

SENSORIAMENTO REMOTO DE ECOSSISTEMAS TERRESTRES E AQUÁTICOS: FUNDAMENTOS.

Dra. Marisa Dantas Bitencourt

*LEPaC - Lab. de Ecologia da Paisagem e Conservação
Departamento de Ecologia
Instituto de Biociências
Universidade de São Paulo*

Reflectância

- **O QUE O SENSOR REGISTRA É A RADIÂNCIA (L)**

$$L_{\text{alvo}} = (E(\rho \tau + B) / \pi) \sin \alpha$$

ρ = Reflectância do Alvo ($\rho = R / E$)

E = Energia Solar que chega no Alvo

τ = Transmitância da Atmosfera

α = Ângulo de Elevação Solar

B = Efeito atmosférico do tipo aditivo

O QUE O SENSOR ORBITAL REGISTRA É → $L_{\text{total}} = L_{\text{alvo}} + L_{\text{trajetória}}$

EFEITOS INDESEJÁVEIS SOBRE A RADIÂNCIA

- | | | |
|---|-----------------------|-------------------------------------|
| - | LINEARIZAÇÃO | Radiância (L) → Número Digital (ND) |
| - | EFEITO MULTIPLICATIVO | Ângulo de elevação solar |
| - | EFEITO ADITIVO | Radiância da trajetória |

RELAÇÃO ENTRE R e ND → $L = [(L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / \text{resolução radiométrica}] \text{ND} + L_{\text{min}}$

Resolução Radiométrica: 6 bits = de 0 a 63 níveis de Energia, 8 bits = de 0 a 255 níveis de Energia e 10 bits = de 0 a 1023 níveis de Energia

Emitância

A emitância (M) obedece a lei de Stephen & Boltzman, onde:

$$M_{\text{do corpo negro}} = \sigma T^4 \quad \text{e} \quad M_{\text{do corpo real}} = E \sigma T^4$$

Sendo: σ = constante de Stephen & Boltzman ($5,67 \times 10^{-8}$)

Corpo negro = radiador perfeito

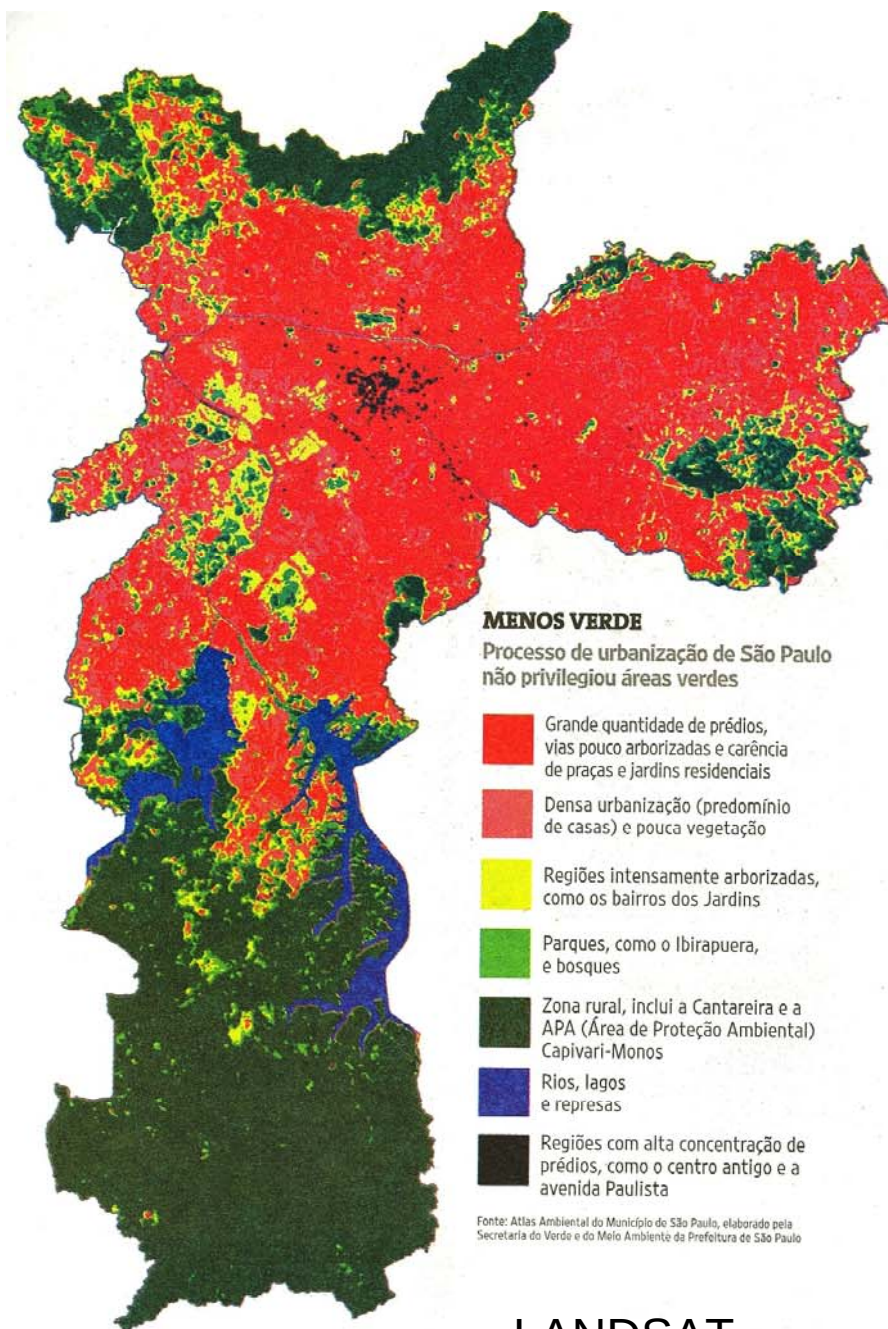
E = Emissividade (varia de alvo para alvo)

E vegetação = 0,98; E solo molhado = 0,95; e E solo seco = 0,92; corpo negro = 1)

$$T_{\text{brilho}} = \sqrt[4]{(L \pi / \sigma)} \quad T_{\text{real}} = \sqrt[4]{(L \pi / E \sigma)} \quad \text{logo}$$
$$T_{\text{brilho}} \cdot E^{1/4} = T_{\text{real}}$$

Sistemas com Termal

- LANDSAT-TM e +ETM
 - Faixa espectral: 10,4 a 12,5 micrômetros
 - Pixel de 80x80 e 160x160m
- CBERS – IRMSS (grátis)
 - Faixa espectral: 10,4 a 12,5 micrômetros
 - Pixel de 120x120m
- NOAA – AVHRR
 - Faixa espectral: 10,4 a 12,5 micrômetros
 - Pixel de 1,1x1,1 Km



LANDSAT

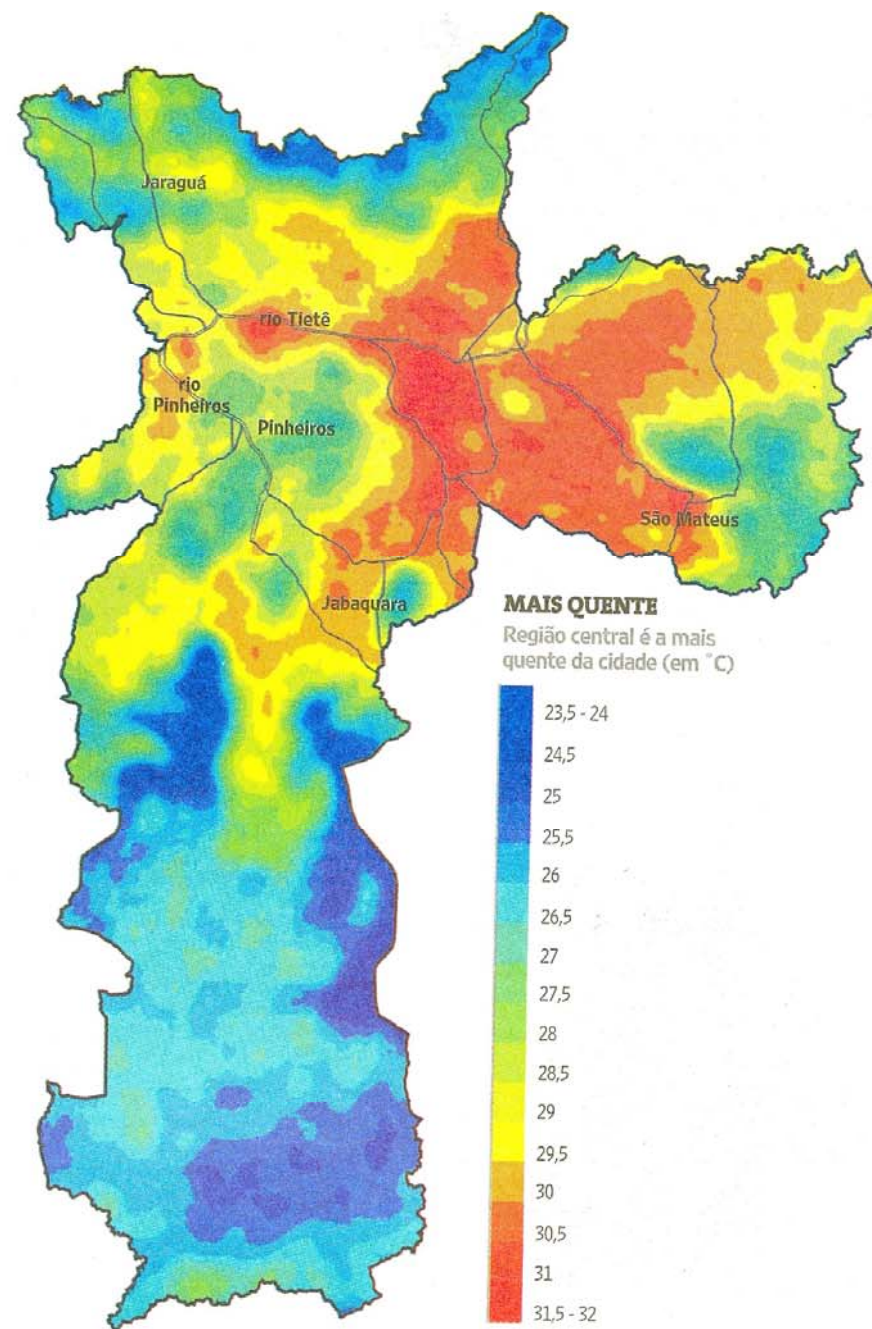




Figura 3. Região da Central Nuclear de Angra dos Reis, evidenciando a região de Itaorna (captação da água de refrigeração) e do Saco de Piraquara de Fora, onde a água do circuito terciário é despejada. O ponto de descarga é indicado pela seta amarela. Observa-se grande turbulência na água do mar a partir deste ponto.

CBERS - IRMSS

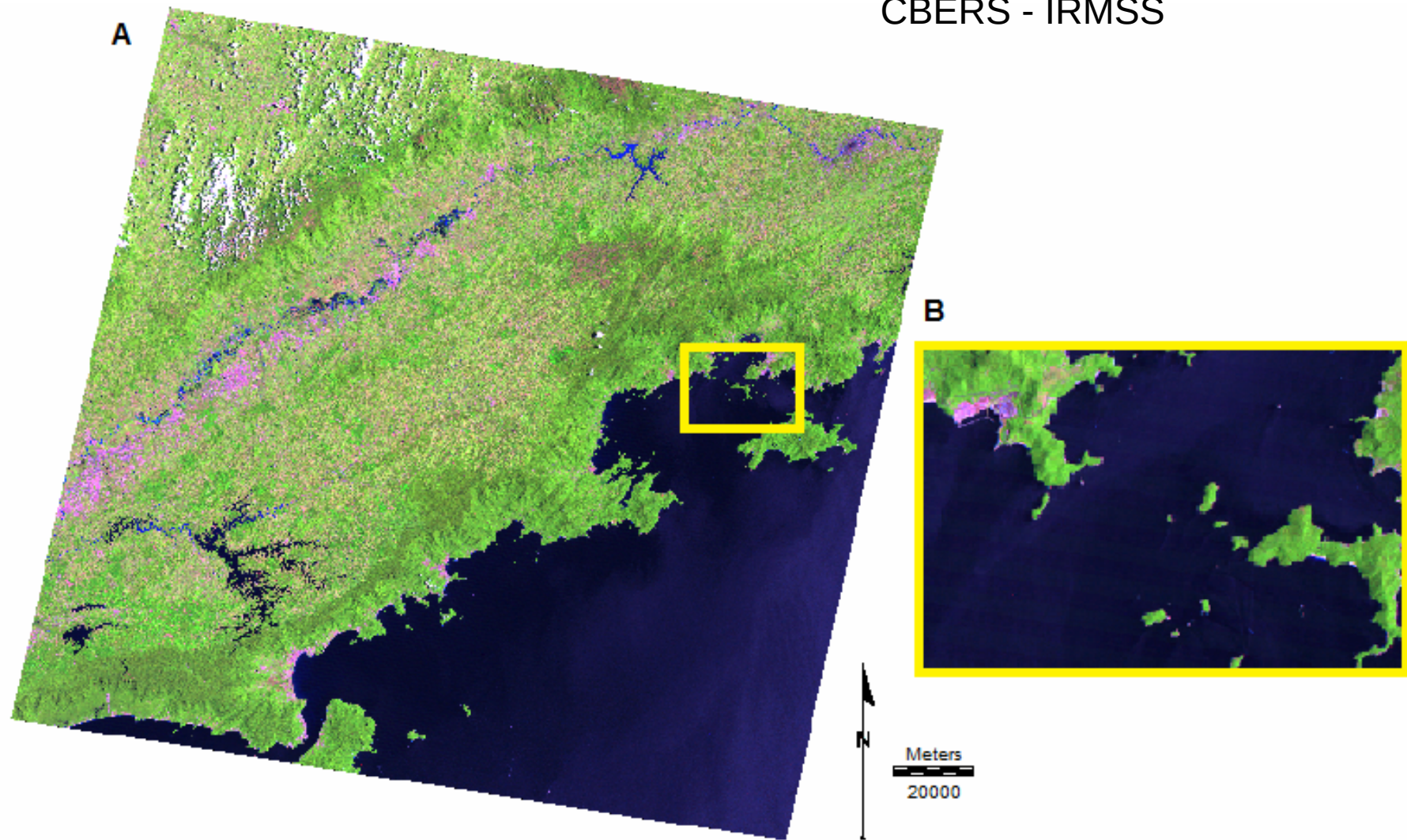


Figura 4. **A.** Composição colorida obtida para a data 06/02/2010, com a área de interesse demarcada em amarelo. **B.** Detalhe da área de interesse, evidenciando a área urbana contendo a usina (rosado) e algumas das ilhas mais próximas.

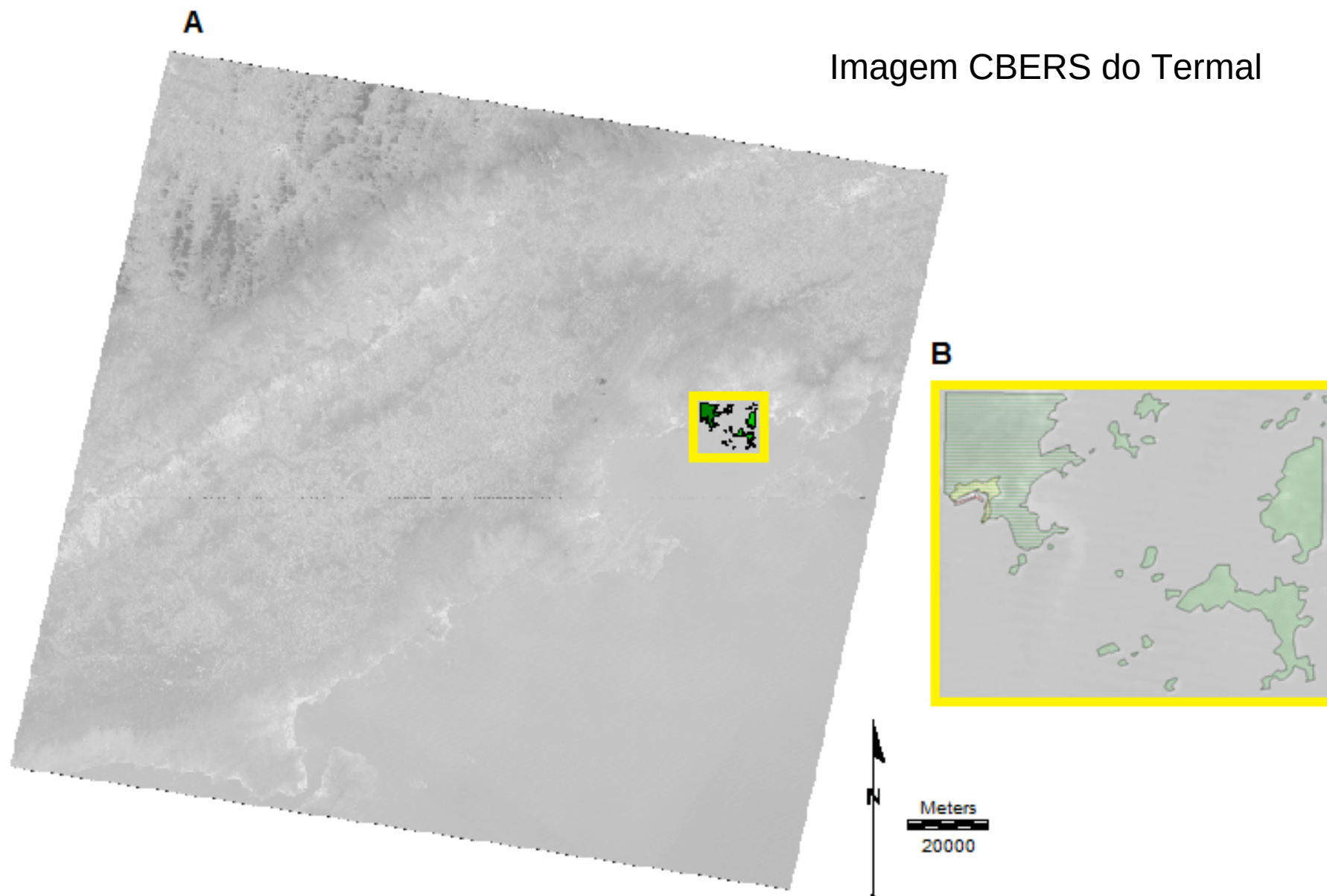


Figura 5. A. Imagem do termal (CBERS banda 6) com os vetores inseridos para localizar a área de interesse, demarcada em amarelo, em 06/02/2010. **B.** Detalhe da área de interesse, com os vetores costa (verde escuro), ilhas (verde claro), usina (amarelo) e plataforma da Petrobrás (vermelho).



Figura 6. Imagem dos vetores reclassificados de acordo com sua **emissividade**, para gerar imagem de temperatura real.

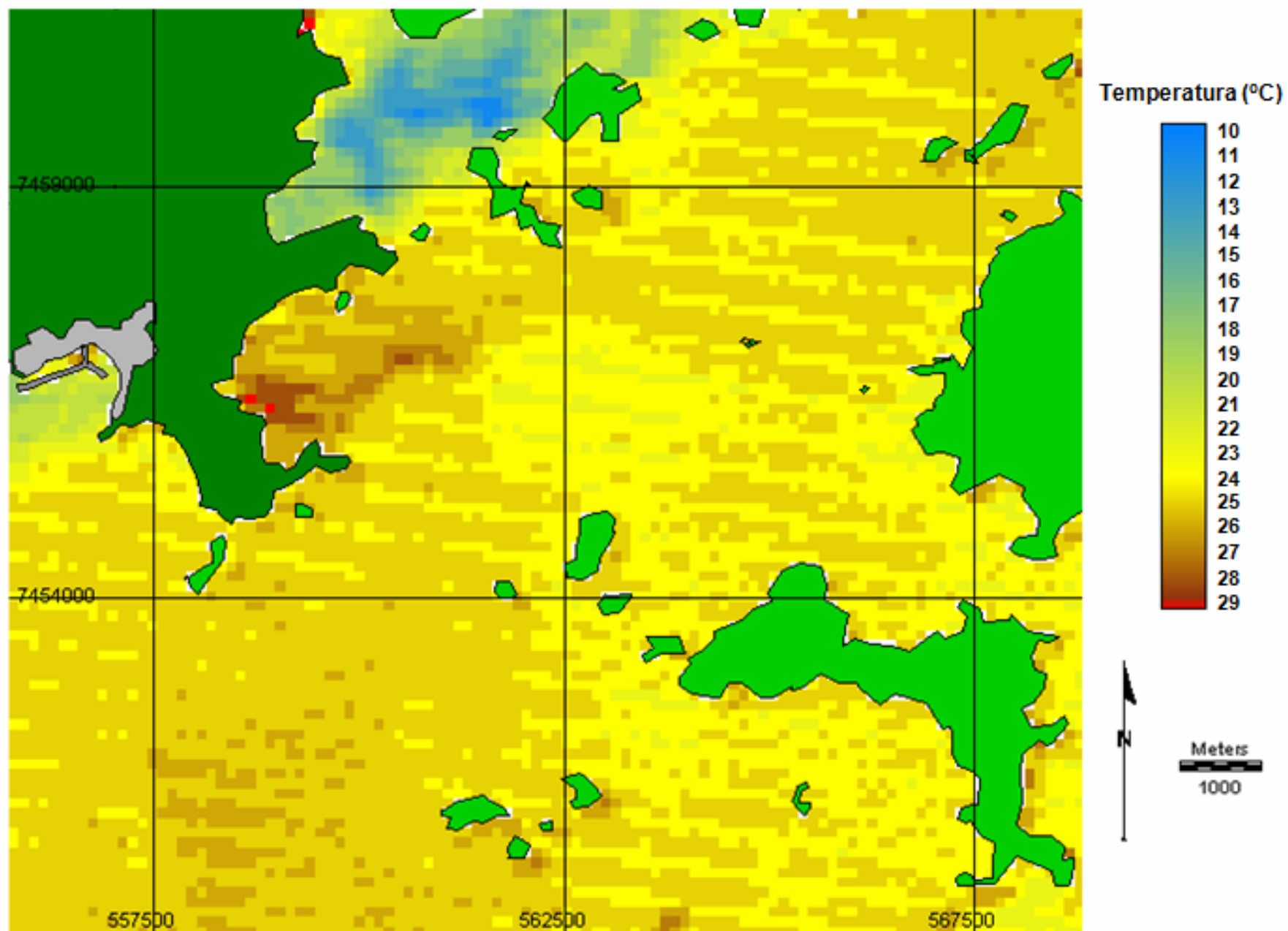


Figura 7. Temperatura real em **19/02/2009**, com a costa em verde escuro, ilhas em verde claro, usina em cinza claro e plataforma em cinza escuro. Para esta data, as temperaturas obtidas foram de 29°C (ponto de descarga); 24°C (mar) e 27,5 °C (pluma).

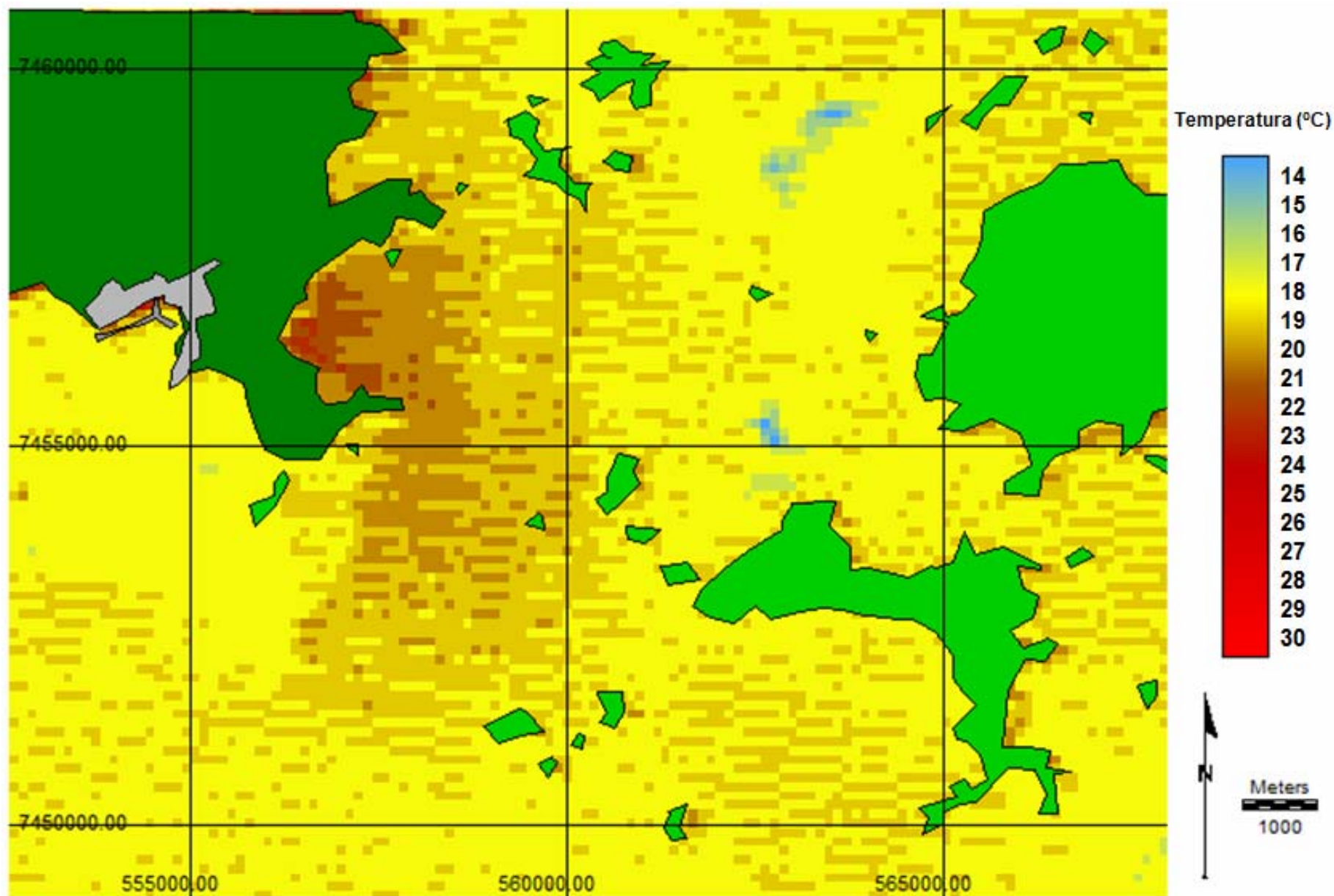


Figura 8. Temperatura real em **26/05/2009**, com a costa em verde escuro, ilhas em verde claro, usina em cinza claro e plataforma em cinza escuro. Para esta data, as temperaturas obtidas foram de 25°C (ponto de descarga); 17,5°C (mar) e 22°C (pluma).

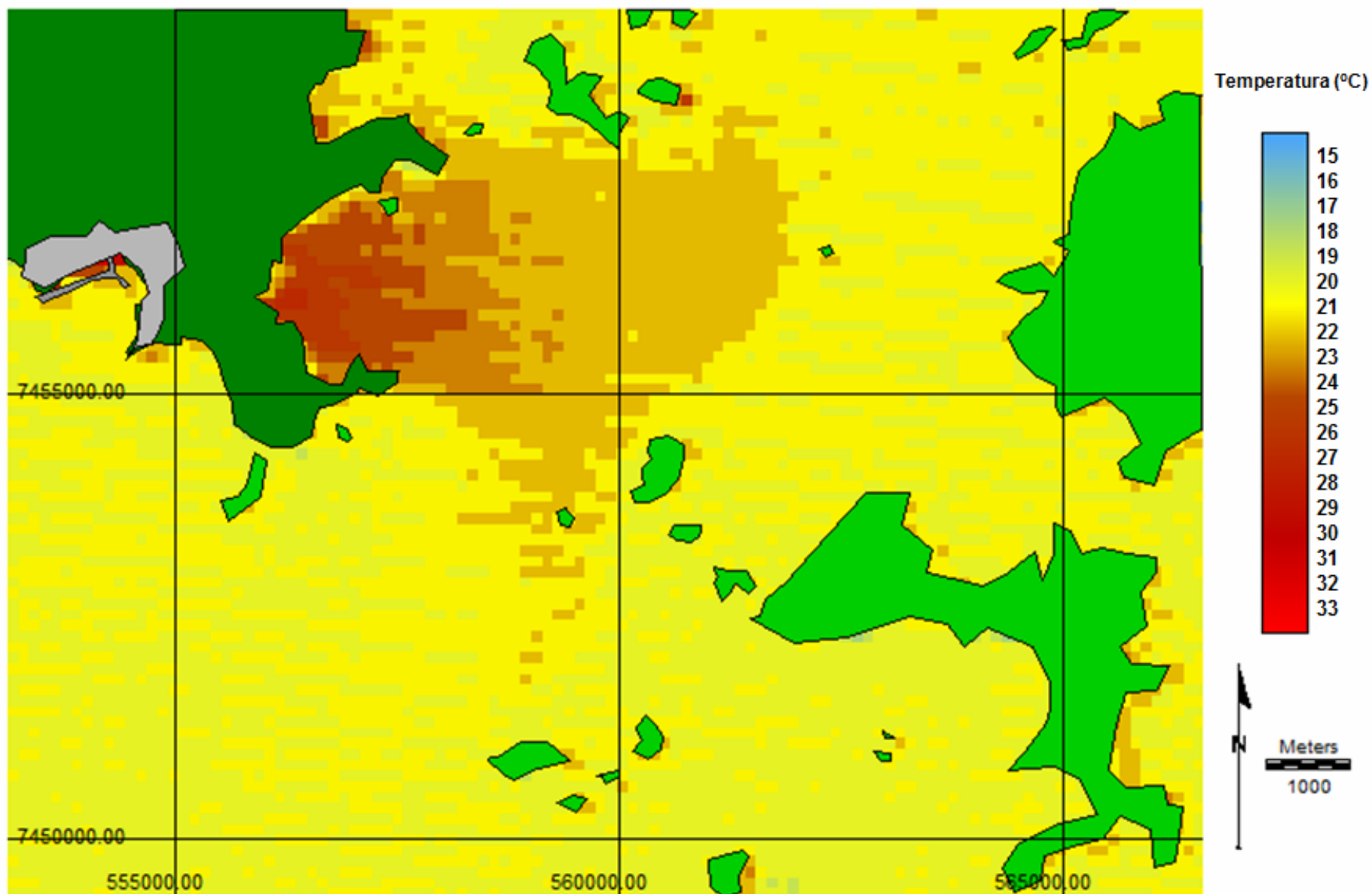


Figura 9. Temperatura real em **30/08/2009**, com a costa em verde escuro, ilhas em verde claro, usina em cinza claro e plataforma em cinza escuro. Para esta data, as temperaturas obtidas foram de 26°C (ponto de descarga); 20,5°C (mar) e 24,5°C (pluma).

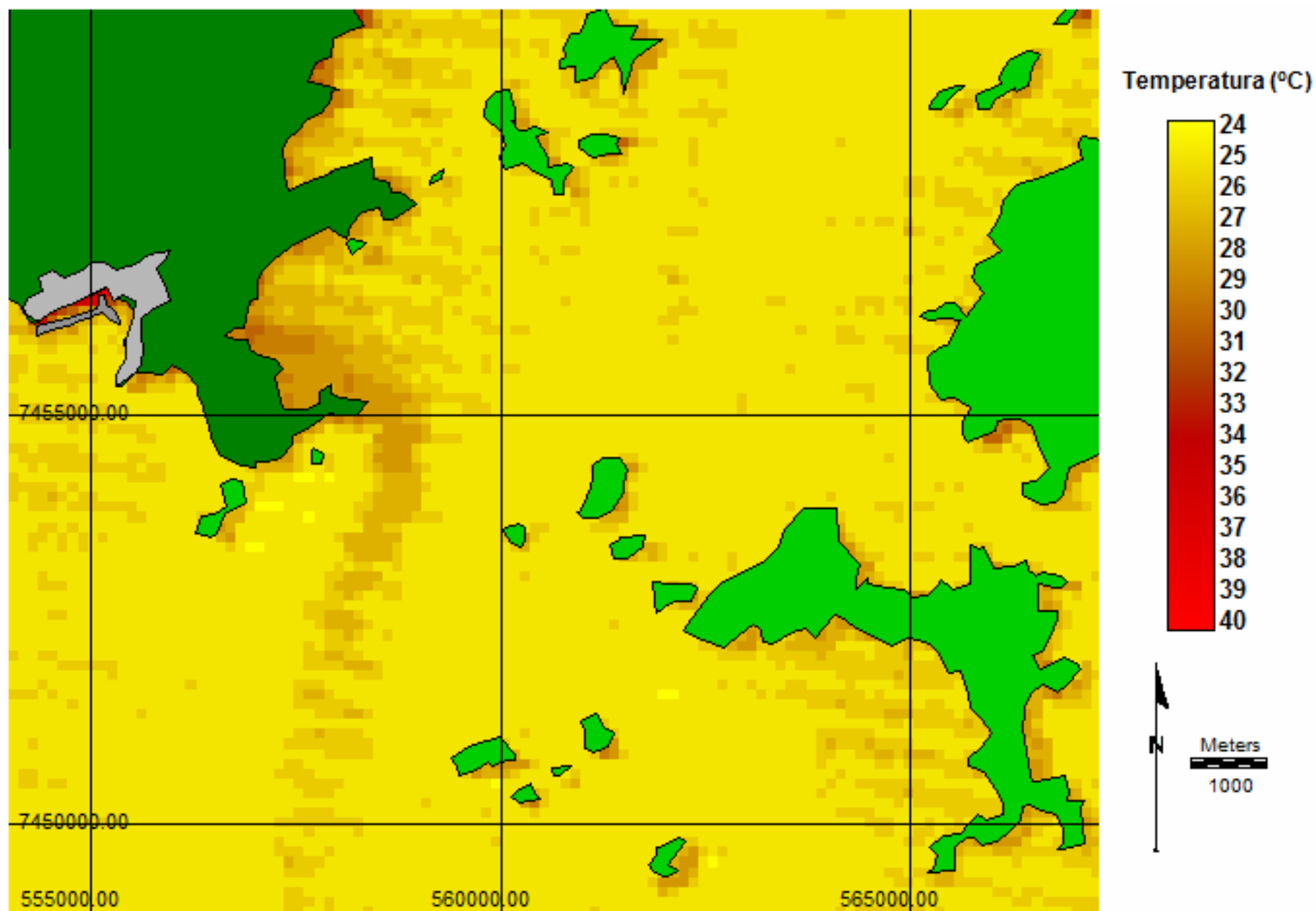


Figura 10. Temperatura real em **06/02/2010**, com a costa em verde escuro, ilhas em verde claro, usina em cinza claro e plataforma em cinza escuro. Para esta data, as temperaturas obtidas foram de 31°C (ponto de descarga); 26°C (mar) e 29°C (pluma).

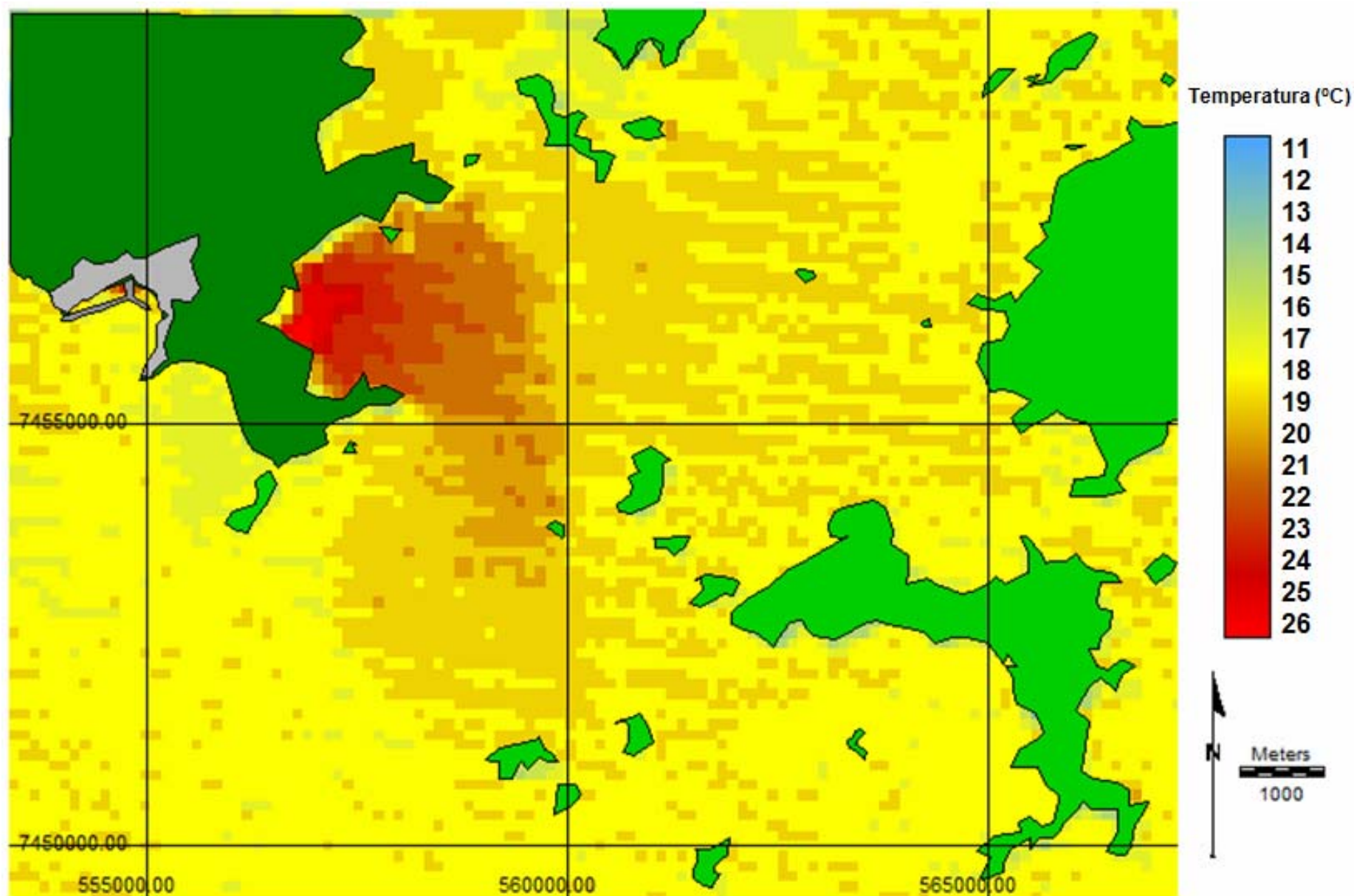
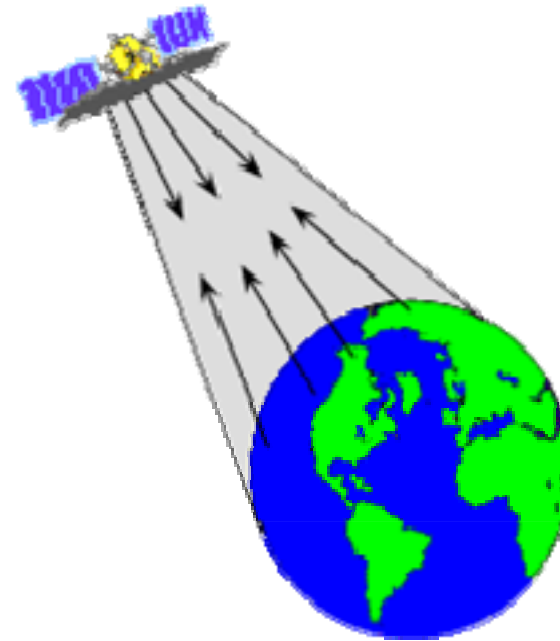


Figura 11. Temperatura real em **13/05/2010**, com a costa em verde escuro, ilhas em verde claro, usina em cinza claro e plataforma em cinza escuro. Para esta data, as temperaturas obtidas foram de 25°C (ponto de descarga); 18,5°C (mar) e 23°C (pluma).

MICROONDAS

- PASSIVO
 - Umidade do solo
 - Vapor d'água
- ATIVO
 - Rugosidade
 - Condutividade



i) Nos **sistemas passivos** se mede a rotação molecular causada pela Temperatura de brilho, que varia de um alvo para outro. Há hoje inúmeros projetos de satélites para **análises globais** de precipitação, vapor d'água e umidade do solo.

ii) Nos **sistema ativos** consiste em transmitir pulsos de energia de λ conhecidos (microondas) na direção do alvo de interesse e esperar pelo eco ou reflexão que pode ser recepcionado por antenas.

SLAR (side looking aperture radar) em aviões

SAR (synthetic aperture radar) em satélites

Resolução espectral:

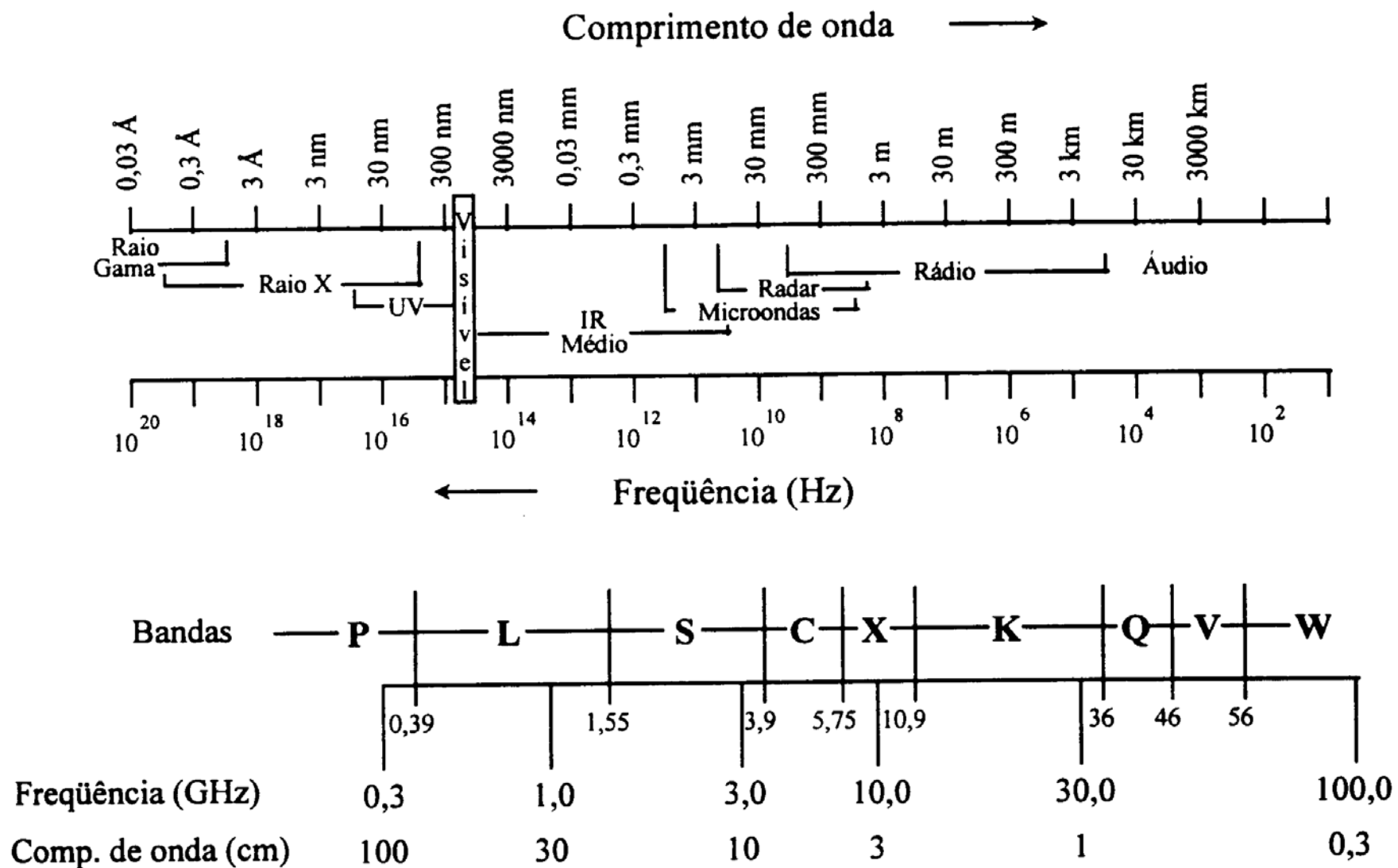
Faixas	λ (cm)	f (Mhz)
Ka*	0.75 - 1.1	40000 - 26500
K*	1.1 - 1.67	26500 - 18000
Ku*	1.67 - 2.4	18000 - 12500
X	2.4 - 3.75	12500 - 8000
C	3.75 - 7.5	8000 - 4000
S	7.5 - 15	4000 - 2000
L	15 - 30	2000 - 1000
P	30 - 100	1000 - 300

*Radiação de fonte natural ou passivo

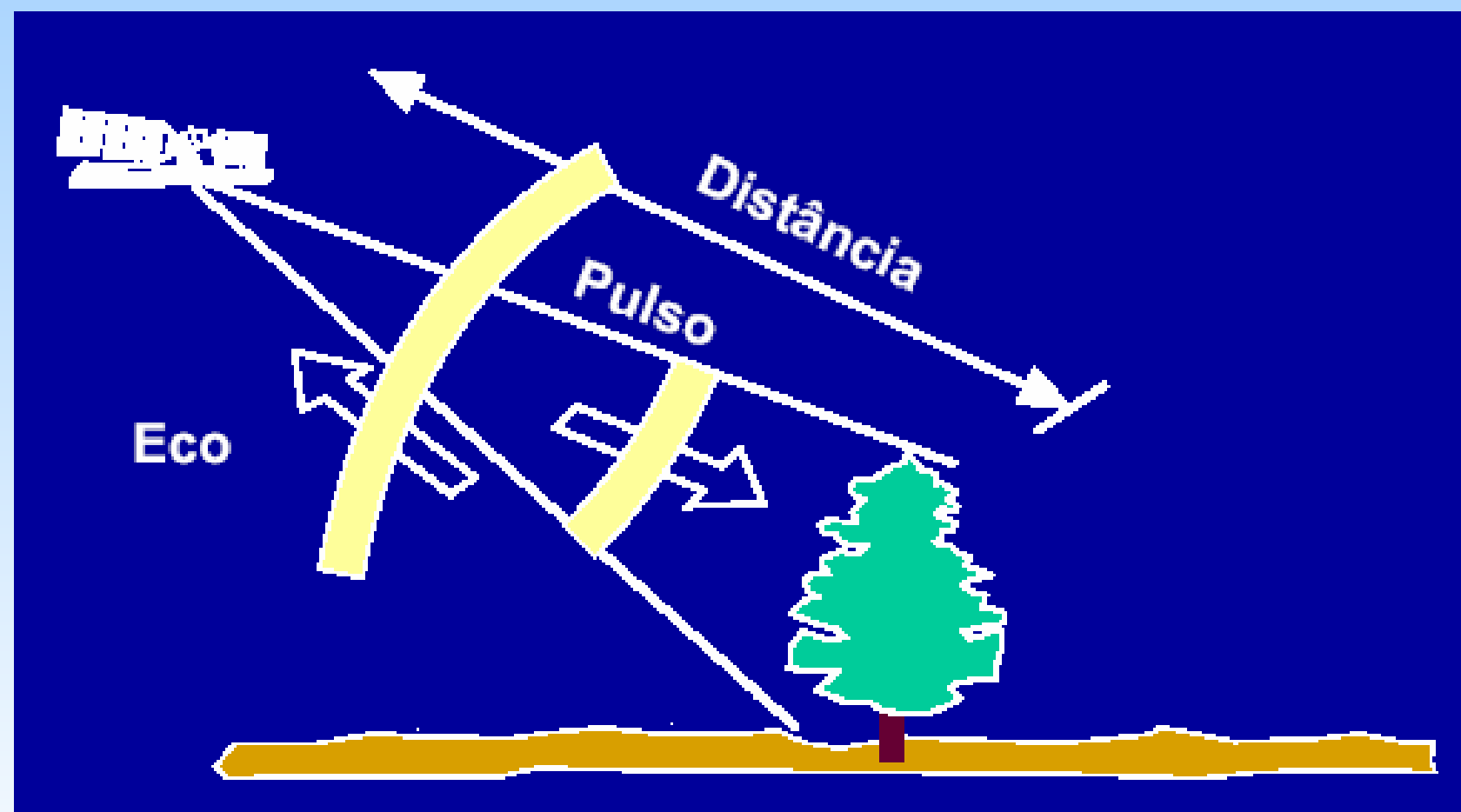
SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO ou RADAR

- 1) Penetra a atmosfera sob quase qualquer condição, dependendo do λ envolvido (névoa, chuva leve, neve leve, nuvens ou fumaça).
- 2) A fonte de energia é artificial; pode produzir imagem ou não; pode estar em plataforma aérea ou orbital.
- 3) O sinal de radar interage com os diversos alvos do ambiente natural.

Espectro Eletromagnético mais detalhado



RADAR - Radio Detection And Ranging (Detecção e localização por meio de ondas de rádio)



O sistema ativo baseia-se no efeito Doppler (desvio de frequência entre a transmissão e o retorno do sinal enviado).

Tudo começou com o SLAR (*side looking radar*) consistia de uma antena fixa abaixo da plataforma, com visada lateral → produzia tiras contínuas de imagens.

Nesse caso a **interação** é devida a **constante dielétrica** e a **rugosidade**. Uma antena ou calha alterna o papel de emissor e o de receptor.

O que determina o retorno ou não dos raios de microondas são as características geométricas e as características elétricas, isoladas ou em conjunto.

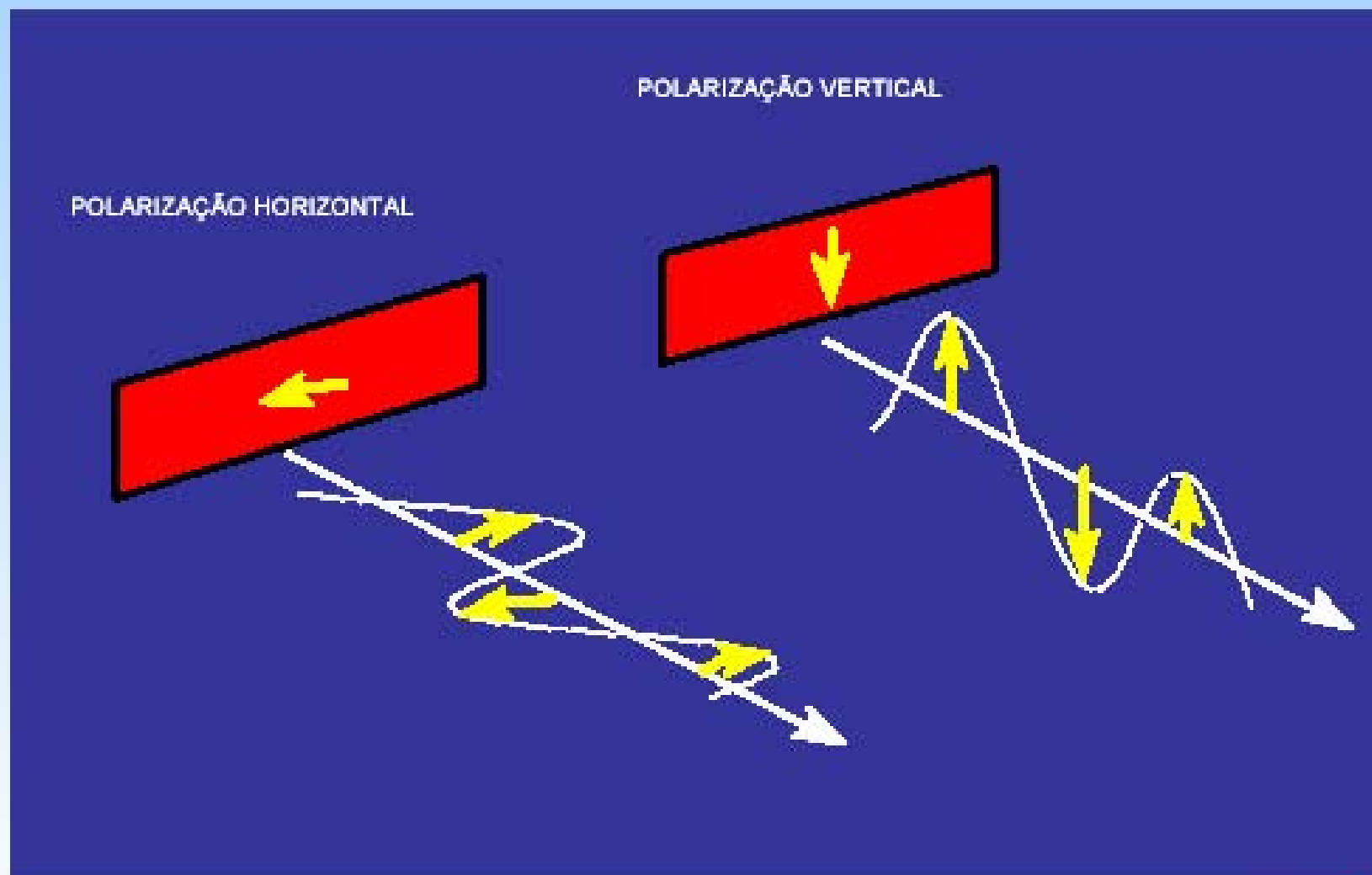
Polarização

A reflectividade varia com o TAMANHO dos alvos e o comportamento espectral muda conforme a POLARIZAÇÃO (H e V), ampliando assim o espectro de observação.

Polarização: HH, HV, VH e VV

Polarização de Ondas Eletromagnéticas

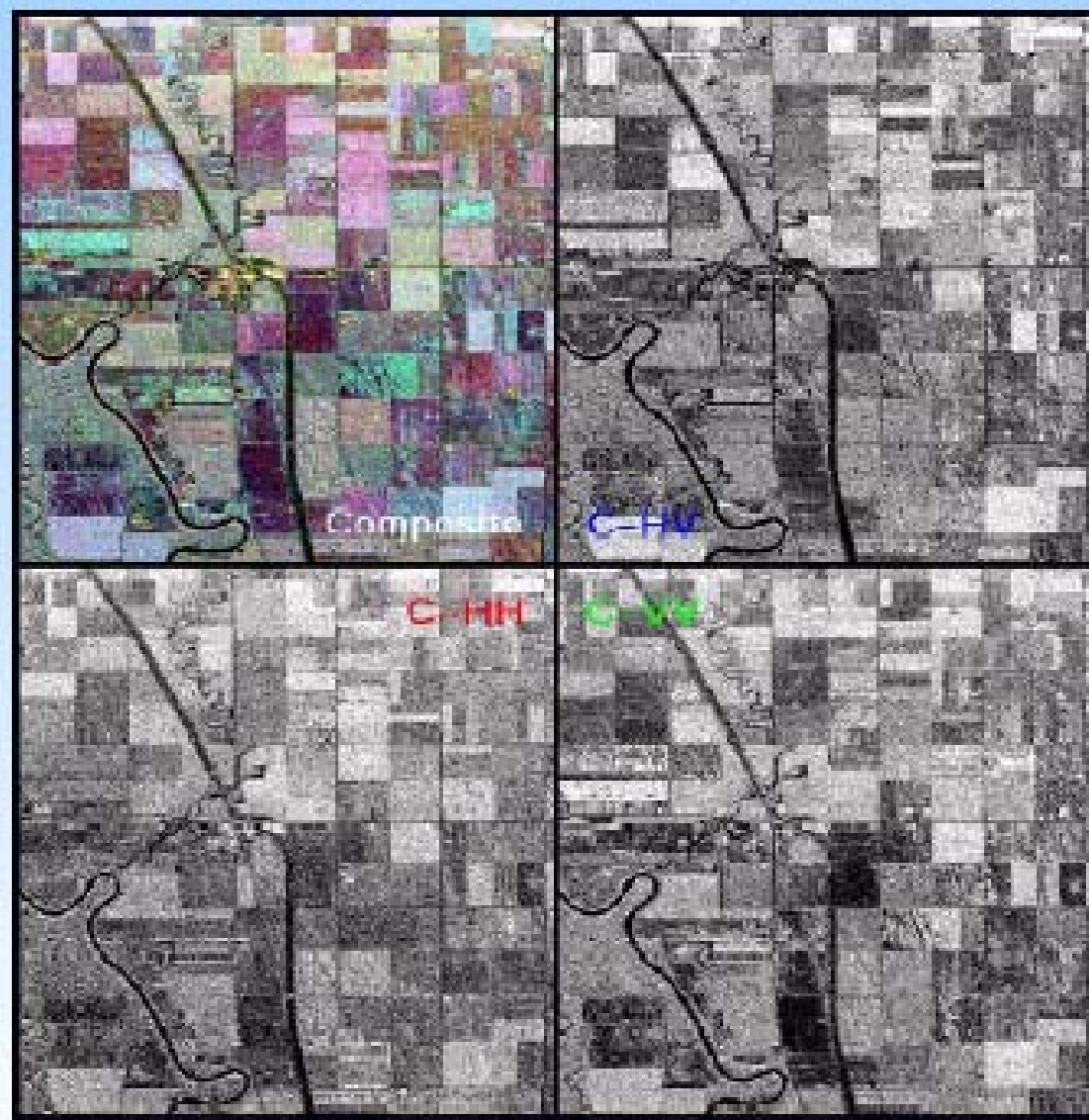
Campo Elétrico



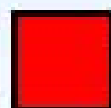
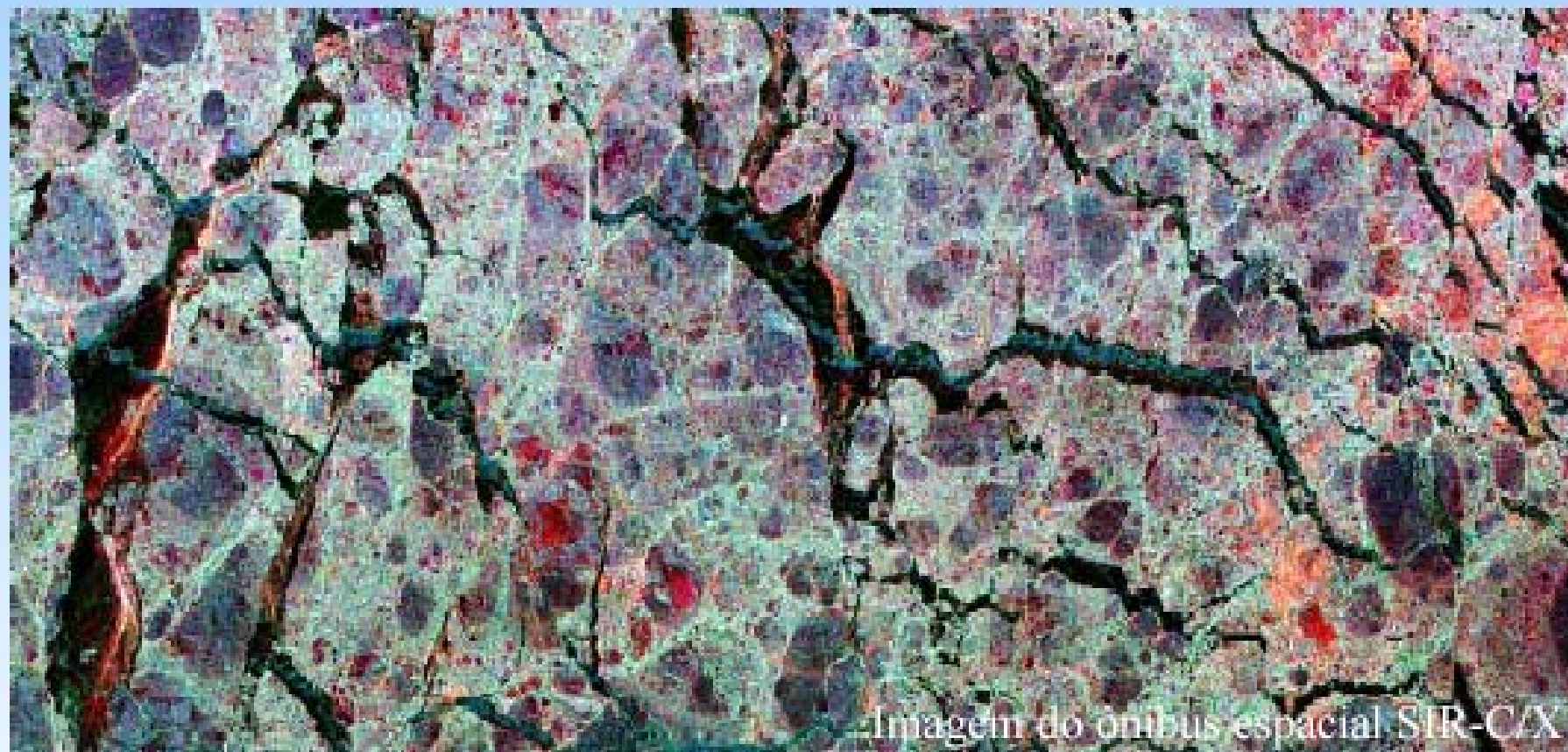
Escolha da Polarização

- Os SARs operacionais têm normalmente uma única polarização por questão de economia (ex: HH ou VV)
- Os sistemas de pesquisa tendem a ter polarizações múltiplas (ex: HH, HV, VV, VH - polarimetria de quadratura)
- Polarizações múltiplas ajudam a distinguir a estrutura física dos alvos através do retroespalhamento
 - o alinhamento em relação ao radar (HH *versus* VV)
 - a aleatoriedade do espalhamento (ex: vegetação - HV)
 - as estruturas com vértices proeminentes (ex: ângulo de fase HH VV)
 - Espalhamento de Bragg (ex: oceanos - VV)

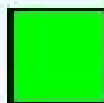
Vantagens das Imagens com Polarização Múltipla



Gelo no Mar de Weddell, Antártida



Banda C, HH

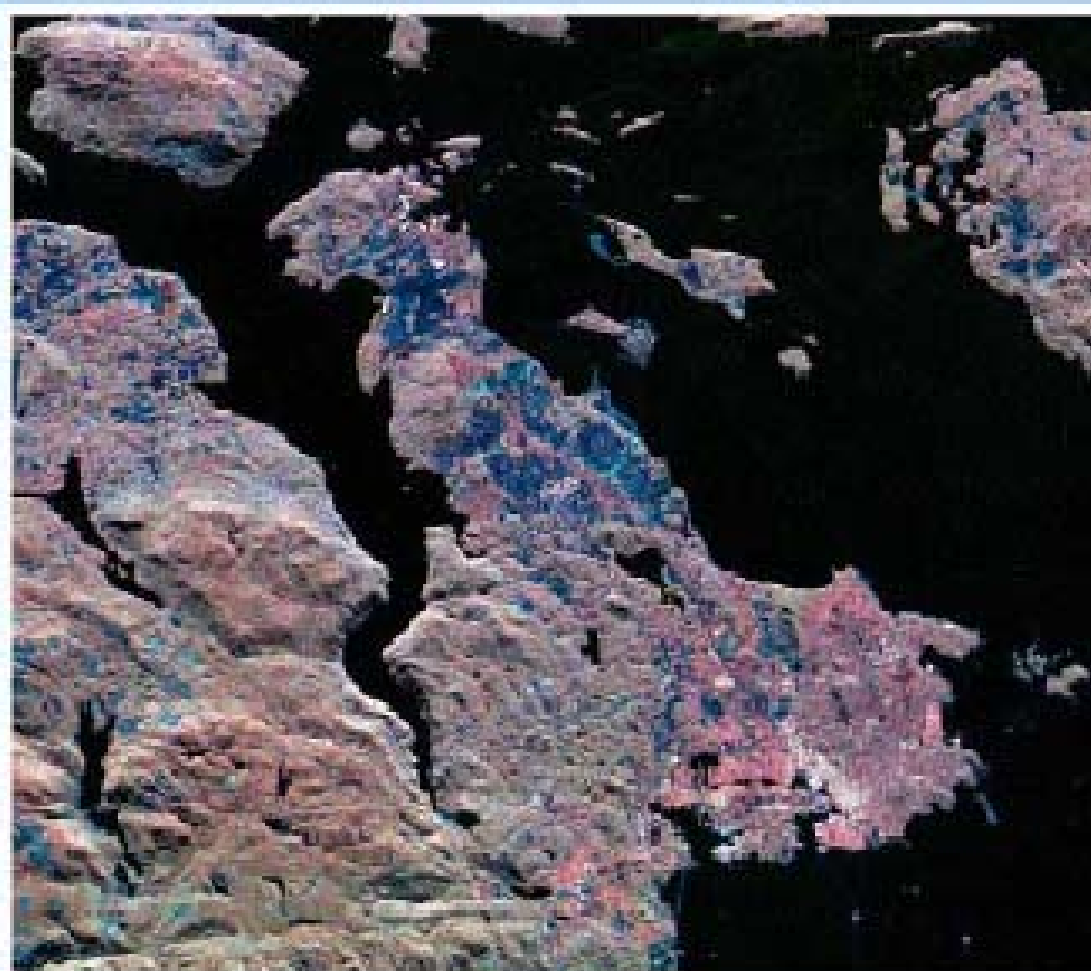


Banda L, HV



Banda L, HH

Península de Victoria & Saanich, Canadá



Zona urbana



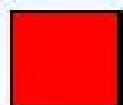
Zona
suburbana



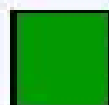
Floresta



Agricultura /
desmatamento



Banda C, HH



Banda L, HV

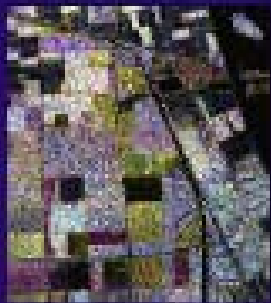


Banda L, HH

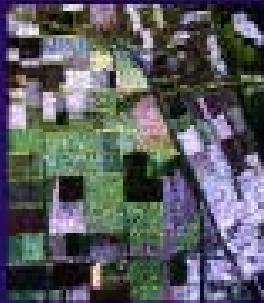
Comparação de Frequências: Bandas C, L e P

 **COMPARAÇÃO DE FREQUÊNCIAS**

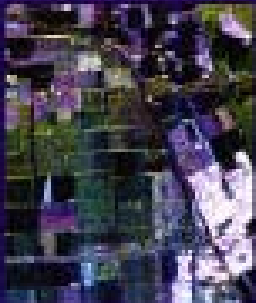
Flevoland, Holanda Imagem agrícola



Banda C



Banda L



Banda P

Composição colorida com múltipla polarização, cedida pelo JPL.

Comportamento espectral das microondas:

Características geométricas: rugosidade da superfície – relevo por exemplo.

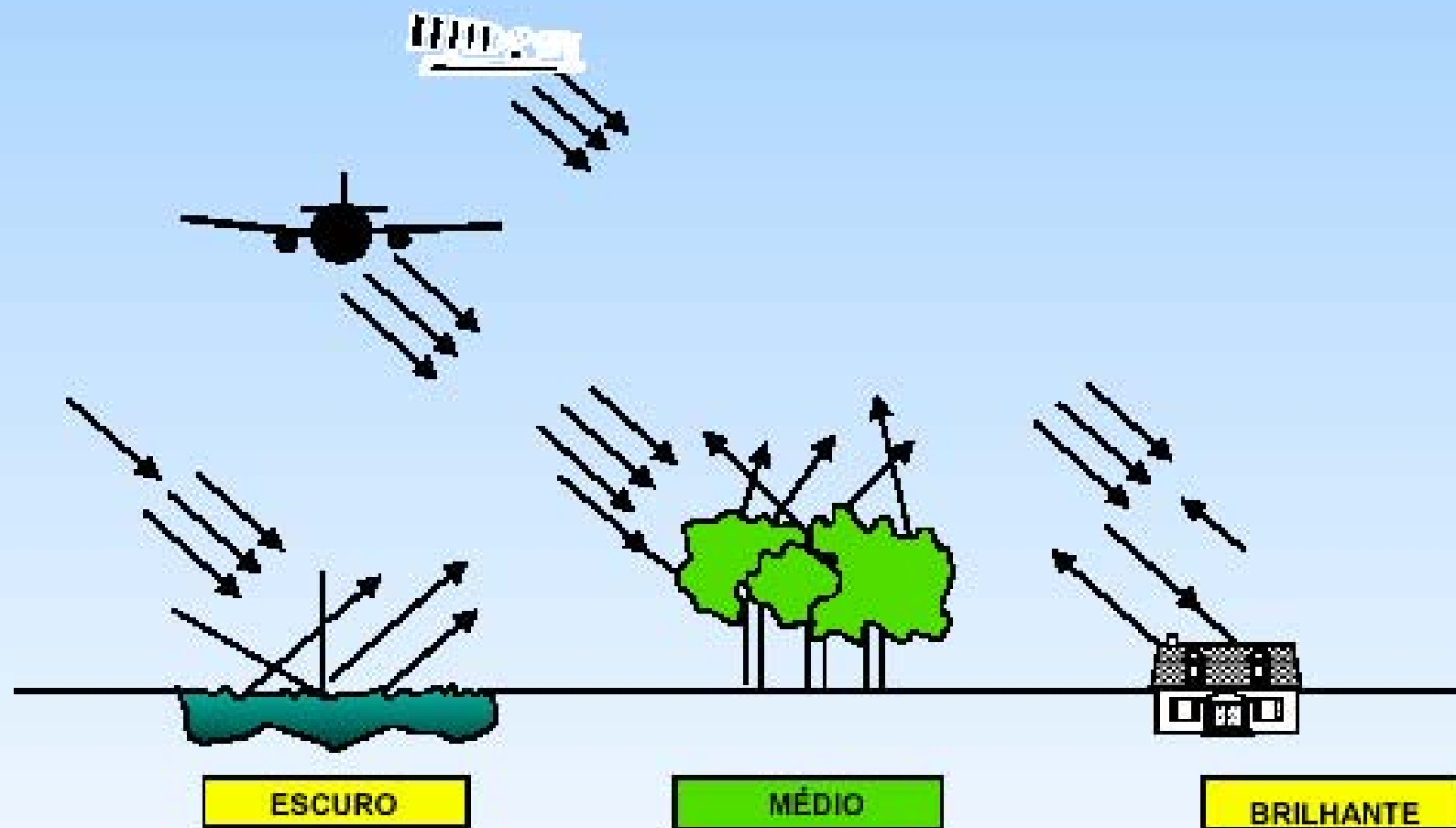
Características elétricas: reflectividade e condutibilidade dos materiais que compõem a superfície, representada pela constante dielétrica (E).

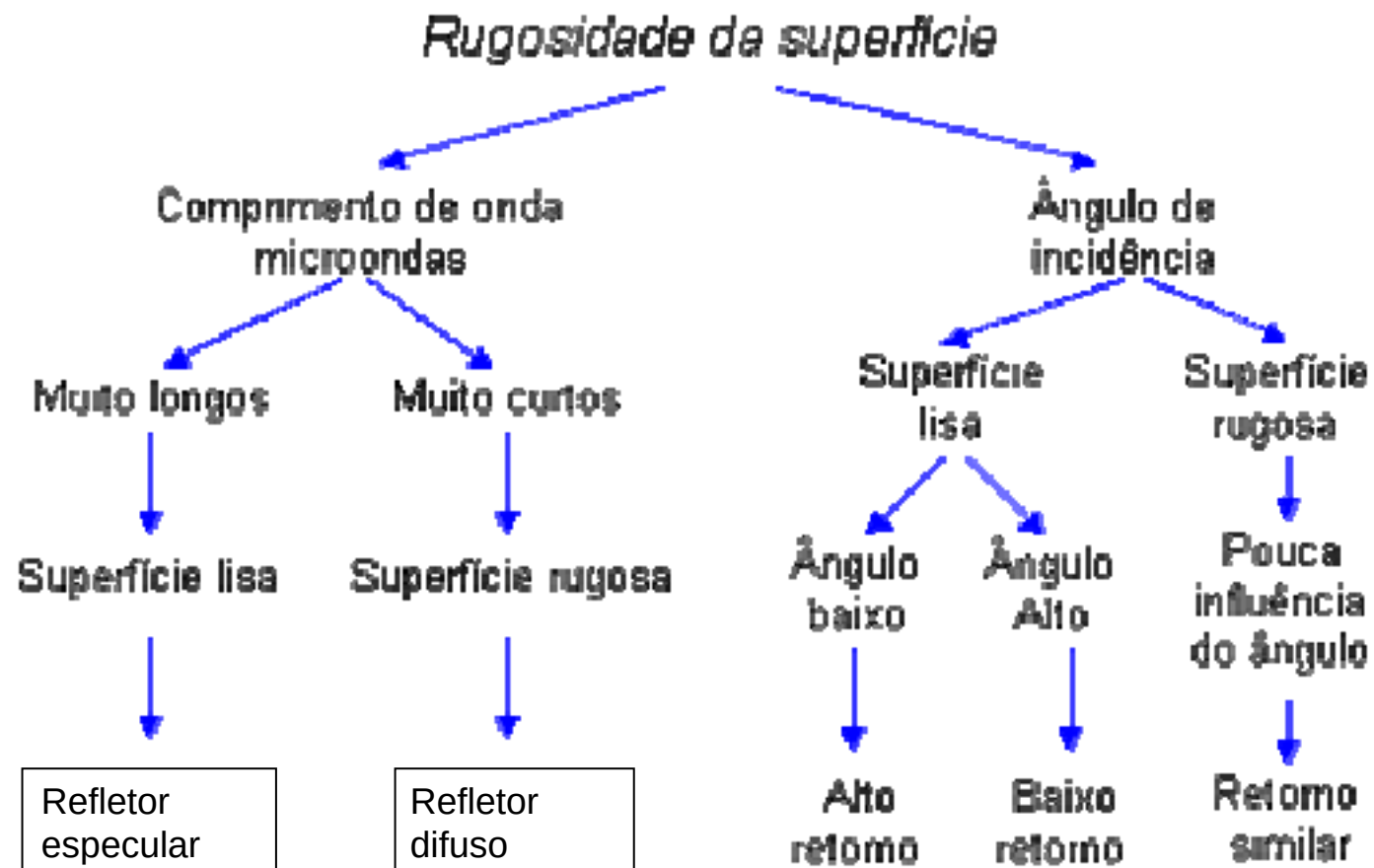
A maior parte dos materiais têm E entre 3 e 8, quando secos. A água tem E semelhante a 80. Assim, a presença de umidade, tanto do SOLO como na VEGETAÇÃO, pode significar aumento na reflectividade. A vegetação é bom refletor assim como os metais.

Reflectividade difusa e especular

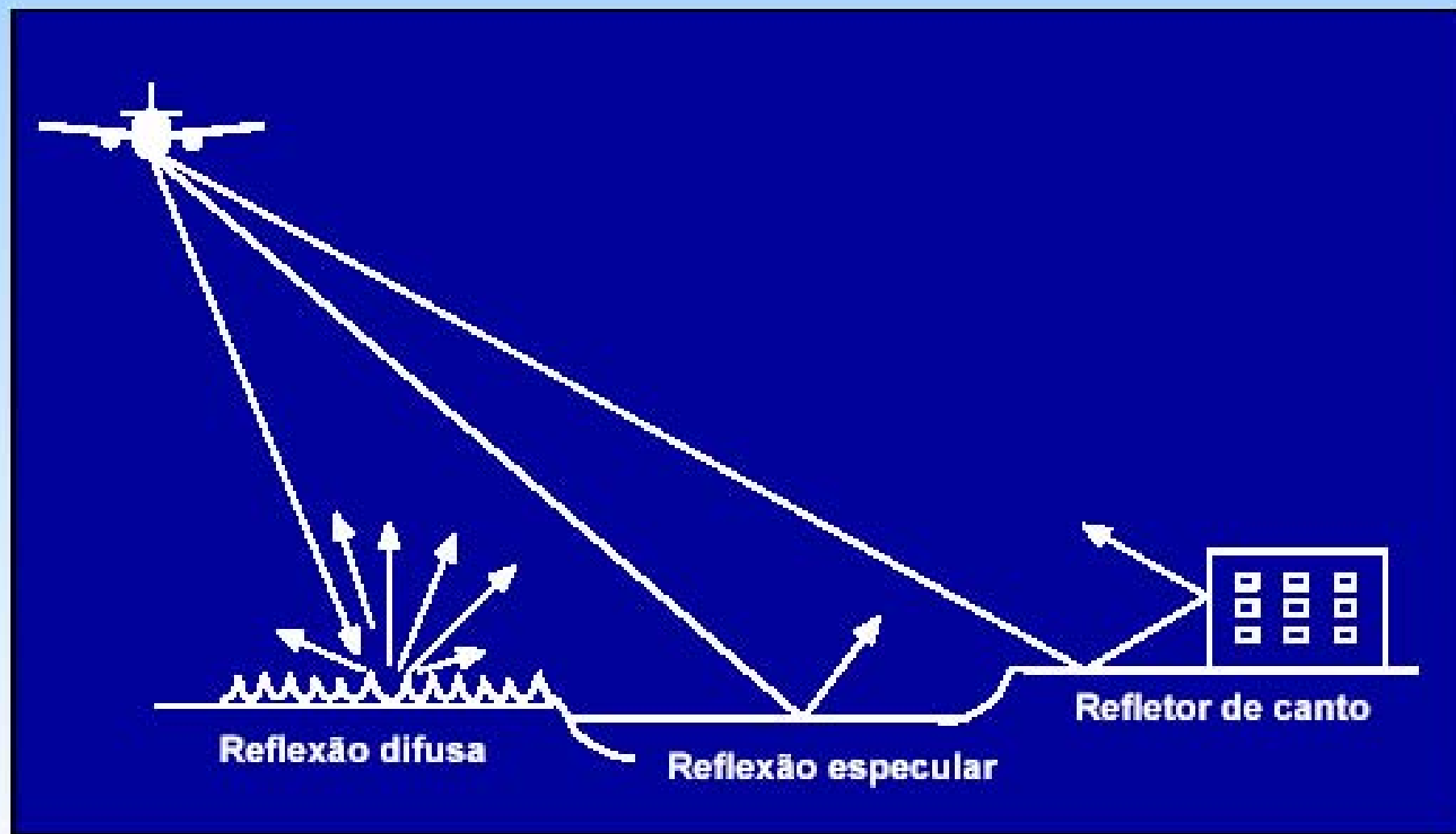
- A rugosidade superficial influencia a reflectividade da energia de microondas e, conseqüentemente, o brilho dos alvos nas imagens SAR.
- As superfícies lisas e horizontais refletem quase toda a energia incidente em direção oposta ao sistema imageador → reflectividade especular (latim: *speculum* ou espelho). As superfícies especulares (águas calmas e rodovia pavimentada) - escuras nas imagens SAR.
- As microondas que incidem sobre superfície rugosa são espalhadas em várias direções → reflectividade difusa. As superfícies com vegetação são refletores difusos - claras nas imagens SAR.

Espalhamento do Alvo



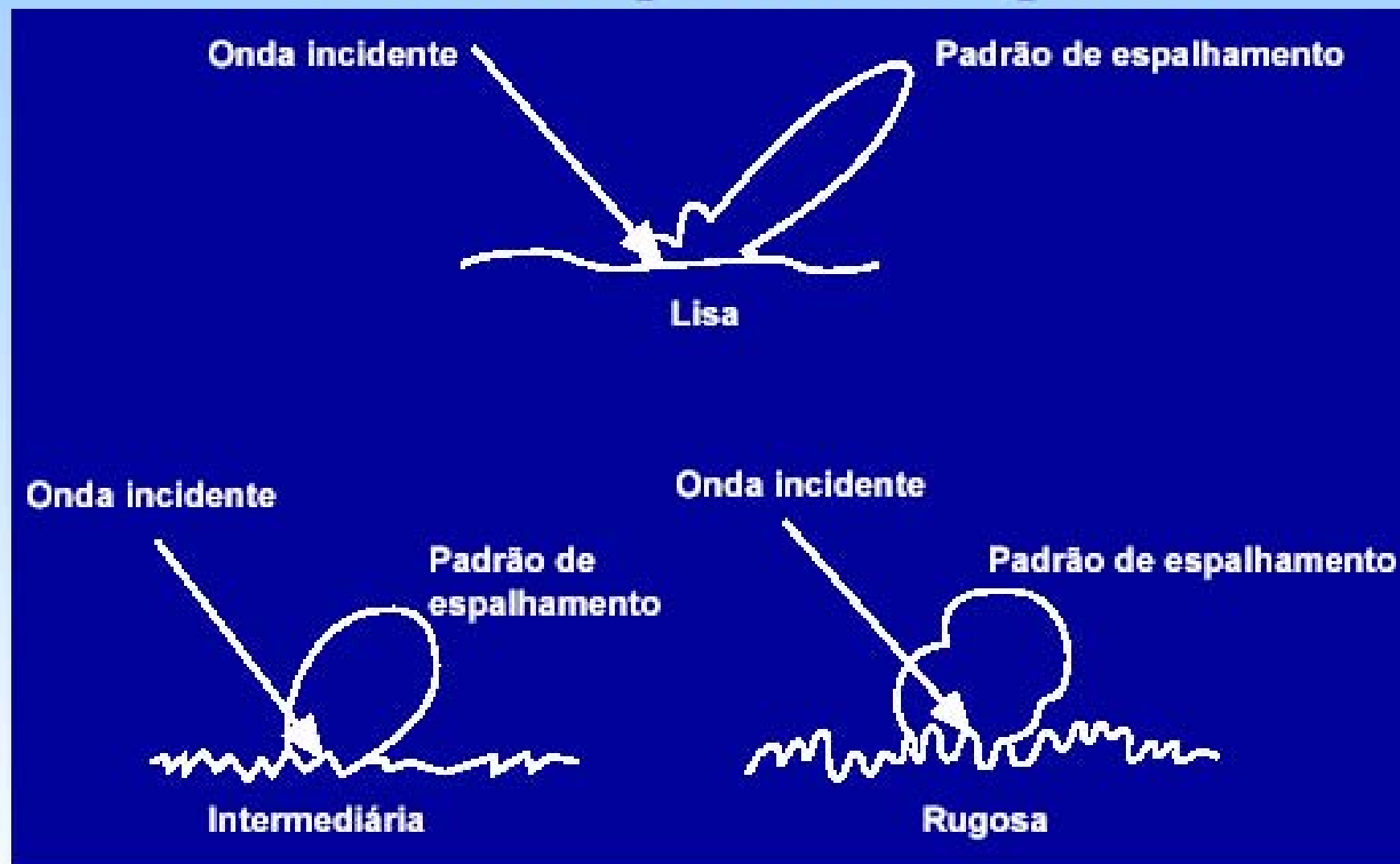


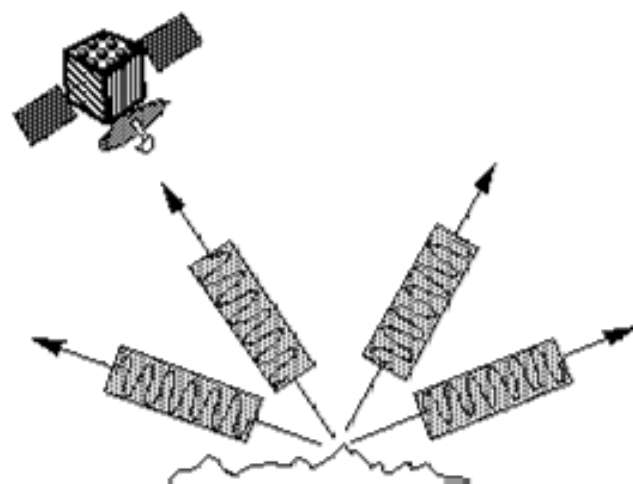
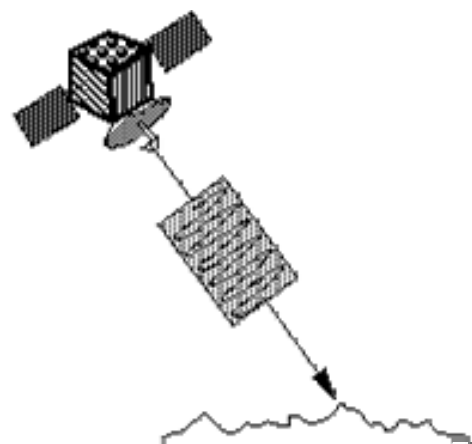
Reflectância Difusa e Especular

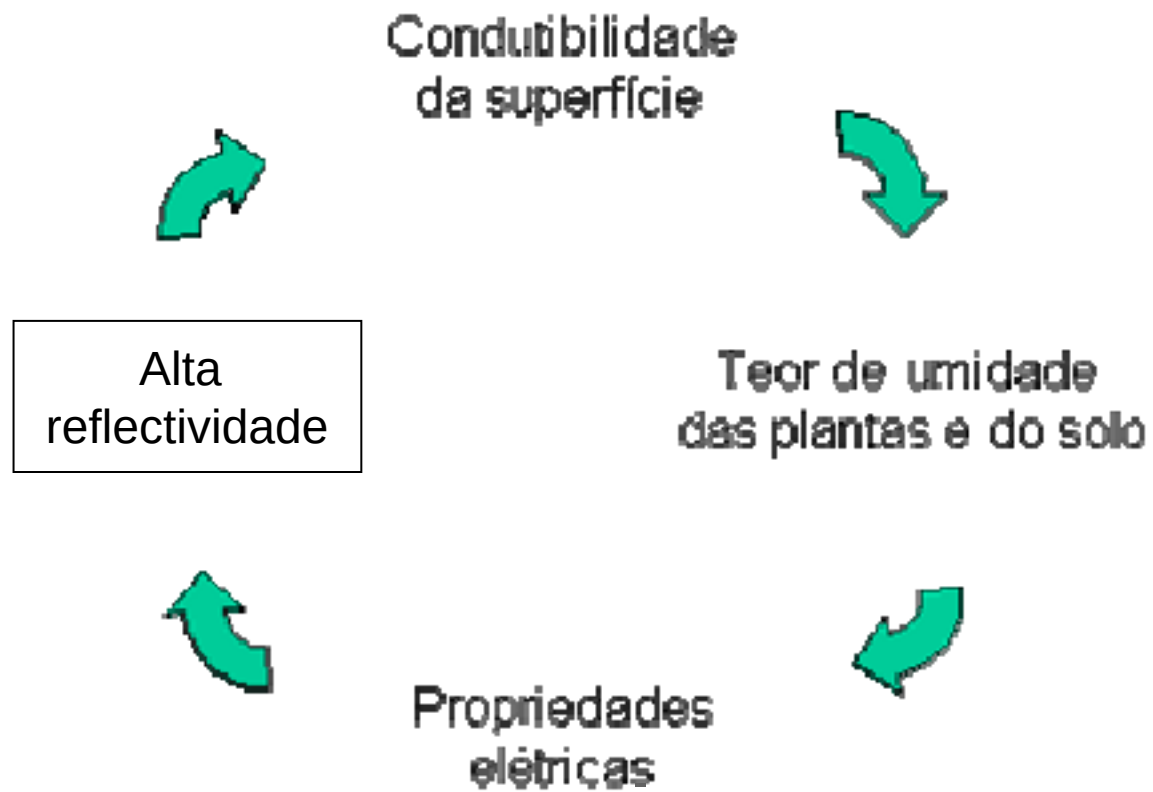


Rugosidade Superficial

Modelos de Dispersão da Superfície







**INTERAÇÕES ENTRE
A VEGETAÇÃO
E AS MICROONDAS**

RESPOSTA DA VEGETAÇÃO:

As microondas interagem com o dossel de conformidade com seus componentes (folhas, galhos, troncos). O fato de a vegetação estar rodeada de solo pode resultar no espalhamento da energia que penetra do dossel.

Quando o λ se aproxima do tamanho dos componentes da planta, o volume de espalhamento é forte: se o dossel for denso, verifica-se um retroespalhamento forte partindo da vegetação.

- λ menores (de 2 a 6 cm) são bons para sensoriar plantações herbáceas e folhas de árvores; e
- λ maiores (de 10 a 30 cm) são bons para sensoriar troncos.

Com relação a umidade, quanto mais úmida a vegetação mais reflete microondas.

As microondas interagem com o dossel de conformidade com seus componentes (folhas, galhos, troncos). O fato de a vegetação estar rodeada de solo pode resultar no espalhamento da energia que penetra do dossel.

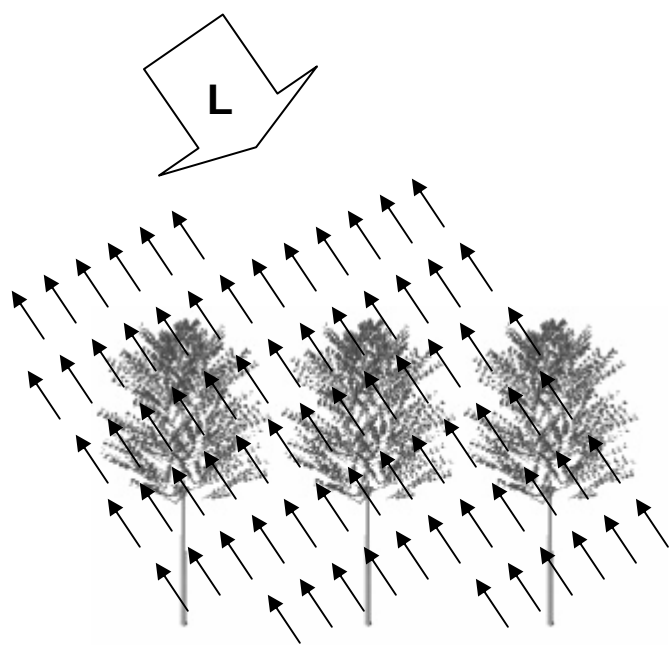
Quando o λ se aproxima do tamanho dos componentes da planta, o volume de espalhamento é forte: se o dossel for denso, verifica-se um retroespalhamento forte partindo da vegetação.

- λ menores (de 2 a 6 cm) são bons para sensoriar plantações herbáceas e folhas de árvores; e

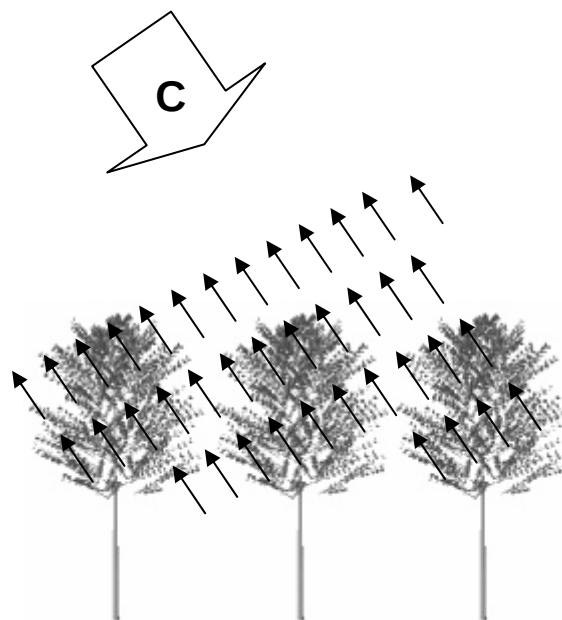
- λ maiores (de 10 a 30 cm) são bons para sensoriar troncos.

Com relação a umidade, quanto mais úmida a vegetação mais reflete microondas.

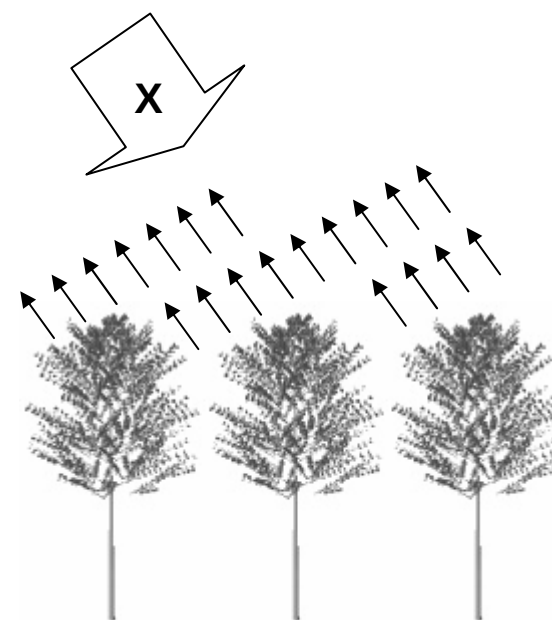
Penetração da radiação das diferentes bandas de radar no dossel vegetal



Banda L
23 cm



Banda C
6 cm



Banda X
2 cm

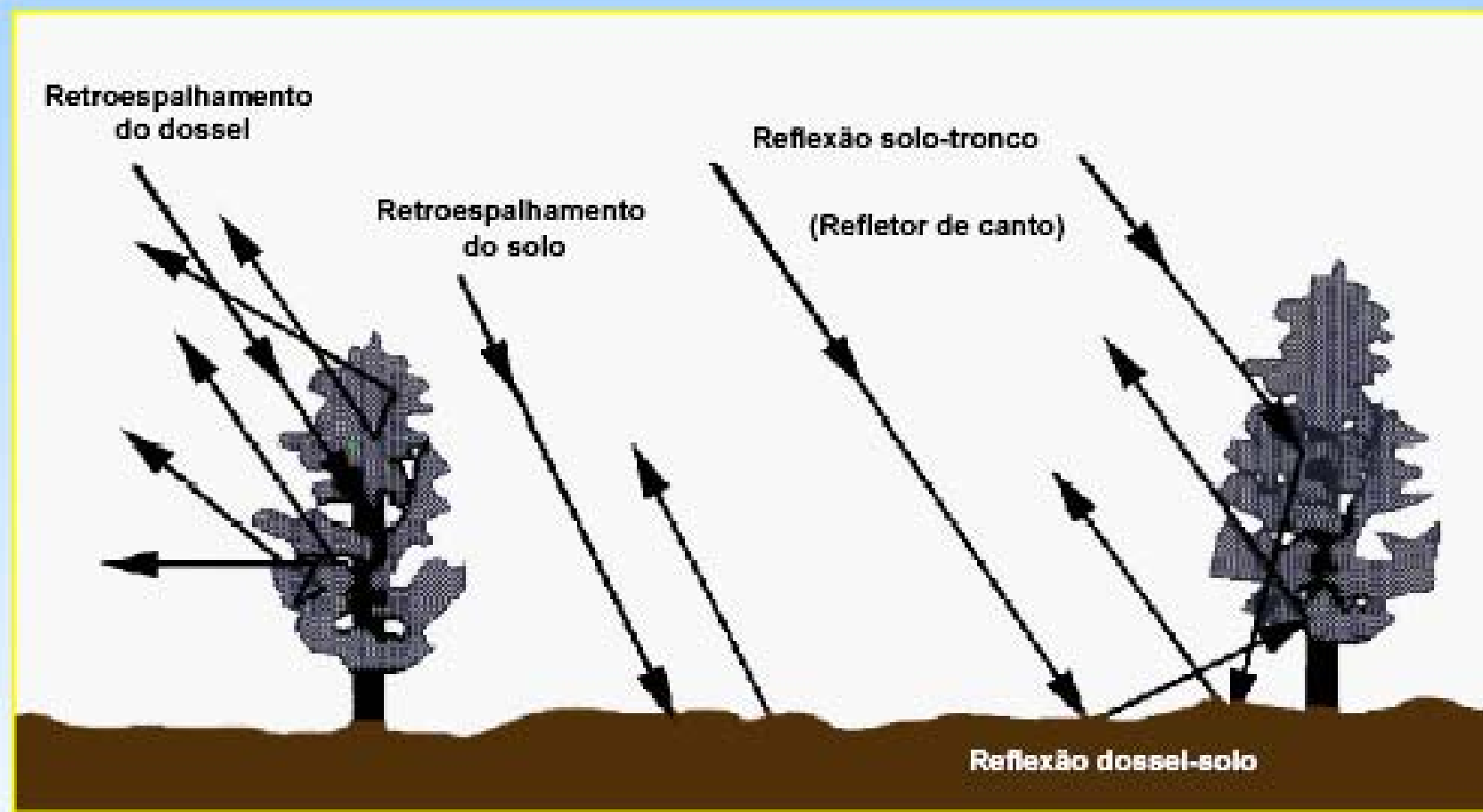
Espalhamento Volumétrico

O espalhamento volumétrico está relacionado com processos de dispersão múltipla em um meio, como a cobertura vegetal de uma plantação de milho ou de uma floresta. Este tipo de espalhamento pode também ocorrer em camadas de solo muito seco, areia ou gelo.

O espalhamento volumétrico é importante, pois influencia o retroespalhamento registrado pelo radar. O radar recebe os dois tipos de retroespalhamento, superficial e volumétrico.

A intensidade do espalhamento volumétrico depende das propriedades físicas do meio (sobretudo das variações na constante dielétrica) e das características do radar (comprimento de onda, polarização e ângulo de incidência).

Reflexões



Parâmetros do Alvo

~ Características da Vegetação ~

Características que controlam o retroespalhamento da vegetação:

- Características das plantas
 - estrutura e geometria das plantas (forma, tamanho e orientação das folhas, caules, ramos,...)
 - teor de água nas plantas (constante dielétrica complexa)
- Características do dossel da vegetação
 - geometria vertical e horizontal (extratos simples ou múltiplos, espaçamento entre as plantas, orientação das linhas)
 - distribuição e densidade da vegetação (proximidade das coroas, proporção da cobertura do terreno) influência vis-à-vis da superfície do terreno subjacente (umidade, topografia, solo)
 - composição (mistura de espécies)

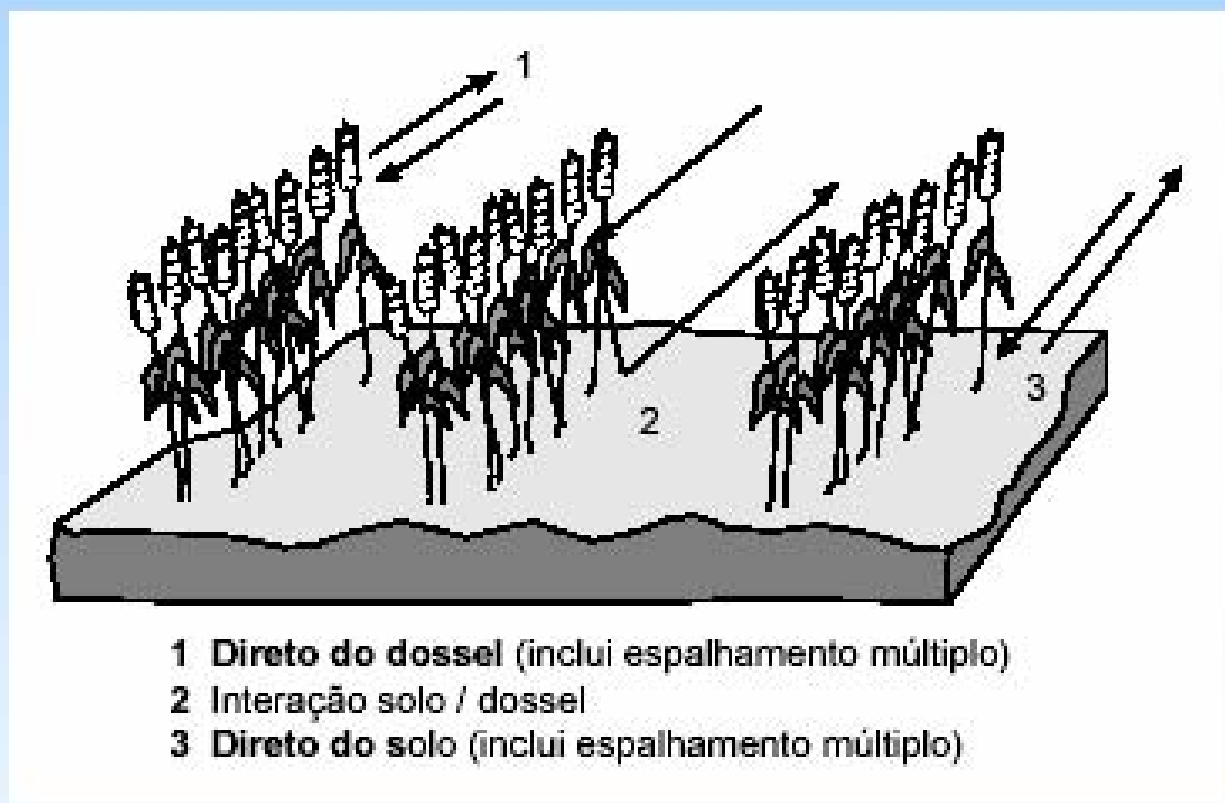
Parâmetros do Alvo

~ Características da Vegetação ~

O retroespalhamento da vegetação é utilizado, juntamente com dados auxiliares, para inferir informações sobre

- tipo de vegetação
- estágio de crescimento
- condição da vegetação ou saúde
- vigor da vegetação ou produção de safra
- práticas de plantio, cultivo e colheita
- práticas da gerência do solo
- distúrbios (por exemplo, fogo, insetos)
- características do solo subjacente e condições climáticas
- monitoramento de quebra das leis e tratados

Espalhamento Proveniente de Alvos Agrícolas



Brisco, B. e R.J. Brown, 1998, "Agricultural Applications with Radar", Chapter 7, Manual of Remote Sensing, 3ª ed., Vol. 2.

**INTERAÇÕES ENTRE O SOLO
E AS MICROONDAS
E ENTRE A ÁGUA
E AS MICROONDAS**

RESPOSTA DO SOLO:

Porque a E da água é cerca de 10 vezes maior que a do solo seco, é possível detectar a presença de umidade à poucos centímetros da superfície. A faixa L é particularmente boa quando o solo está muito seco.

RESPOSTA DA ÁGUA E DO GELO:

Quando a superfície de água está completamente LISA, tem-se um reflector especular. Se a superfície estiver rugosa, haverá espalhamento maior ou menor conforme o tipo de rugosidade.

A faixa X é boa para detectar gelo

A faixa L é boa para mostrar a extensão do gelo



Teor de Umidade

A presença de umidade aumenta a constante dielétrica complexa do material. A constante dielétrica influencia a capacidade do material em absorver, refletir e transmitir energia na faixa de microondas.

O teor de umidade de um material pode alterar suas propriedades elétricas, afetando o modo como esse material aparece numa imagem de radar. Materiais idênticos podem variar na aparência em momentos ou locais diferentes, de acordo com a quantidade de água que contém.

A refletividade, e portanto, o brilho da imagem da maioria da vegetação e superfícies naturais, aumenta com o aumento do seu teor de umidade.

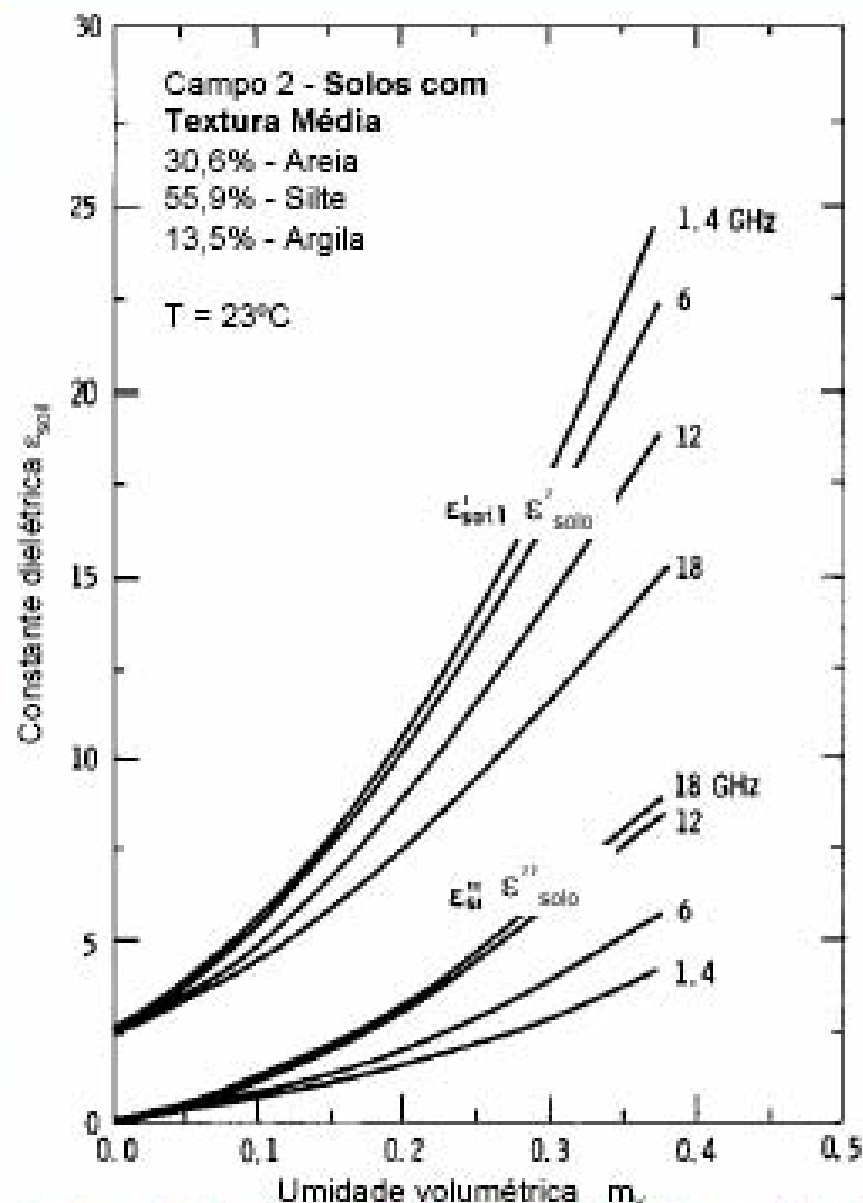
As microondas podem penetrar em materiais muito secos, como a areia do deserto. O espalhamento resultante é afetado tanto pelas propriedades superficiais como pelas sub-superficiais. Em geral, quanto maior o comprimento de onda do radar, maior é a penetração da energia no material.

Parâmetros do Alvo

~ Características do Solo ~

- Rugosidade superficial (normalmente relacionada com tratos culturais e medida através dos parâmetros desvio-padrão (rms) da altura da superfície e comprimento da correlação)
- Teor de água da camada superficial (umidade do solo e constante dielétrica complexa)
- A profundidade de penetração depende do teor de umidade dos solos, frequência e ângulo de incidência do radar
- Macro-estrutura superficial (i.e. características das mecanização em linhas, direção de mecanização e estruturas das sementeiras)

Relação entre a Constante Dielétrica e a Umidade do Solo



Constante dielétrica também depende da:

- frequência
- textura do solo
- temperatura do solo

Fonte: Ulaby, F.W., R.K. Moore e A.K. Fung
1986 "Microwave Remote Sensing, Active to Passive",
Volume III, p. 2096.

Principais aplicações de radar imageador (SAR)

- **Agricultura**

- Identificação e mapeamento de culturas agrícolas e fiscalização
- Identificação da ação de determinadas pragas e doenças
- Determinação relativa da umidade de solos; eficiência de sistemas de irrigação

- **Cartografia**

- Levantamentos planimétricos (escalas 1:20.000 à 1:500.000)
- Levantamento altimétrico (interferometria, estéreo)

- **Florestas**

- Determinação de grandes classes de floresta
- Identificação de ação de determinadas doenças
- Mapeamento de desflorestamento
- Identificação de áreas de corte seletivo
- Estimativa de biomassa

Principais aplicações de radar imageador (SAR)

- **Geologia**

- Análise estrutural (falhas, dobras, estruturas intrusivas, etc)
- Análise geomórfica (glacial, vulcânica, deslizamentos de terra, drenagem)
- Lineamentos
- Litologia

- **Hidrologia**

- Detecção de umidade do solo
- Detecção de vegetação flutuante
- Detecção de poluição de corpos de água

- **Meio Ambiente**

- Monitoramento de enchentes
- Ação de garampelos
- Direitos territoriais de pesca
- Poluição do mar

Principais aplicações de radar imageador (SAR)

- **Gelo e Neve**

- Mapeamento/classificação de gelo
- Monitoramento de degelo - inundações

- **Oceanografia**

- Monitoramento do estado do mar
- Espectro de ondas para modelos numéricos de previsão
- Mapeamento da topografia submarina (condições específicas)
- Poluição marinha causada por derrames de óleo e filmes
- Detecção de barcos - pesca ilegal
- Apoio para o estabelecimento de rotas marítimas

- **Uso da Terra**

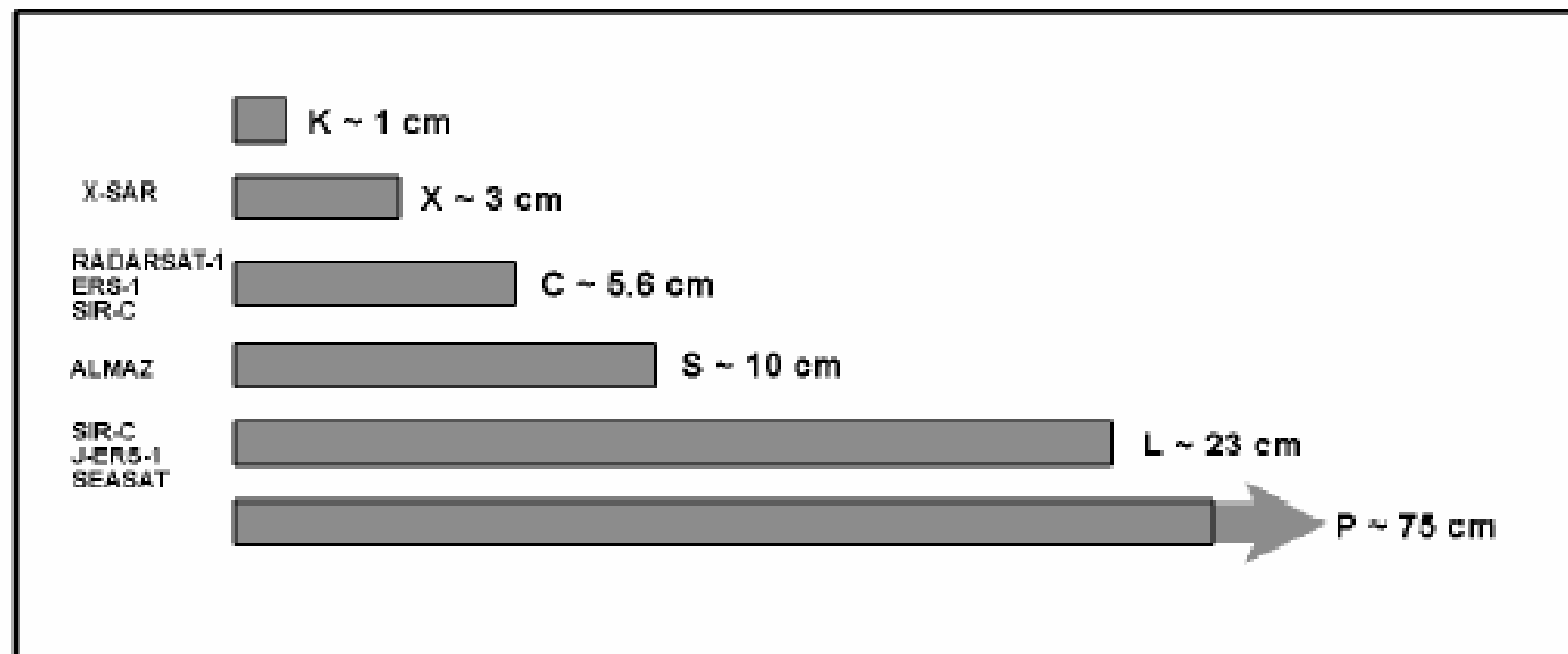
- Classificação do uso da terra
- Inventário, monitoração ("change detection"), planejamento
- Monitoramento de padrões de irrigação/déficit hídrico
- Monitoramento de salinização de solos

SAR Orbitais

HISTÓRICO:

- Plataformas aéreas:
- 1950 os militares desenvolveram o SLAR (side looking airborne radar)
- 1967 mapeamento do Panama (20.000 km²)
- 1971 mapeamento da Venezuela (500.000 km²)
- 1971/76 Projeto Radam Brasil – mapeou 8.500.000 km²)
- Plataformas orbitais:
- 1978 SEASAT
- 1980 SIR & COSMOS
- 1990's Almaz-1 (russo)
- ERS-1 (consórcio europeu)
- JERS-1 (japones)
- RADARSAT (canadense)
- 2006 ALOS (japones) óptico e radar

Tamanho Relativo dos Comprimentos de Onda na Faixa de Microondas



Escolha da Frequência do Radar - 1

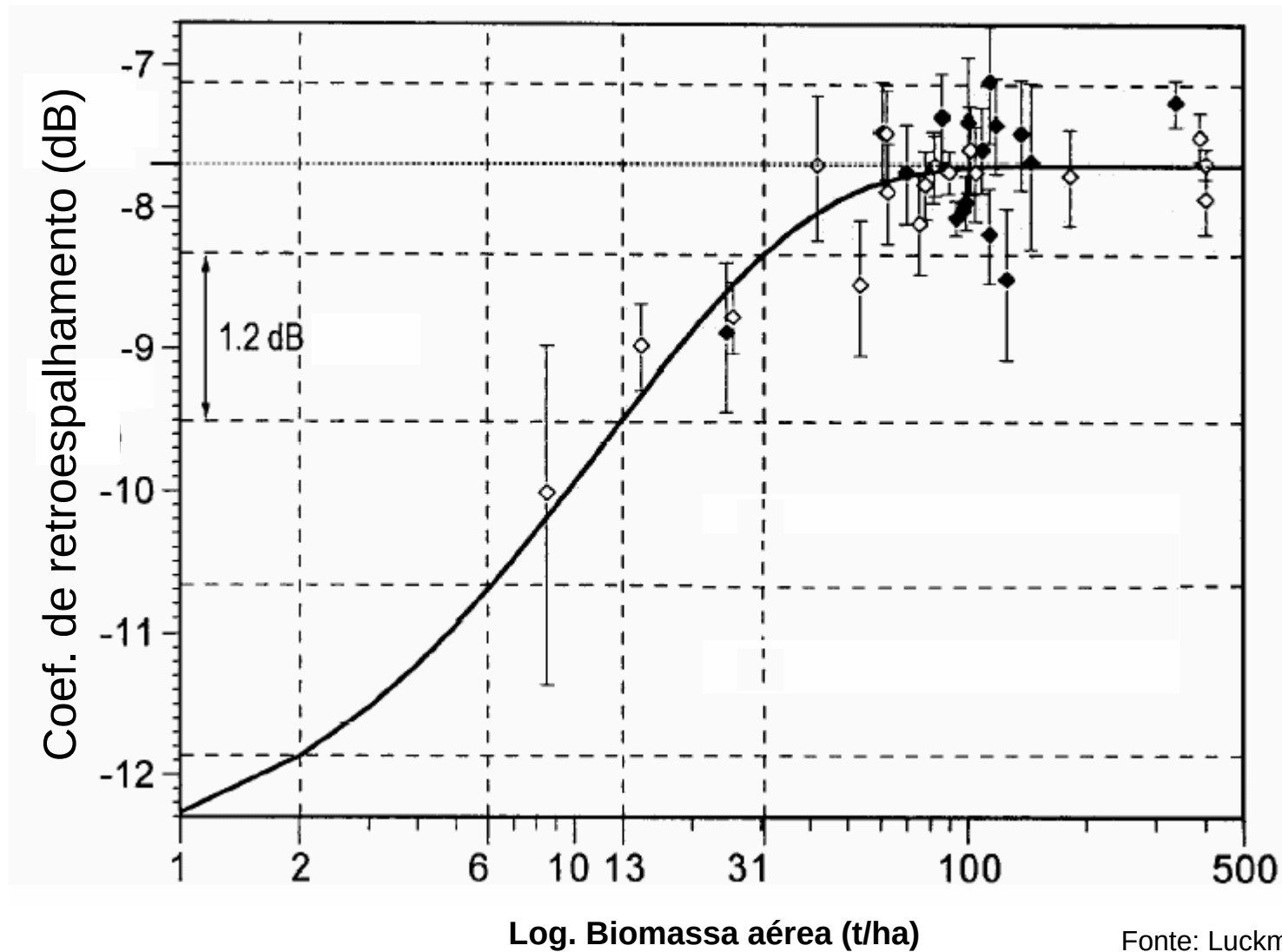
- Parâmetros de aplicação:
 - O comprimento de onda do radar deverá ser compatível com o tamanho das feições do alvo que se deseja discriminar
 - ex: Diferenciação do gelo, pequenas feições, usar banda X
 - ex: Cartografia geológica, grandes feições, usar banda L
 - ex: Penetração no interior da folhagem, melhor com frequências baixas, usar banda P

Em geral, a banda C é uma boa solução de compromisso

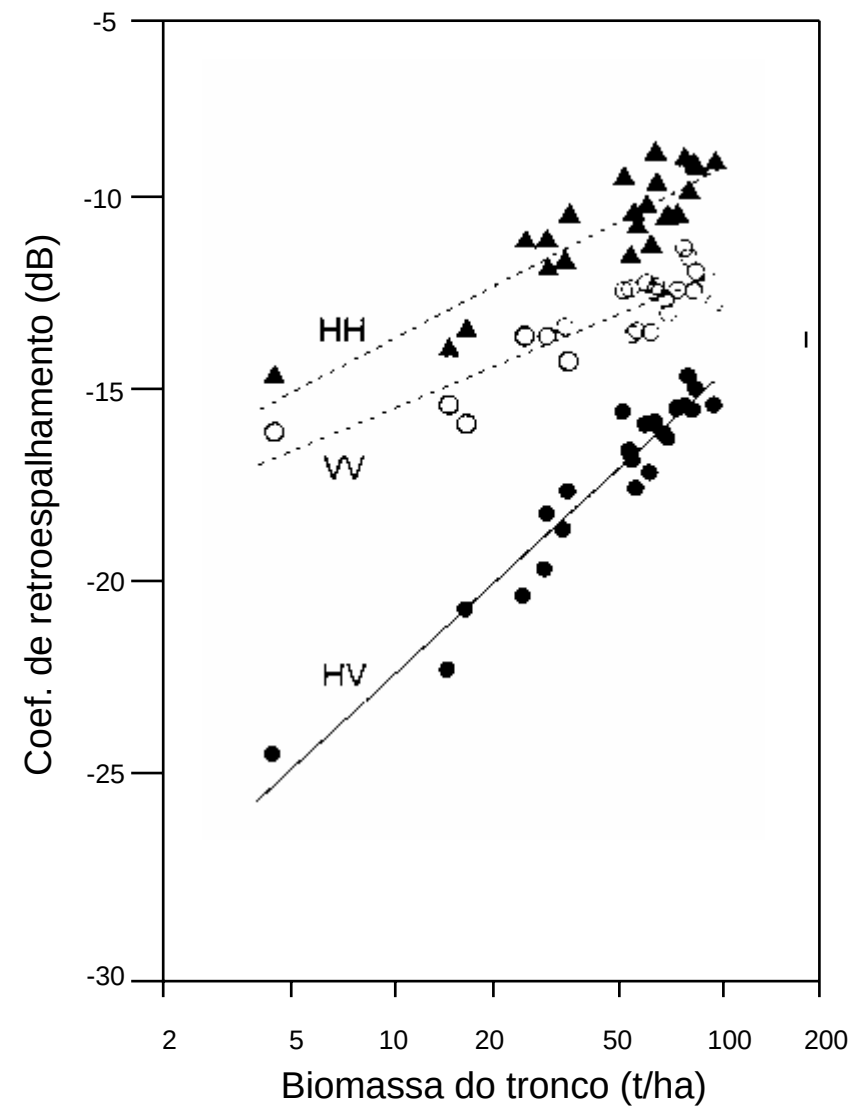
Escolha da Frequência do Radar - 2

- Parâmetros do sistema:
 - Frequências baixas:
 - Processamento mais difícil (RCMC, aberturas longas)
 - Necessita de antenas e alimentações maiores
 - Eletrônica mais simples
 - Frequências elevadas:
 - Necessita de mais potência
 - Eletrônica mais complicada
 - Boa disponibilidade de componentes para banda X
- Note que muitos SARs para pesquisa têm faixas de frequência múltipla
 - ex: JPL AIRSAR, SIR-C, Convair-580

Relação entre o coeficiente de retroespalhamento (dB) na banda L e o logaritmo da biomassa de uma floresta

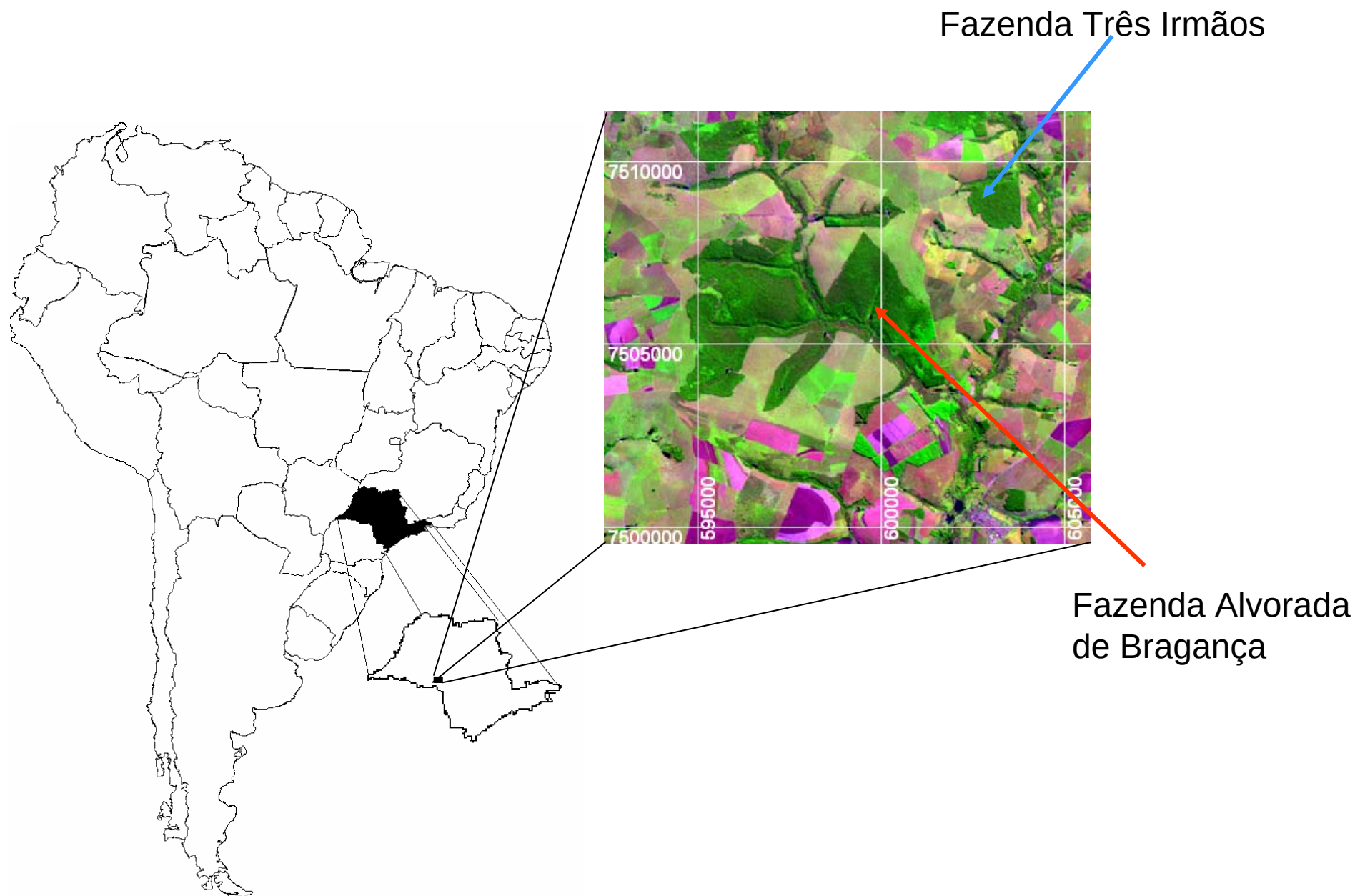


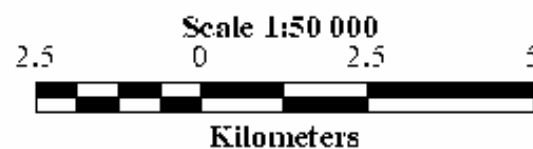
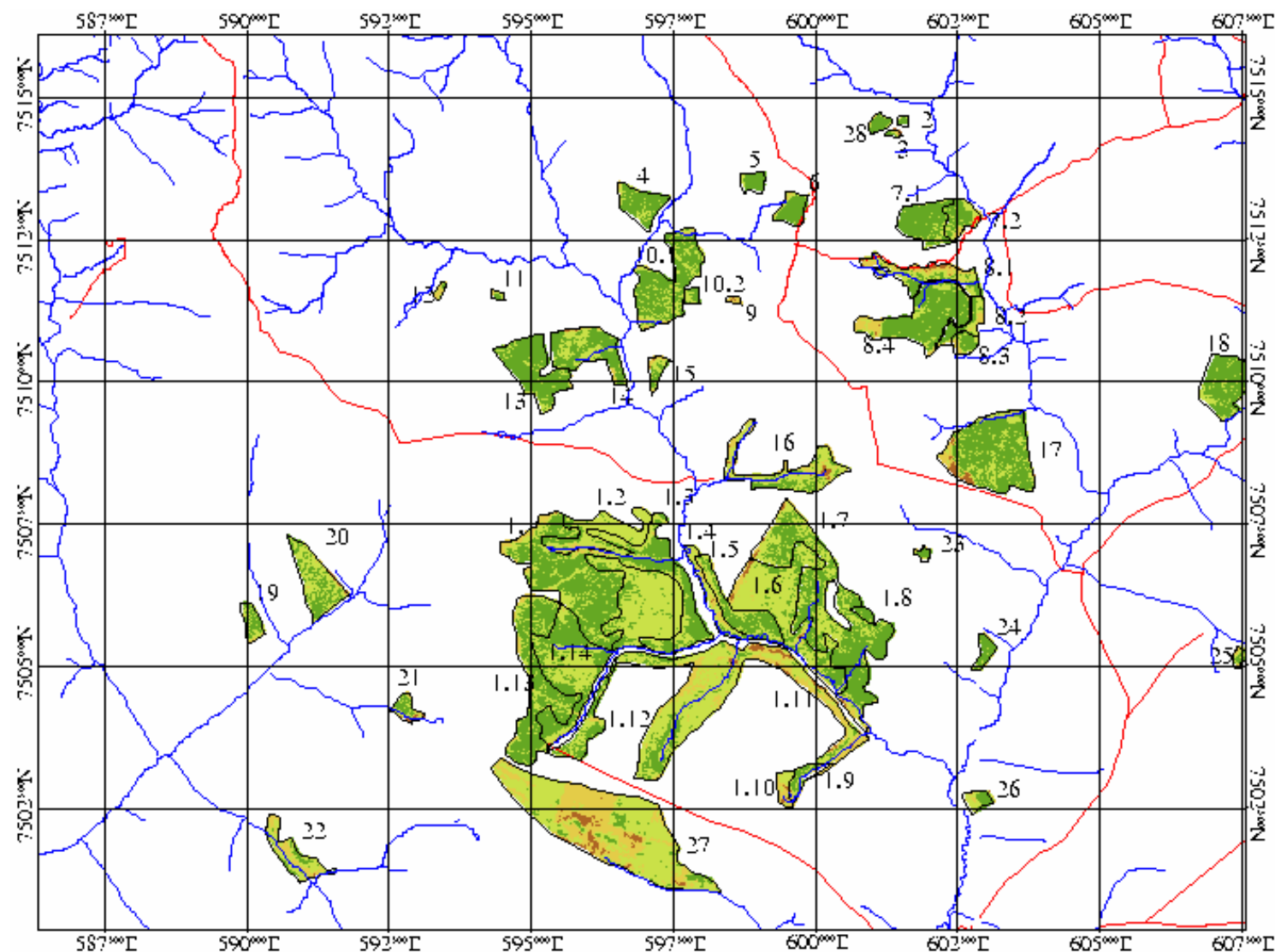
Relação entre o coeficiente de retroespalhamento (dB) na banda P e a biomassa de uma floresta



Fonte: le Toan et al., 1992

Área de estudo

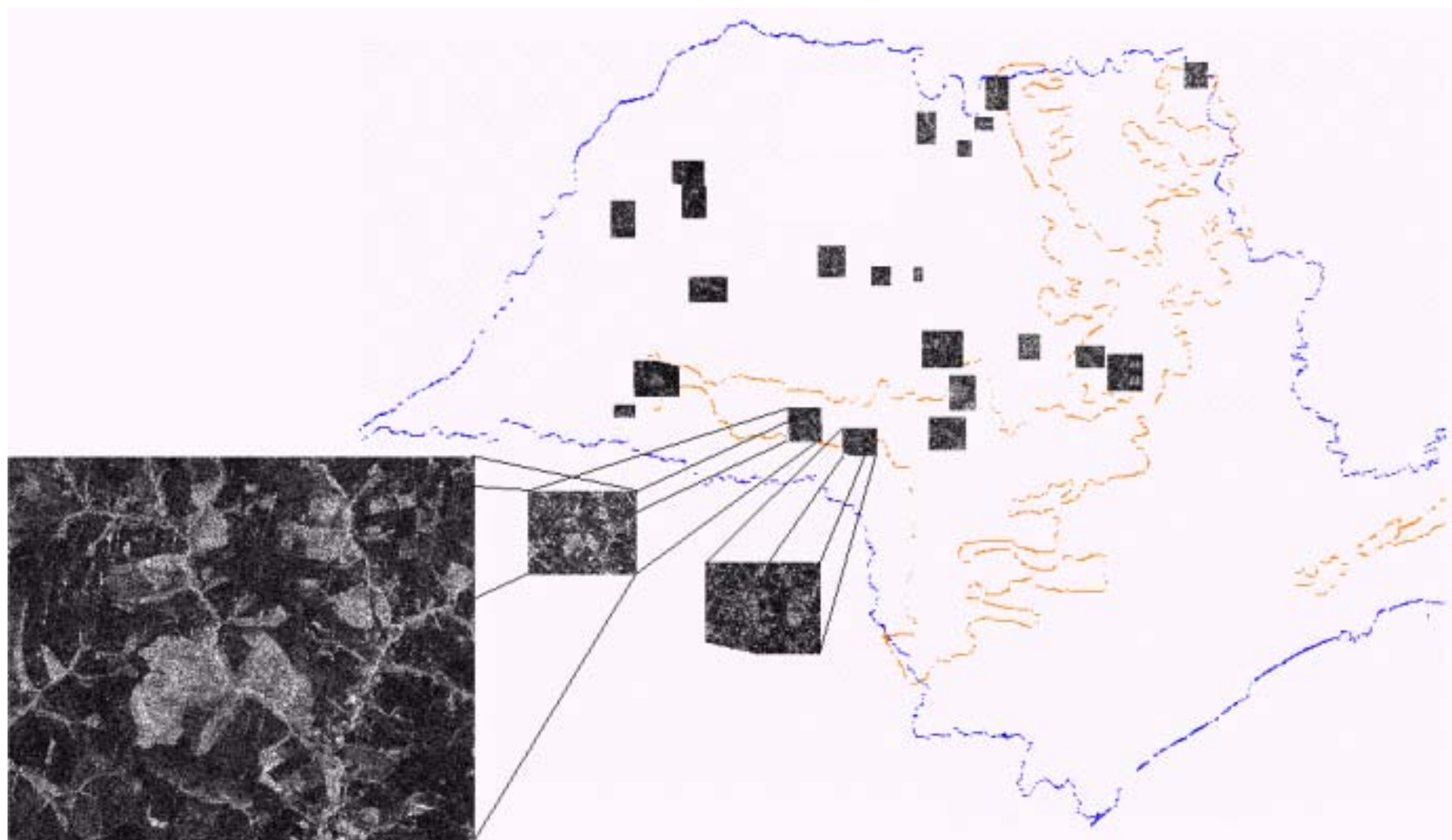


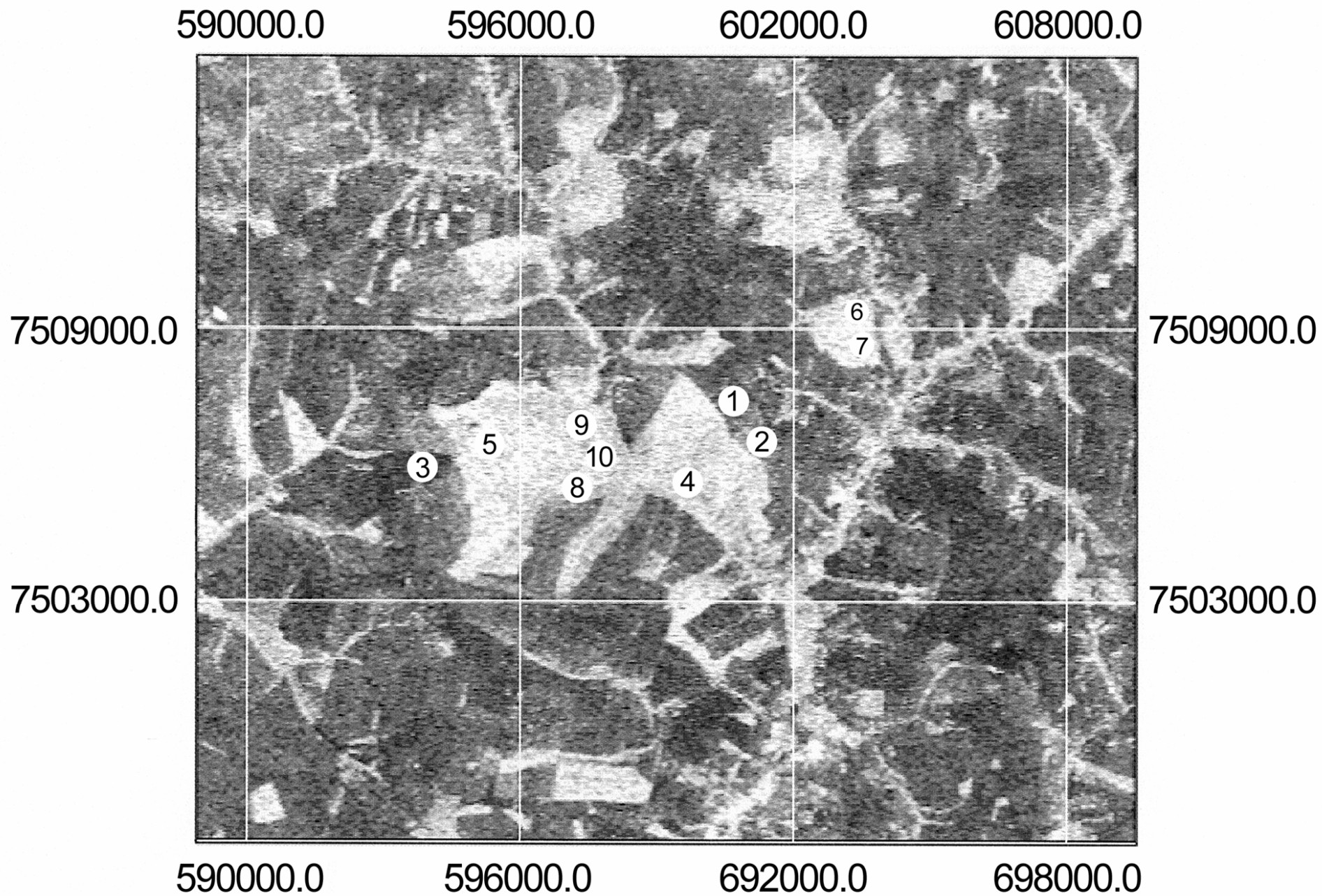


Datum: Corrego Alegre
UTM 22 K
Imagem Landsat TM de 20 de maio de 1999

Physiognomies classes

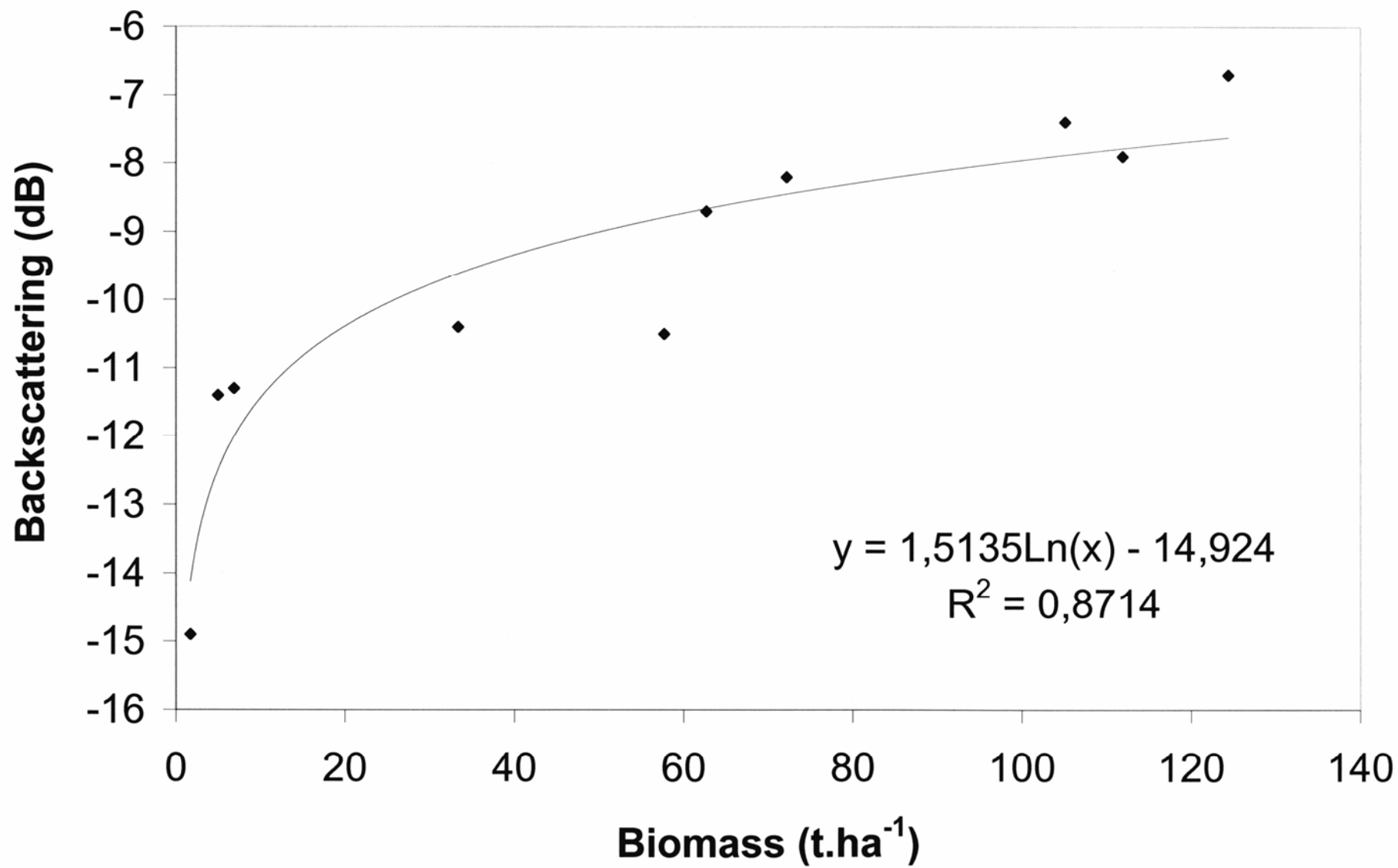
- Bare soil
- Campo (grassy form)
- Campo Cerrado
- Cerrado stricto sensu (type I)
- Cerrado stricto sensu (type II)
- Cerradao (woody form)





Pontos de amostragem	Fitomassa aérea * (t . ha⁻¹)	Fitomassa aérea média (kg)	DAP (cm)	Distância média (m)	σ (dB)
1	3.32	243.30	28.88	38.29	- 14.53
2	4.89	173.20	24.70	18.82	-10.99
3	6.60	83.10	18.36	11.20	-9.79
4	32.24	32.25	11.40	3.30	- 9.03
5	55.80	61.30	14.16	3.30	- 8.93
6	60.53	61.50	13.70	3.20	- 8.49
7	90.08	44.90	11.30	2.20	- 7.90
8	69.89	80.00	16.42	3.55	- 7.04
9	108.27	106.00	17.20	3.13	- 7.48
10	120.35	80.00	16.42	3.55	- 7.18

* Obtida por método alométrico.



Interferometria (InSAR)

- Biomassa total
 - Bandas L e P (testes na floresta amazônica)
 - Santos *et al.*, 2003

Biomassa total

- O pulso-radar em frequência da **banda P** penetra na estrutura da floresta, atingindo a superfície do solo, podendo ser utilizado para a geração de um Modelo Digital de Elevação (DEM) por interferometria.
- O pulso-radar em **banda X**, por sua vez, é rebatido pelo dossel, refletindo o topo da floresta o que permite gerar um Modelo Digital de Superfície (DSM).
- A interferometria das duas bandas (P e X), que é a diferença entre os dois modelos, representa a altura da cobertura vegetal, cuja imagem resultante pode ser aplicada para gerar um mapeamento temático com a espacialização das variações de biomassa.
- Um modelo de biomassa foi definido:
 - $\text{biomass} = 44.965 + 13.887 \times h_{int} + 10.556 \times \sigma_{HH}$

Análises globais

- Bandas X e Ku – para de Precipitação
 - Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU), e Humidity Sounder for Brazil (HSB)
→ satélite Aqua da EOS (Earth Observing System).
- Banda L – para Umidade do Solo
 - Satélite SMOS (soil moisture observation satellite)
 - Em órbita desde dezembro de 2009