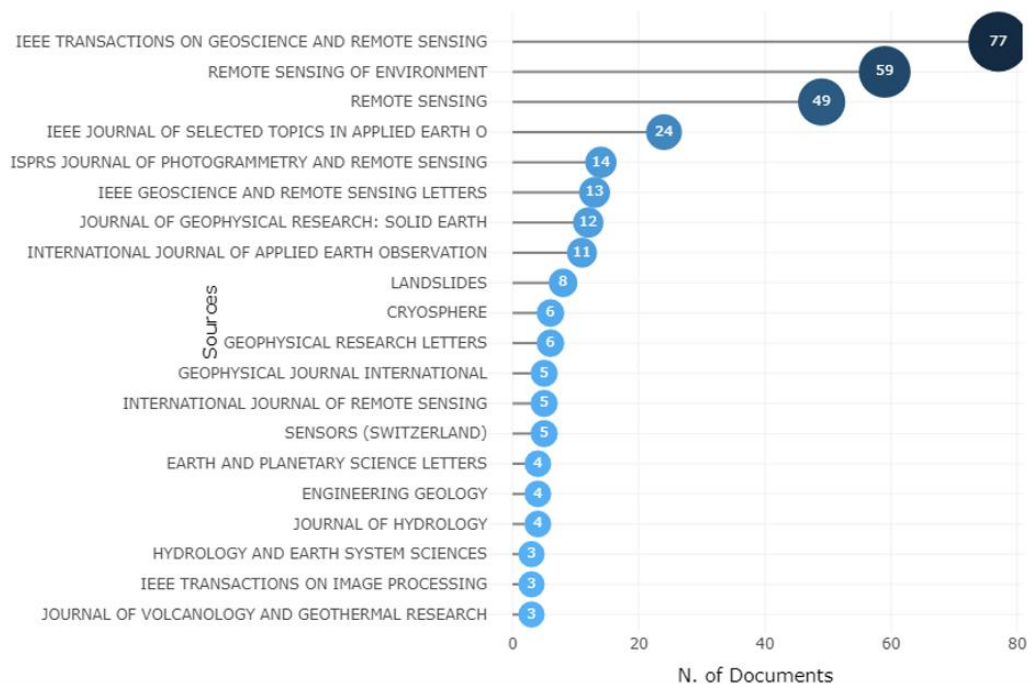


Figura 22: Revistas internacionais mais relevantes (Scopus).

Fonte: Elaboração própria

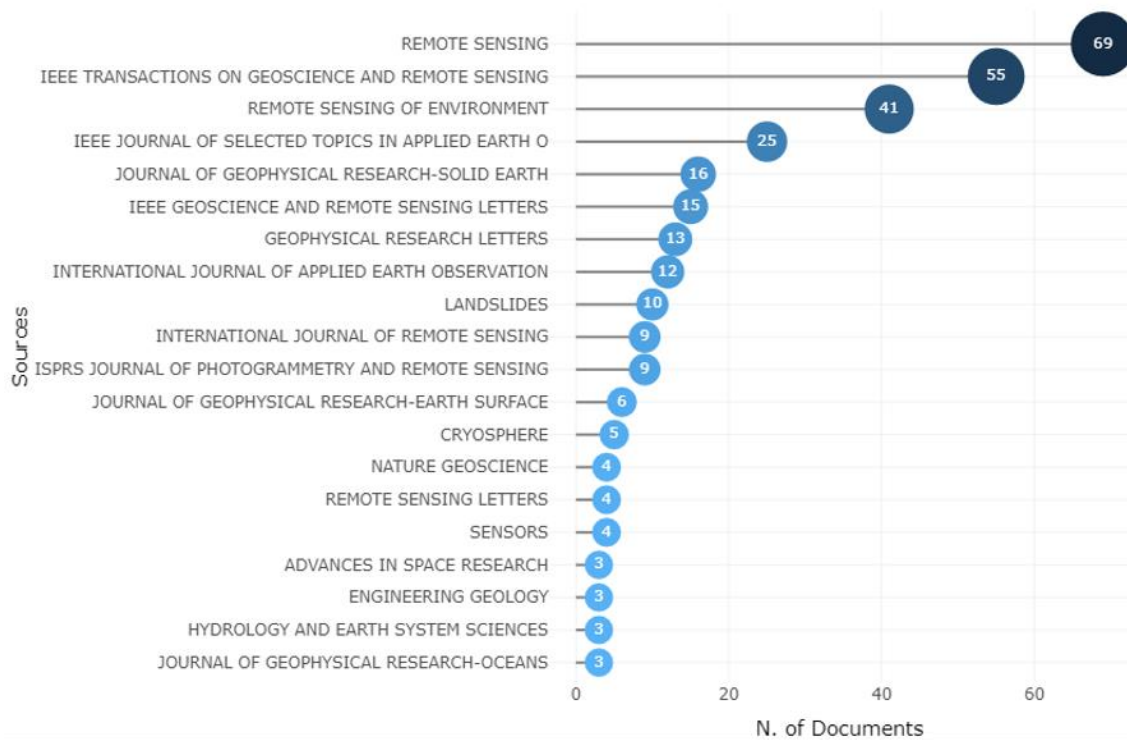


Figura 23: Revistas internacionais mais relevantes (WoS).

Fonte: Elaboração própria

No Anexo C, são apresentadas as revistas em forma de tabela (Tabelas C-5 e C-6).

Para as conferências internacionais foi utilizado o mesmo procedimento. Nas Figura 24 e Figura 25 são apresentadas os eventos organizados por acervo.

Na pesquisa das fontes nacionais, também se optou por buscar inicialmente nas bases Scopus e WoS, porém, somente foram encontrados trabalhos em publicações nacionais na primeira. Além disso, foram buscadas as instituições com trabalhos de mestrado e doutorado na área, utilizando o acervo da CAPES.

Na Figura 26 (Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10) são apresentadas as fontes com maior quantidade de publicações, sem restrição de período, pela base Scopus.

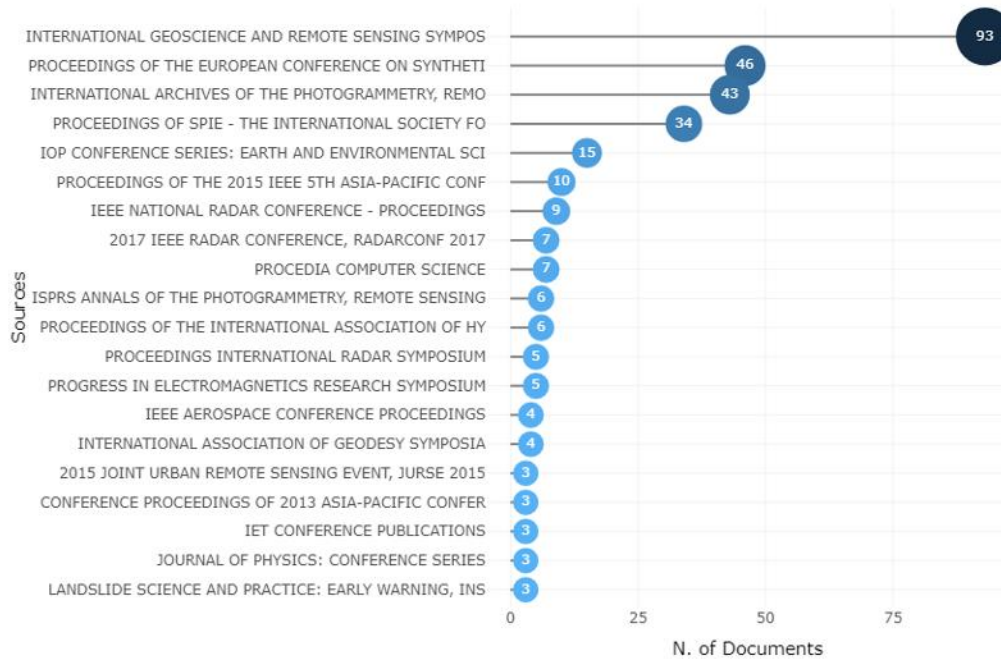


Figura 24: Conferências Internacionais mais relevantes (Scopus).

Fonte: Elaboração própria

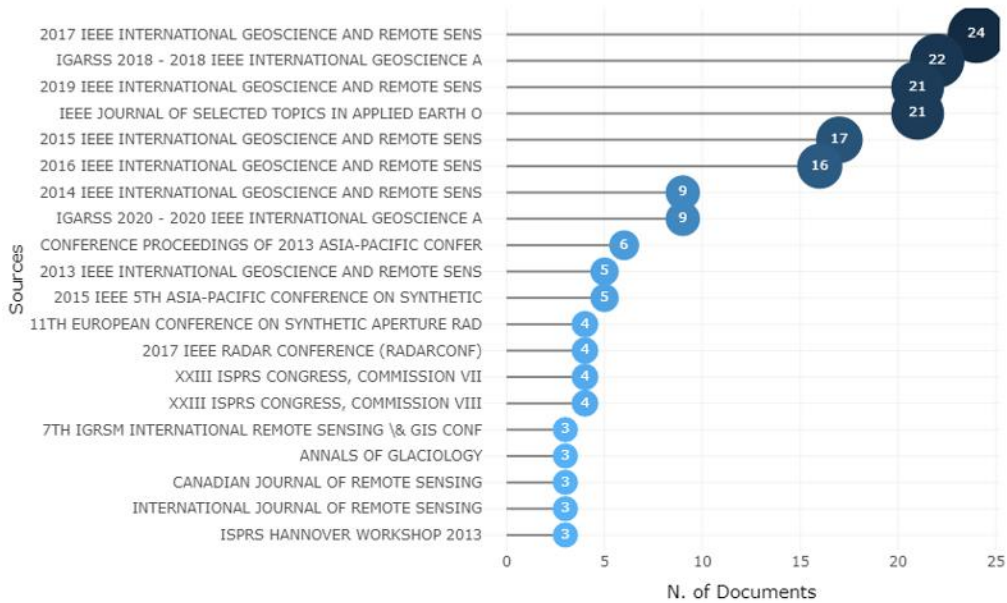


Figura 25: Conferências internacionais mais relevantes (WoS).

Fonte: Elaboração própria

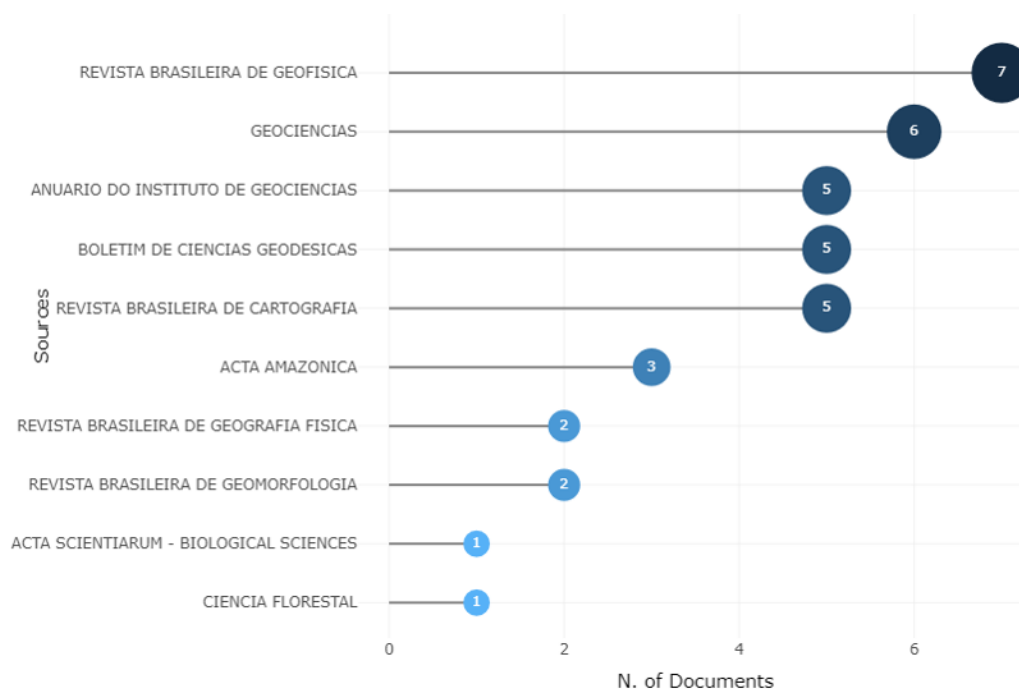


Figura 26: Revistas brasileiras com maior número de artigos.

Fonte: Elaboração própria

Na Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 são apresentadas as instituições no Brasil com maior número de publicações quando realizada a busca no acervo da CAPES por “radar de abertura sintética”.

Cabe destacar o percentual de 45% de trabalhos nas grandes áreas do conhecimento ciências agrárias e ciências exatas e da Terra e apenas 5% dos trabalhos sendo gerados no âmbito da engenharia aeroespacial, demonstrando o baixo número de pesquisas no componente operacional segmento espacial no Brasil.

Ainda, existem no Brasil alguns eventos científicos nos quais é possível encontrar trabalhos abordando o uso de sistemas SAR: o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR/INPE), o Simpósio Brasileiro em Computação Gráfica e Processamento de Imagens (SIBGRAPI), o Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE/ITA).

Há, ainda, um evento privado organizado pela empresa MundoGeo que reúne diversos expositores em áreas que abordam a tecnologia SAR, como

sensoriamento remoto. O nome do evento é MundoGeo Connect e ocorre de forma simultânea a outros eventos de assuntos correlatos, o SpaceBR Show e o Droneshow, todos os anos, na capital paulista.

4.2. Mercados

O mercado de imageamento, com a utilização da tecnologia SAR embarcada em sistemas espaciais, pequenos satélites de forma mais específica, vem crescendo e se tornando altamente competitivo. A usabilidade dessas tecnologias em casos como a invasão da Ucrânia pela Rússia, em 2022, trouxe maior atenção para o setor.

De forma geral, há um número crescente de startups no setor, estando algumas em um nível de maturidade mais elevado e já passaram por rodada de investimento série D, com investimentos acima dos R\$ 5.000.000,00, de acordo com a Associação Brasileira de Startups.

Dentre as empresas do setor espacial que têm relevância no desenvolvimento de satélites pequenos com a tecnologia SAR estão:

- ✓ Capella Space – com 2 satélites comerciais já lançados, o Denali (massa menor que 40 kg) e o Sequoia (112 kg), também atua em defesa e inteligência, vigilância marítima e resposta a desastres naturais;
- ✓ ICEYE – com o registro até janeiro de 2022 de 21 satélites, incluindo a constelação CARCARÁ, mencionada no subitem 1.2.2;
- ✓ Surrey – empresa britânica, está no mercado de pequenos satélites há mais de 40 anos e possui diversas outras capacidades, dentre elas o desenvolvimento dos satélites do sistema de navegação Galileo;
- ✓ Synspective – considerada uma das maiores startups japonesas, já desenvolveu e está operando 2 satélites com a tecnologia SAR e prevê uma constelação de até 30 satélites até o final dos anos de 2020;

- ✓ UMBRA – busca entregar aos seus clientes imagens de altíssima resolução, 15cm, possui um sistema próprio de solicitação de imagens, com a promessa de ser “tão fácil quanto reservar um hotel”, e também tem a capacidade de desenvolvimento de satélites de sensoriamento de RF; ?
- ✓ PradaSAR – fundada em 2019, tem a perspectiva de lançar seu primeiro satélite em outubro de 2022 e tem como seu principal cliente o National Reconnaissance Office.
- ✓ Pumpkin Space System – focada no fornecimento de componentes para nanosatélites, vem ganhando espaço na fatia do mercado com a comercialização de itens fundamentais para o desenvolvimento de missões orbitais de pequeno porte, focadas no New Space.

Além dessas startups, há empresas de maior porte como a canadense MDA Ltda. Ela, inclusive, provê serviço para a EMBRAPA no Brasil, além de diversos outros países, e possui uma constelação de 3 satélites denominada RADARSAT Constellation Mission (RCM).

A MDA possui, ainda, acordos de integração tecnológica junto com a empresa ICEYE para sua próxima constelação denominada CHORUS,

5. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

5.1. HORIZONTE PARA OS PRÓXIMOS ANOS

Na Tabela 11 são mostradas as principais universidades que desenvolvem trabalhos sobre o uso de sistemas SAR.

O INPE e o ITA são sediados em São José dos Campos, SP, e são as duas principais instituições que desenvolvem pesquisas sobre o tema. O INPE desenvolve pesquisas na área espacial e de sensoriamento remoto há décadas. Possui atualmente programas que produziram conhecimento sobre o sistema de interesse deste estudo, o de sensoriamento remoto e computação aplicada. Com uma trajetória conhecida no setor de aeronáutica, o ITA possui um curso de graduação em engenharia aeroespacial e um programa de pós-graduação em ciências e tecnologias espaciais, além de outros programas que também contribuem para o desenvolvimento de tecnologias para sistemas SAR.

Outras universidades vêm produzindo conhecimento e mostram uma grande foco no que tange ao processamento e análise dos dados gerados pela aplicação de um sistema SAR. São elas: Universidade de Brasília nos programas de geociências aplicadas, geologia e engenharia elétrica no sentido de análise e processamento de imagens; Universidade Federal do Ceará, nas engenharias de teleinformática e elétrica; Universidade Federal do Rio de Janeiro, nas engenharias civil e oceânica; Universidade Estadual de Campinas, nas engenharias elétrica e agrícola e em geociências; Universidade Federal de Pernambuco, na estatística e ciências da computação; Universidade do Estado do Rio de Janeiro na Engenharia Mecânica; Universidade Federal do Pará, em geologia e geoquímica; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na engenharia elétrica; Universidade Federal do Amazonas, na informática e ciências florestais e ambientais; Universidade Federal de Feira de Santana, em modelagem em ciências da Terra e do ambiente; Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, em Ciências Cartográficas; Universidade Federal de Alagoas, em modelagem computacional e do conhecimento; Universidade Federal de Lavras, em engenharia agrícola; Universidade Federal de Minas

Gerais, em geografia; Universidade Federal de São Carlos, em ciência da computação; e Universidade Federal de Viçosa, em engenharia agrícola.

Vale ressaltar que a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) produziu, no programa de engenharia elétrica, estudos sobre projetos de antenas para radares de abertura sintética.

Com isso, é possível afirmar que, em se tratando de tecnologia e experiência para desenvolvimento de um satélite SAR, as instituições que podem contribuir na viabilização de um sistema espacial nos próximos cinco anos são o INPE, o ITA e a Unicamp. Aqui não foram considerados estudos de outros sistemas que trazem consigo um conhecimento passível de ser aproveitado no desenvolvimento de um SAR, porém, este fato, quando se pensar em projetos mais longos, deve ser considerado.

Ainda pensando no curto prazo (aqui definido como cinco anos) há diversas iniciativas de empresas internacionais para lançamento de satélites SAR, incluindo a possibilidade de fomento do mercado nacional no desenvolvimento desse sistema, devido a chegada de empresas de outras nacionalidades no Brasil. A ICEYE, no momento, estabeleceu o Brasil como hub para a América Latina para negociação de contratações de fornecimento de sistemas de imageamento radar que podem ser operados de forma independente ou pela própria ICEYE.

A chegada dessa startup no país abre a oportunidade para vinda de outras empresas do exterior e para a transferência de unidades delas para o Brasil, tanto para o desenvolvimento de um sistema nacional, quanto para que a integração dos sistemas aqui, ou o fornecimento de componentes nacionais para as empresas.

Com isso o mercado nacional começa a se aquecer mais. Além da oportunidade frente à chegada de empresas internacionais, há o desenvolvimento de sistemas espaciais para outros fins e com outras tecnologias que capacitam recursos humanos e instituições e abram a possibilidade para o desenvolvimento de um satélite com a tecnologia SAR embarcada.

Já para os próximos cinco anos, vislumbra-se um potencial relevante de empresas como a Visiona Tecnologias Espaciais, Orbital Engenharia, Fibraforte, Opto Tecnologia Optrônica, Equatorial Sistemas e Kryptus Segurança da Informação ganharem fôlego por meio de subvenções econômicas, com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia (MCTI) e da AEB, implementadas pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) na área de pequenos satélites, permitindo a elas participarem mais ativamente do mercado de pequenos satélites.

Se tratando ainda de capacitação para sistemas espaciais, há outras iniciativas, de nanossatélites educacionais, que capacitaram instituições brasileiras, como a Universidade de Brasília (UnB), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade de São Paulo (USP) e a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ).

Há também a iniciativa Constelação Catarina que tem a UFSC e o SENAI à frente do desenvolvimento. Ela é um conjunto de sistemas espaciais que se baseia no uso de nanossatélites, e que atenderá, prioritariamente, aos setores agropecuário e de defesa civil nacionais, de maneira a contribuir para a agenda de desenvolvimento socioeconômico sustentável do País. A primeira frota, composta por quatro nanossatélites, será lançada nos próximos 5 anos.

Agora, especificamente sobre o desenvolvimento nacional de radares de abertura sintética, há a empresa Radaz. Atualmente ela se apresenta amadurecida na utilização de sua tecnologia e já comercializa seu radar embarcado em drones, o Explorer RD350. Assim, se prova uma instituição que já domina a tecnologia, mostrando ser uma possibilidade embarcar seus radares em um sistema espacial.

Finalmente, pode-se visualizar que é uma realidade o crescimento do mercado de desenvolvimento de sistemas espaciais com tecnologia SAR e há no Brasil a possibilidade de desenvolvimento de componentes ou um sistema completo, bastando encontrar as interseções entre as capacidades que o país já tem e as lacunas do mercado nacional e internacional a serem preenchidas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia SAR na área espacial apresenta oportunidades importantes para o Brasil em vários aspectos. O primeiro deles tem a ver com as aplicações espaciais que se utilizam dessa tecnologia. Em um país de grandes dimensões como o Brasil, que necessita de vigilância constante de seu território, a tecnologia SAR se apresenta como uma das soluções mais interessantes. Tomando como exemplo a necessidade de vigilância da Amazônia, que é uma região extensa e que, devido à alta cobertura de nuvens durante épocas do ano, apresenta dificuldade para o imageamento com satélites ópticos, a tecnologia SAR é altamente atraente. Com ela, regiões encobertas por nuvens podem ser observadas. E um fator crucial da tecnologia SAR é capacidade que ela oferece de obtenção de imagens da superfície terrestre durante a noite. A tecnologia fornece outros benefícios, como a obtenção de informações sobre elevação, rugosidade e níveis de umidade do solo. Tais capacidades fazem com que seja possível monitorar continuamente o território brasileiro e obter várias informações de interesse nacional.

O segundo deles tem a ver com o aspecto econômico, já que essa tecnologia tem um potencial enorme de gerar recursos financeiros e promover o desenvolvimento de empresas que gerem produtos com alto valor agregado e ofereçam empregos de qualidade.

O Brasil possui conhecimento teórico tanto no que diz respeito à tecnologia em si quanto à aplicação dessa tecnologia nas áreas de sensoriamento remoto e defesa. No entanto, o domínio desses campos precisa ser mais estimulado. Por exemplo, em relação à situação da produção bibliográfica técnico-científica, o Brasil possui uma produção de ~1,5% da produção mundial de artigos técnico-científicos, o que é abaixo da média apresentada em outras áreas do conhecimento (~2,5%). Já em relação à situação tecnológica do Brasil em relação ao mundo, nenhuma patente em SAR depositada no Brasil foi encontrada em *Derwent Innovations Index*. Apesar de alguns artigos com coautores brasileiros serem citados, o Brasil não possui depósitos de patentes no contexto de SAR, naquela base. No restante do mundo, o número de patentes relacionadas a SAR não é

grande, mas o tema apresenta alta significativa nos últimos 10-15 anos. Por outro lado, o campo das aplicações espaciais apresenta um desempenho melhor no que diz respeito à produção bibliográfica.

Em relação a tendências científica e tecnológica, a adoção da tecnologia SAR tem sido amplamente vista em satélites para aplicações comerciais e governamentais. Várias empresas e governos têm apostado em melhorias na tecnologia, fornecendo imagens de alta resolução e com grande qualidade a baixos custos. E os pequenos satélites têm se mostrado como uma plataforma apropriada para este desenvolvimento.

Assim, seria interessante que houvesse uma ação induzida, por parte de entes governamentais brasileiros, para promover o desenvolvimento dos vários aspectos ligados a essa tecnologia, tanto os relacionados a hardware quanto a software, para o que Brasil possa ser um ator relevante nessa área tecnológica e aproveitar as oportunidades que se apresentam atualmente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA - AEB. **Objetos espaciais brasileiros**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/objetos-espaciais-brasileiros>. Acesso em: 6 ago. 2022.

AOKI, Y.; FURUYA, M.; DE ZAN, F.; DOIN, M. P.; EINEDER, M.; OHKI, M.; WRIGHT, T. J. L-band synthetic aperture radar: current and future applications to earth sciences. **Earth, Planets and Space**, v. 73, n. 1, p. 4–7, 2021. DOI: 10.1186/s40623-021-01363-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01363-x>.

BOGOSSIAN, O. L. **Método de auxílio à concepção de plataformas aplicadas à família de satélites**. 2012. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2012.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **DCA 400-6: Ciclo de vida de sistemas e materiais da aeronáutica**. Brasília, DF, 2007.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. **MD20-S-01: Programa estratégico de sistemas espaciais (PESE)**. 1a Edição. Brasília, DF, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md20a_sa_01a_programaa_est_rategicoa_dea_sistemasa_espaciaisa_pesea_ed-2018.pdf. Acesso em: 15 out. 2022.

CANTAFIO, L. J. **Space-based radar handbook**. Norwood, MA: Artech House Radar Library, 1989.

CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE. **Alternatives for military space radar**. Washington, DC: CBO, 2007.

COSTA, M. M. da S. **Compact polarimetry reconstruction algorithm for a geophysical media with volumetric scattering using L-Band quad-pol data**. 2019. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologias Espaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2019. Disponível em: <http://www.bdita.bibl.ita.br/>. Acesso em: 20 out. 2022.

COSTA, M. M. da S.; FERNANDES, D. Análise do emprego de uma constelação de pequenos satélites SAR em Vigilância marítima . *In*: XVI SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA - XVI SIGE 2014, São José dos Campos. **Anais** [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2014. p. 90–95. DOI: 10.13140/2.1.1709.7283. Disponível em: http://www.sige.ita.br/anais/XVISIGE/pdf/ST_6_3.pdf.

COSTA, M. M. da S.; PASSARO, A. Trends for spaceborne synthetic aperture radar for earth-observation. *In*: ANAIS DO XVII SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES

OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA - XVII SIGE 2015, São José dos Campos. **Anais** [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1175.4720. Disponível em: <http://www.sige.ita.br/>.

EMBRAPA. **Seringueira**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrossilvipastoril/sitio-tecnologico/trilha-ecologica/especies/seringueira>. Acesso em: 23 out. 2022.

EOPORTAL DIRECTORY. **Satellite missions directory - earth observation missions**. 2022. Disponível em: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>. Acesso em: 5 ago. 2022.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. **PolSARpro v6.0 (Biomass Edition) toolbox**. 2022. Disponível em: <https://step.esa.int/main/toolboxes/>.

FLORES, A.; HERNDON, K. E.; THAPA, R. B.; CHERRINGTON, E. **The SAR handbook: comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation**. [S.l.]: NASA, 2019. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002563/downloads/20190002563.pdf>. Acesso em: 12 set. 2022.

FRANCESCHETTI, G.; LANARI, R. **Synthetic aperture radar processing**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.

GARESTIER, F.; TOAN, T. L.; DUBOIS-FERNANDEZ, P. Forest height estimation using P-band Pol-InSAR data. **Proc. of Pol-InSAR**, n. 3, p. 2–6, 2007.

GOLKAR, A.; SALADO, A. Definition of new space—expert survey results and key technology trends. **IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems**, v. 2, n. 1, p. 2–9, 2020. DOI: 10.1109/jmass.2020.3045851.

HUBER, S. **Spaceborne SAR systems with digital beamforming and reflector antenna**. 2013. [S. l.], 2013. Disponível em: <http://elib.dlr.de/93187/>. Acesso em: 4 mar. 2015.

ICEYE. **A revolution in synthetic aperture radar (SAR) data earth observation: simple access to global, high-resolution SAR data to meet your demanding needs**. Nagoya, Japan, 2022, p. 1–16. Disponível em: https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/SAR_Data_Brochure_ICEYE.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

ICEYE. **Buy ICEYE SAR satellites rapidly delivered: take full control of your missions with the world's only high-performance sar satellite system**. Mount Shasta, California, 2022. Disponível em: https://www.iceye.com/hubfs/_DATA_AND_MISSIONS/Missions_Brochure_ICEYE.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

ILARIA PANNACCIONE APA, M.; SANTOVITO, M. R.; PICA, G.; CATAPANO, L.; FORNARO, G. Use of the SAR (Synthetic Aperture Radar) P band for detection of

the Moche and Lambayeque canal networks in the Apurlec region, Perú. **Geophysical Research Abstracts**, v. 18, p. 18166, 2016. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016EGUGA..1818166I/abstract>. Acesso em: 20 set. 2022.

LEE, J.-S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Boca Raton: CRC Press, 2009a.

LEE, J.-S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Boca Raton: CRC Press, 2009b.

LIMA, F. L. L. U. **Demandas nacionais do setor espacial**. 2018. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Planejamento e Estratégias de Desenvolvimento) - Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/3503/1/Fernanda%20Lins%20L.%20Uchoa%20de%20Lima.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2022.

MACCHIARULO, V.; MILILLO, P.; BLENKINSOPP, C.; REALE, C.; GIARDINA, G. Multi-temporal InSAR for transport infrastructure monitoring: recent trends and challenges. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering**, 2021. DOI: 10.1680/jbren.21.00039.

MIREAULT-LECOURT, C.; PELLETIER, E. C.; LAURIN, J. J. Study of a SAR mission onboard a 12U CubeSat using the reflectarray technology. *In: 2021 IEEE 19th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANTENNA TECHNOLOGY AND APPLIED ELECTROMAGNETICS, ANTEM 2021*. 19., 2021. Winnipeg, MB, Canada. **Proceedings** [...]. Winnipeg, MB, Canada: IEEE, 08-11 August, p. 4–5, 2021. DOI: 10.1109/ANTEM51107.2021.9518994.

MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA, P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K. P. A tutorial on synthetic aperture radar. **Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE**, n. 1, p. 6–43, 2013. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6504845>. Acesso em: 05 mar. 2022.

NASA. **Apollo 17 mission report**. [s.l: s.n.].

NASA. **PIA18137**: NASA's seasat satellite shows Massachusetts coast. 2014. Disponível em: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA18137>. Acesso em: 5 ago. 2022.

NASA. **PIA01766**: Space radar image of Kliuchevskoi Volcano, Russia. 1999. Disponível em: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01766>. Acesso em: 1 set. 2022.

NASA. **Space radar image of Kiluchevskoi, Volcano, Russia**. 2009. Disponível em: <https://archive.org/details/VE-IMG-432>. Acesso em: 22 set. 2022.

NASA. **What is a synthetic aperture radar?** 2022. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>. Acesso em: 6 ago. 2022.

NATALE, A.; GUIDA, R.; BIRD, R.; WHITTAKER, P.; COHEN, M.; HALL, D. Demonstration and analysis of the applications of S-band SAR. *In: 2011 3rd INTERNATIONAL ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, APSAR 2011. 3., 2011. Seoul, Korea. Proceedings [...]. Seoul, Korea: IEEE, 26-30 September, p. 167–170, 2011.*

NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY - NGA. Geospatial intelligence (GEOINT) Basic doctrine. [S. l.], p. 51, 2006. Disponível em: [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geospatial+Intelligence+\(GEOINT\)+Basic+Doctrine#3](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geospatial+Intelligence+(GEOINT)+Basic+Doctrine#3). Acesso em: 02 jul. 2022.

O'BRIEN, O.; CHESHIRE, J. **InSAR ground deformation map**. 2018. Disponível em: <https://mappinglondon.co.uk/2018/insar-ground-deformation-map/>. Acesso em: 22 set. 2022.

PEYTON Z. P. **Radar principles**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998.

PHILLIPS, R. J., G. F. ADAMS, W. E. BROWN, JR., R. E. EGGLETON, P. L. JACKSON, R. JORDAN, W. I. LINLOR, W. J. PEEPLES, L. J. PORCELLO, J. RYU, G. SCHABER, W. R. SILL, T. W. THOMPSON, S. H. WARD, AND J. S. ZELENKA. **Apollo lunar sounder experiment**, NASA Spec. Publ., 330(22), 1–26, 1973.

SILVA, A. de Q. da. **Avaliação de imagens sar no mapeamento de crostas lateríticas do depósito N1 província mineral de Carajás, Pará**. 2010. 261 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2010.

SKOLNIK, M. I. **Introduction to radar systems**. Third Edit. New York, NY: McGraw-Hill, Inc., 2001.

TRAINING, F. ECSS-M-ST-10C Rev. 1 - Space project management - project planning and implementation. **Management**, n. April, p. 1–10, 2003.

VAN DER SANDEN, J. J.; BUDKEWITSCH, P.; FLETT, D.; LANDRY, R.; LUKOWSKI, T. I.; McNAIRN, H.; PULTZ, T.J.; SINGHROY, V. Applications potential of planned C-band SAR satellites: leading to RADARSAT-2. *In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS). 2001 Sydney, NSW. Proceedings [...]. Sydney, NSW: IEEE, 09-13 July, p. 488–492, 2001. DOI: 10.1109/igarss.2001.976199.*

VILLAÇA, D. D. **Classificação de imagens SAR utilizando a resposta polarimétrica**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.

WERTZ, J. R.; EVERETT, D. F.; PUSCHELL, J. J. **Space mission engineering - the new SMAD**. New York: Microcosm Press, , 2011.

WILEY, C. A. **Pulsed doppler radar methods and apparatus**, US3196436 A, 1965.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Boca Raton, FL: Book, CRC Press, 2006.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mercado de satélites SAR.....	11
Figura 2: Princípio Radar.	13
Figura 3: Resolução Radar.....	15
Figura 4: <i>Lunar sounder</i> . Fonte: PHILLIPS et al. (1973)	17
Figura 5: Imagem <i>SEASAT</i> da Costa de Massachusetts, EUA. Créditos: NASA/JPL- Caltech/ <i>Alaska Satellite Facility</i> (NASA/JPL-CALTECH/ALASKA SATELLITE FACILITY, 2014).	19
Figura 6: Imagem, obtida pelo satélite ICEYE, do Estado do Acre. Fonte: ICEYE.	22
Figura 7: Penetração da onda eletromagnética SAR em relação ao comprimento de onda. Crédito: adaptada de (FLORES et al., 2019).	27
Figura 8: Relação entre frequência f , a parte real ϵ_r' , e a parte imaginária ϵ_r'' da constante dielétrica de solos como a areia, o lodo e a argila. Crédito: FLORES et al. (2019).	28
Figura 9: Imagem óptica da erupção do vulcão Kliutchevskoi, localizado na península de Kamchatka, Rússia, ocorrida em 30 de setembro de 1994. Fonte: NASA/JPL.	30
Figura 10: Imagem radar da erupção do vulcão Kliutchevskoi, localizado na península de Kamchatka, Rússia, ocorrida em 30 de setembro de 1994. Fonte: NASA/JPL.	31

Figura 11: Medição das alterações de solo na cidade de Londres com emprego do Satélite TerraSAR-X. Fonte: LONDON, 2018.	32
Figura 12: Espectro eletromagnético e bandas SAR. Adaptado de (NASA, 2022).	33
Figura 13: Geometria SAR, adaptada de COSTA e PASSARO (2015).	37
Figura 14: Modo de imageamento Stripmap. Adaptado de LEE e POTTIER (2009b).	41
Figura 15: Modo de imageamento Spotlight. Adaptado de MOREIRA et al. (2013).	42
Figura 16: Modo de imageamento ScanSAR. Adaptado de MOREIRA et al., (2013).	43
Figura 17: Construção da imagem SAR. Adaptado de MOREIRA et al., (2013).	46
Figura 18: Imagem SAR (3m de resolução) da cidade de Brasília, DF. Crédito: Cortesia ICEYE.	48
Figura 19: Composição RGB da cidade de Oberpfaffenhofen, sul da Alemanha, adquirida pelo E-SAR (Radar SAR aero embarcado do DLR), que considera HH (azul), HV (vermelho) e VV (verde). Adaptado de COSTA (2019).	49
Figura 20: Imagem óptica adquirida por um satélite do Google Earth. Fonte: Google Earth.....	50
Figura 21: Exemplo de imagens obtidas por fontes diferentes no mesmo instante (a) e fonte única em instantes diferentes (b). Fonte: OTE.....	55
Figura 22: Revistas internacionais mais relevantes (Scopus).	58

Figura 23: Revistas internacionais mais relevantes (WoS).	59
Figura 24: Conferências Internacionais mais relevantes (Scopus).....	60
Figura 25: Conferências internacionais mais relevantes (WoS).....	60
Figura 26: Revistas brasileiras com maior número de artigos.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características básicas dos satélites Carcará I e II (Lessonia).	23
Tabela 2: Exemplos de aplicações de micro-ondas no sensoriamento remoto.54	
Tabela 3: Histórico de satélites SAR (DIRECTORY, 2022).....	81
Tabela 4: Satélites SAR com previsão de lançamento (DIRECTORY, 2022). .	83
Tabela 5: Designação das bandas SAR. (FLORES et al., 2019)	85
Tabela 6: Revistas internacionais mais relevantes (Scopus).	87
Tabela 7: Revistas internacionais mais relevantes (WoS).	88
Tabela 8: Conferências mais relevantes (Scopus).....	89
Tabela 9: Conferências mais relevantes (WoS).	89
Tabela 10: Publicações brasileiras com maior número de artigos.	90
Tabela 11: Teses e dissertações em instituições brasileiras.....	91

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.

LISTA DE ABREVIATURAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
CAS	<i>Chinese Academy of Sciences</i>
CAST	<i>China Association for Science and Technology</i>
CCISE	Comissão de Coordenação e Implantação de Sistemas Espaciais
CDTI	<i>Centre for the Development of Industrial Technology</i>
CEI-ITA	Centro Espacial ITA
Censipam	Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAE	<i>Comisión Nacional de Actividades Espaciales</i>
COPAC	Comissão Coordenadora do Programa Eraonave de Combate
COPE	Centro de Operações Espaciais
CRESDA	<i>China Center for Resource Satellite Data and Applications</i>
CSA	<i>Canadian Space Agency</i>
DLR	Agência Espacial Alemã
ECSS	do inglês, <i>European Cooperation for Space Standardization</i>
ESA	Agência Espacial Europeia (do inglês, <i>European Space Agency</i>)
FAB	Força Aérea Brasileira
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
INTA	<i>National Institute of Aerospace Technology</i>
KARI	<i>Korea Aerospace Research Institute</i>

LEO	Órbitas Baixas (LEO, do inglês <i>Low Earth Orbit</i>)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (do inglês <i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NST	<i>New Space Tech</i>
OTE	Observatório de Tecnologias Espaciais do CGEE
PESE	Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (MD20-S-01)
PRF	Frequência de repetição de pulso ou PRF (do inglês <i>Pulse Repetition Frequency</i>)

RADAR	Radio de Detecção e Alcance (do inglês, <i>Radio Detection And Ranging</i>)
SAR	Radare de Abertura Sintética (SAR, do inglês <i>Synthetic Aperture Radar</i>)
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SIR	do inglês, <i>Shuttle Imaging Radar</i>
TAS	<i>Thales Alenia Space</i>
WoS	do inglês, <i>Web of Science</i>

ANEXO A – MISSÕES SAR

Tabela 3: Histórico de satélites SAR (EOPORTAL DIRECTORY, 2022).

Satélite*	Ano	Agência/País	Banda	Polarização*	Resolução (m)	Massa (Kg)
SEASAT	1978	NASA/EUA	L	HH	6,25	2.290
SIR-A	1981	NASA/EUA	L	HH	7,25	2.460
SIR-B	1984	NASA/EUA	L	HH	6,13	
ERS-1/2	1991-1995	ESA	C	VV	5,25	2.400
ALMAZ-1	1991	URSS(Defesa)	S	HH	8,15	3.420
JERS-1 SAR	1992	NASDA/Japão	L	HH	6,18	1.400
SIR-C/X-SAR	1994	DLR/Alemanha ASI/Itália	X	VV	6,10	
RADARSAT-1	1995	CSA/Canadá	C	HH	8,8	3.000
SRTM	2000	NASA/EUA	C	DUAL	15,8	13.600
ENVISAT-ASAR	2002	ESA	C	DUAL	10,30	8.211
ALOS-PALSAR	2006	JAXA/Japão	L	QUAD	5,10	3.850
SAR-Lupe (5)*	2006-2008	DLR/Alemanha	X	QUAD	5,10	770
RADARSAT-2	2007	CSA/Canadá	C	QUAD	3,3	2.200
COSMO-SkyMed (4)*	2007-2010	ASI/Itália	X	QUAD	1,1	1.700
TerraSAR-X	2007	DLR/Alemanha	X	QUAD	1,1	1.230
TanDEM-X	2009	DLR/Alemanha	X	QUAD	1,1	1.230

Satélite*	Ano	Agência/País	Banda	Polarização*	Resolução (m)	Massa (Kg)
RISAT-2	2009	ISRO/Índia	X	QUAD	1,0	300
RISAT-1	2012	ISRO/Índia	C	QUAD	3,3	1.858
HJ-1-C	2012	China (CRESDA, CAST)	S	VV	5,20	
KOMPSAT-5	2013	Coreia do Sul (TAS-i, KARI)	X	QUAD	1,0	520
ALOS-2	2014	JAXA/Japão	L	QUAD	10	2.120
SENTINEL 1A/B	2016	ESA	C	DUAL	5,0	880
SEOSAR/PAZ	2018	Espanha (CDTI, HISDESAT, INTA)	X	DUAL	1,0	1.350
ICEYE (21)	2018 2022	Finlândia (Iceye company)	X	VV	1,0	80
SAOCOM- 1A/B	2019	Argentina (CONAE)	L	HH/VV	10	1.600
RCM	2019	CSA/Canadá	C	QUAD	5,0	760
COSMO- SkyMed Sec	2019- 2022	ASI/Itália	X	QUAD	0,35	810
Capella	2018- 2022	Capella Space/EUA	X	HH	0,5	107
StriX	2020	JAXA/ISAS/ Japão	X	VV	1,0	130
RISAT-1A (EOS-04)	2022	ISRO/Índia	C	QUAD	5,0	1.710
L-SAR-01A	2022	China (CAS)	L	-	-	3.200
Carcará I e II (Lessonia)(2)*	2022	MD/AEB/Brasil	X	VV	1,0	120

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4 a seguir são apresentadas algumas missões espaciais SAR com previsão de lançamento em 2022, 2024 e 2026. Não foram listadas missões ainda em fase de definição ou de comercialização.

Tabela 4: Satélites SAR com previsão de lançamento (EOPORTAL DIRECTORY, 2022).

Satélite	Ano	Agência/País	Banda	Polarização	Resolução (m)	Massa (kg)
NISAR	2022 (ASD)	NASA/ISRO	L/S	QUAD	7,0	2.800
ICEYE (27)	2022 2024	Finlândia	X	VV	1,0	120
Tandem-L	2024 (ASD)	DLR/Alemanha	L	QUAD	quad	3.000
HRWS-SAR	2026 (ASD)	DLR/Alemanha	X	QUAD	1,0	4.445

Fonte: Elaboração própria.

Obs.:

- Os números em parênteses na coluna “satélite” em algumas missões indicam a quantidade de satélites lançados. Os parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 2 serão apresentados nos itens subsequentes.
- Na descrição da coluna “polarização” foi apresentada a condição operacional mais completa, com quatro canais. Todavia, a maioria dos sistemas que possuem mais de uma polarização disponibiliza também outros arranjos possíveis. Por exemplo, o satélite ALOS-2 possui os modos de polarização simples (HH, VV, HV); polarização dual (HH+HV; VV+VH); polarização completa (HH+HV+VH+VV); e o modo experimental de polarimetria compacta (CP).
- Os valores apresentados não foram normalizados, seguindo as informações da referência (DIRECTORY, 2022).

- créditos: Prof. Dr. Waldir Renato Paradella, INPE (*in memoriam*); MACCHIARULO et al. (2021); eoPortal Directory (EOPORTAL DIRECTORY, 2022); e NASA SAR Handbook (FLORES et al., 2019).

ANEXO B – DESIGNAÇÃO DAS BANDAS SAR

Tabela 5: Designação das bandas SAR (FLORES et al., 2019).

Banda	Frequência (GHz)	Comp. de Onda (cm)	Aplicação usual
Ka	27 - 40	1,1 - 0,8	Raramente usada para SAR. Todavia, empregada no acompanhamento de aeronaves e veículos em aeroportos. Pulsos curtos com pequeno comprimento de onda permitem alta resolução em alcance.
K	18 - 27	1,7 - 1,1	Raramente usada, porém com emprego similar à banda Ka.
Ku	12 - 18	2,4 – 1,7	Raramente usada para SAR (altimetria por satélite). Porém, pesquisas indicam aplicações para CubeSats 12U (MIREAULT-LECOURT; PELLETIER; LAURIN, 2021), altimetria de satélites e monitoramento meteorológico.
X	8 - 12	3,8 – 2,4	SAR de alta resolução. Usado para monitoramento urbano, de gelo, de neve, barragem de sedimentos, agricultura de precisão, entre outros. Esta é faixa onde se encontram valores mais favoráveis para a relação entre o tamanho da antena e o comprimento de onda.
C	4 - 8	7,5 – 3,8	Faixa de maior predomínio no emprego SAR nos últimos 30 anos (<i>SAR Workhorse</i>). Aplicações em mapeamento de monitoramento de desastres (deslizamentos, a exemplo); monitoramento agrícola; monitoramento da densidade da vegetação, entre outros.
S	2 – 4	15 – 7,5	Faixa em que vem sendo incrementado o emprego para observação da Terra. Isto porque trata-se de uma faixa que possui valores intermediários de resolução espacial e penetrabilidade da onda radar. Aplicações em monitoramento agrícola, mapeamento de monitoramento de desastres (deslizamentos, a exemplo), entre outros.
L	1 – 2	30 - 15	SAR de média resolução. Empregada em monitoramento geofísico, mapeamento de

			vegetação e biomassa, alta penetração e InSAR.
P	0,3 - 1	100 - 30	SAR experimental para emprego em medidas de biomassa.

Fonte: Elaboração própria.

Observação:

Na parte inferior da tabela encontram-se as bandas Radar de baixa frequência.

Na parte superior, as frequências mais altas. Esta menção refere-se a citado no

Subitem 2.1.2 no que tange à penetrabilidade da onda eletromagnética.

ANEXO C – PUBLICAÇÕES E EVENTOS RELEVANTES

Tabela 6: Revistas internacionais mais relevantes (Scopus).

Revistas internacionais	Citações
IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	77
REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	59
REMOTE SENSING	49
IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING	24
ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING	14
IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS	13
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH	12
INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION	11
LANDSLIDES	8
CRYOSPHERE	6
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	6
GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL	5
INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING	5
SENSORS (SWITZERLAND)	5
EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS	4
ENGINEERING GEOLOGY	4
JOURNAL OF HYDROLOGY	4
HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	3
IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING	3
JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH	3

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7: Revistas internacionais mais relevantes (WoS).

Revistas internacionais	Citações
REMOTE SENSING	69
IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	55
REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	41
IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING	25
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SOLID EARTH	16
IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS	15
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	13
INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION	12
LANDSLIDES	10
INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING	9
ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING	9
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-EARTH SURFACE	6
CRYOSPHERE	5
NATURE GEOSCIENCE	4
REMOTE SENSING LETTERS	4
SENSORS	4
ADVANCES IN SPACE RESEARCH	3
ENGINEERING GEOLOGY	3
HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	3
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS	3

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8: Conferências mais relevantes (Scopus).

Conferências	Citações
INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)	93
EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, EUSAR	46
INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES - ISPRS ARCHIVES	43
THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING	34
IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE	15
ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (APSAR)	10
IEEE NATIONAL RADAR CONFERENCE	9
IEEE RADAR CONFERENCE, RADARCONF	7
PROCEDIA COMPUTER SCIENCE	7
ISPRS ANNALS OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES	6
INTERNATIONAL RADAR SYMPOSIUM	5
PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM	5
IEEE AEROSPACE CONFERENCE PROCEEDINGS	4
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY SYMPOSIA	4
JOINT URBAN REMOTE SENSING EVENT (JURSE)	3
CONFERENCE ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, APSAR	3
IET CONFERENCE PUBLICATIONS	3
JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES	3
LANDSLIDE SCIENCE AND PRACTICE: EARLY WARNING, INSTRUMENTATION AND MONITORING	3

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9: Conferências mais relevantes (WoS).

Conferências	Citações
IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)	24
ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (APSAR)	6
EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (EUSAR)	4
IEEE RADAR CONFERENCE (RADARCONF)	4
XXIII ISPRS CONGRESS	4
IGRSM INTERNATIONAL REMOTE SENSING & GIS CONFERENCE AND EXHIBITION	3
ISPRS HANNOVER WORKSHOP	3

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10: Publicações brasileiras com maior número de artigos.

Publicações brasileiras	Artigos
REVISTA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA	7
GEOCIÊNCIAS	6
ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS	5
BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS	5
REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA	5
ACTA AMAZÔNICA	3
REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA	2
REVISTA BRASILEIRA DE GEOMORFOLOGIA	2
ACTA SCIENTIARUM - BIOLOGICAL SCIENCES	1
CIÊNCIA FLORESTAL	1

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11: Teses e dissertações sobre SAR em instituições brasileiras.

Teses e dissertações	Teses/Dissertações identificadas
INSTITUTO TECNOLÓGICO DA AERONÁUTICA	25
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS	25
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ	12
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	11
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO	9
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS	8
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO	7
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	3
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ	3
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO	2
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS	2
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA	1
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO	1
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS	1
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS	1

Fonte: Elaboração própria.