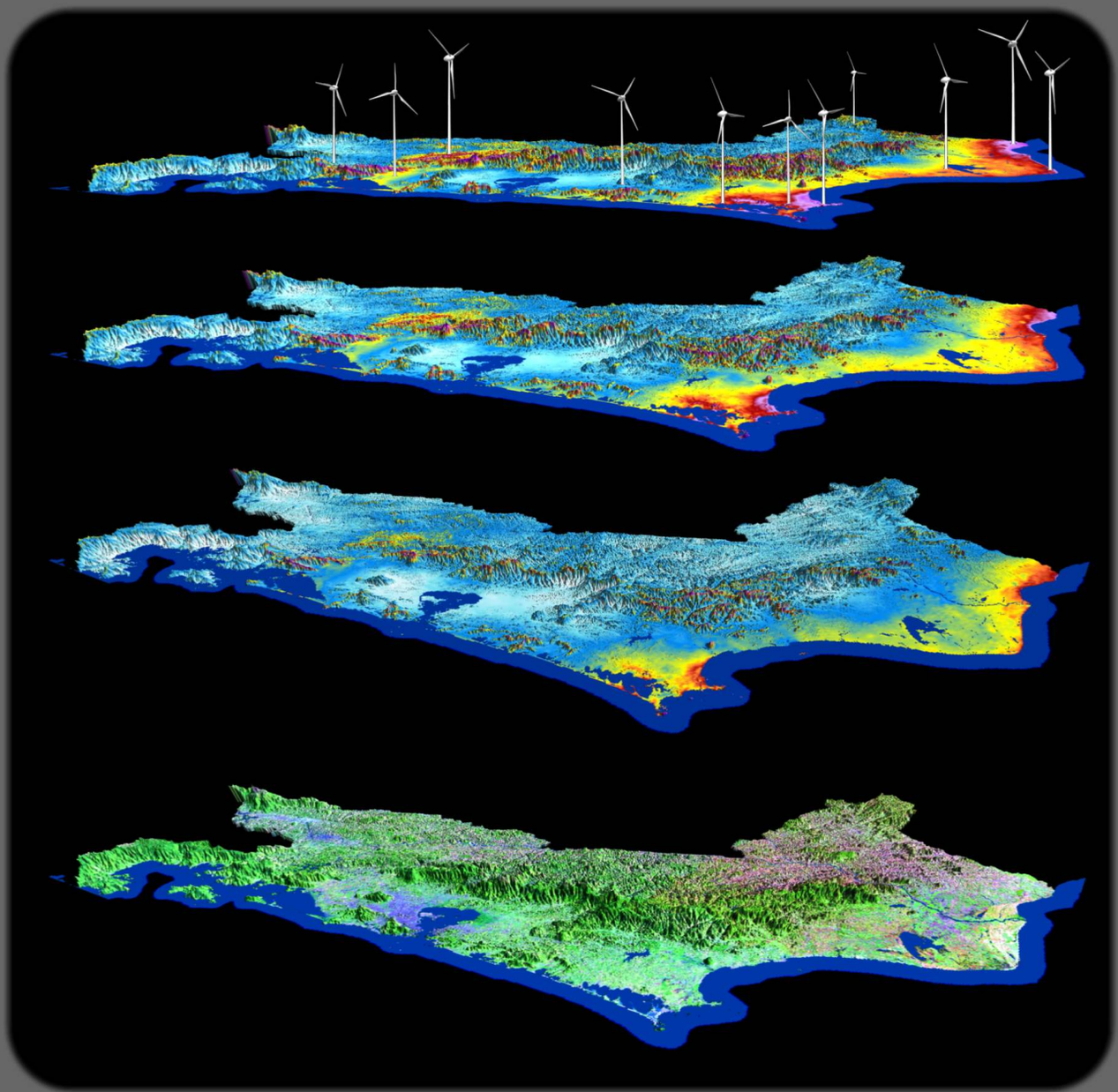
ESTADO do RIO DE JANEIRO Atlas Eólico



# ESTADO DO RIO DE JANEIRO

# Atlas Eólico

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

ESTADO DO RIO DE JANEIRO
SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA,
DA INDÚSTRIA NAVAL E DO PETRÓLEO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO

# Atlas Eólico

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA,
DA INDÚSTRIA NAVAL E DO PETRÓLEO

Projeto de Incentivo ao Uso de Fontes Alternativas de Energia
e à Conservação de Energia no Estado do Rio de Janeiro

Realizado com o suporte da

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

Termo de Cooperação Técnica e Financeira SEINPE-ELETROBOLT 02-01-2002

Dados anemométricos usados com autorização das empresas:
**SIIF ÉNERGIES DO BRASIL**
**GAMESA ENERGÍA BRASIL**
**SEAWEST DO BRASIL**


Elaborado por
**Odilon A. Camargo do Amarante**
**Fabiano de Jesus Lima da Silva**
**Luiz Gonzaga Rios Filho**

CAMARGO SCHUBERT
*Engenharia Eólica*

*Atualmente, está comprovado que o uso da energia dos ventos, para a realização de trabalho e produção de energia elétrica, é uma excelente alternativa por ser produto de recurso natural inesgotável e gratuito, que além de não poluente é totalmente sustentável do ponto de vista ambiental. Desta forma, o Governo do Estado do Rio de Janeiro pretende, ao apresentar o ATLAS EÓLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, contribuir para o desenvolvimento do uso dessa energia no território fluminense. O Atlas insere-se no objetivo estratégico de introduzir energias renováveis e de baixo impacto sócio-ambiental na matriz energética do Estado, com vistas ao seu desenvolvimento sustentável. Seu objetivo específico é o de dar subsídio técnico ao estabelecimento de uma adequada política de uso e desenvolvimento da energia dos ventos.*

*A iniciativa da SEINPE, com o suporte da Sociedade Fluminense de Energia Ltda (SFE), na realização deste trabalho, disponibilizando informações sobre as medições dos ventos, lança um desafio ao cenário energético do país, que nos próximos anos ampliará o uso das fontes alternativas. Portanto, o Atlas é oportuno e adequado, devendo contribuir para o desenvolvimento do Estado do Rio de Janeiro e inseri-lo expressivamente no emergente mercado de energia eólica.*

***ROSINHA GAROTINHO***
***Governadora do Estado do Rio de Janeiro***

*A recente e dramática necessidade de racionamento de energia elétrica nas regiões Sudeste e Nordeste do Brasil, evidenciaram a necessidade de investimentos na expansão da geração elétrica e uma maior diversificação da matriz energética.*

*Historicamente, o inegável potencial eólico do Estado do Rio de Janeiro tem sido aproveitado através de cataventos para bombeamento d'agua nas salinas da Região dos Lagos. Por outro lado, o futuro próximo trará também ao Brasil uma expansão da geração de energia elétrica a partir dos ventos, na larga escala. Buscando se antecipar, a Secretaria de Estado de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo, do Governo do Estado do Rio de Janeiro, promoveu a elaboração do ATLAS EÓLICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, objetivando gerar uma ferramenta de auxílio ao planejamento do Governo estadual e um valioso instrumento de atração e agilização de investimentos privados para o Estado do Rio de Janeiro, ao indicar aos investidores e à comunidade as melhores áreas e principais informações relevantes.*

*O Atlas contém informações detalhadas sobre os regimes dos ventos no Estado do Rio de Janeiro, calculadas a partir da mais rigorosa metodologia, utilizando técnicas modernas e tendo como base medições de alta qualidade. As informações fornecidas permitirão identificar os potenciais de aproveitamento da energia eólica, tornando possível, assim, a elaboração de estudos preliminares de viabilidade técnica e econômica, além de identificar locais adequados para as medições com vistas à implantação de parques eólicos. Cabe ressaltar, que o uso da energia eólica, é especialmente viável em algumas regiões do estado, em especial a Região dos Lagos e o Norte fluminense que apresentam os melhores potenciais, como este Atlas passa a apresentar.*

*O estudo de potencial Eólico do estado só se tornou possível pelo fundamental suporte da Eletrobolt - Sociedade Fluminense de Energia Ltda, complementado pelo fornecimento de valiosos dados anemométricos pela SIIF Énergies do Brasil, Gamesa Energía Brasil e SeaWest do Brasil. Com esta conjugação de ações, tornou-se possível disponibilizar à comunidade o conhecimento detalhado deste grande potencial energético - natural e renovável - associado ao regime de ventos no estado do Rio de Janeiro. Especiais agradecimentos a Kátia Leite Mansur e Hernani Vieira, do Departamento de Recursos Minerais (DRM-RJ) e ao Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro (CIDE) pelo inestimável suporte nas bases cartográficas e informações complementares.*

*Engº WAGNER GRANJA VICTER*
*Secretário de Estado de Energia, Indústria Naval e Petróleo*
*Governo do Estado do Rio de Janeiro*

*A SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda. sente-se honrada em participar do "Projeto de Incentivo ao Uso de Fontes Alternativas de Energia e à Conservação de Energia no Estado do Rio de Janeiro", na qualidade de patrocinadora da elaboração deste Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro, fruto do pioneirismo do Governo do Estado do Rio de Janeiro que, através da Secretaria de Estado da Energia, da Indústria Naval e do Petróleo - SEINPE, vem atuando de maneira inequívoca na expansão e diversificação da matriz energética do Rio de Janeiro.*

*A energia eólica apresenta baixíssimo impacto ambiental, é renovável e tem se mostrado viável técnica e econômicamente, ou seja, atende precisamente às diretrizes de desenvolvimento sustentável, cada vez mais valorizadas pelas sociedades evoluidas, nas quais se inclui a sociedade do Rio de Janeiro. Além disso, é a fonte energética que tem apresentado mundialmente a maior taxa de crescimento de capacidade geradora.*

*Este Atlas do Potencial Eólico do Rio de Janeiro representa o resultado de uma bem sucedida parceria da SFE - Sociedade Fluminense de Energia com o Governo do Estado do Rio de Janeiro e a SEINPE, no objetivo de desenvolver iniciativas que visem o desenvolvimento econômico e social e a preservação do meio ambiente no Estado do Rio de Janeiro.*

*ORLANDO GONZÁLEZ*
*SFE - Sociedade Fluminense de Energia*

# ÍNDICE


**1. INTRODUÇÃO** 1

**2. ENERGIA EÓLICA E TECNOLOGIA**

2.1 A ATMOSFERA EM MOVIMENTO 3
2.2 HISTÓRICO 4
2.3 A ENERGIA DO VENTO 5
2.4 TECNOLOGIA 6
2.5 POTENCIAIS EÓLICOS 8

**3. O ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

3.1 GEOGRAFIA E DEMOGRAFIA 11
3.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA 12
3.3 INFRA-ESTRUTURA 15
3.4 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA 18
3.5 REGIMES DE VENTO 20

**4. MAPAS EÓLICOS DO RIO DE JANEIRO**

4.1 ROSA-DOS-VENTOS ANUAL, FREQÜÊNCIAS X DIREÇÃO 25
4.2 ROSA-DOS-VENTOS ANUAL, VELOCIDADES X DIREÇÃO 27
4.3 REGIME DIURNO ANUAL 29
4.4 FATOR DE FORMA DE WEIBULL ANUAL 31
4.5 DENSIDADE DO AR, MÉDIA ANUAL 33
4.6 POTENCIAL EÓLICO A 50 metros DE ALTURA 35
4.7 POTENCIAL EÓLICO A 75 metros DE ALTURA 37
4.8 POTENCIAL EÓLICO A 100 metros DE ALTURA 39
4.9 POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 50 metros DE ALTURA 41
4.10 POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 75 metros DE ALTURA 43
4.11 POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 100 metros DE ALTURA 45
4.12 FATOR DE FORMA DE WEIBULL SAZONAL 47

**5. ANÁLISES E DIAGNÓSTICOS**

5.1 POTENCIAL EÓLICO ESTIMADO 49
5.2 ÁREAS MAIS FAVORÁVEIS 51
5.3 ASPECTOS ESTRATÉGICOS 63

**6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** 65

**ANEXOS**

I. METODOLOGIA 67
II. FÓRMULAS E MAPAS ÚTEIS 81

# 1. INTRODUÇÃO

A oferta de energia elétrica atrai indústrias e empregos e promove o desenvolvimento. Por outro lado, crises de escassez de energia podem trazer desequilíbrios, que se refletirão ao longo de anos na economia de um país. Esta lição recente, que ainda afeta a vida dos brasileiros, evidencia a grave necessidade de diversificação na matriz energética e expansão continuada da geração elétrica.

Entre as alternativas para produção de energia elétrica, o aproveitamento dos ventos tem apresentado as maiores taxas de expansão no mundo: ao final de 2002, cerca de 30 GW de capacidade eólica operavam no mundo, principalmente em países como Alemanha, Espanha, Dinamarca, Holanda, Estados Unidos, Índia e China. Também entre as formas de geração elétrica, as usinas eólicas são as mais limpas sob o ponto de vista ambiental: não emitem poluentes e tém baixo nível de ruído; além disso, coexistem com áreas agrícolas, geram empregos na fabricação, instalação e operação dos aerogeradores, e contribuem para a economia regional nas áreas onde são instaladas.

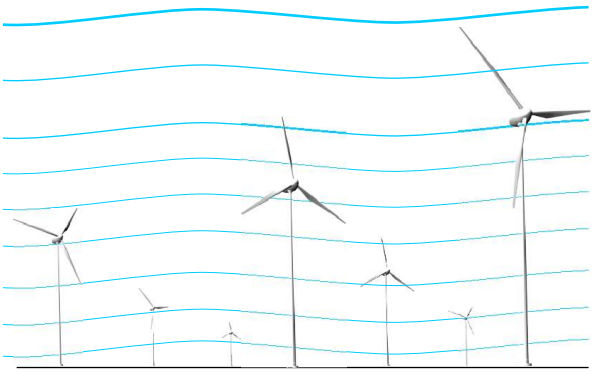
Desde um passado remoto, os famosos cataventos das salinas de Cabo Frio e São Pedro D'Aldeia aproveitam e confirmam o potencial eólico do Estado do Rio de Janeiro. Para o futuro próximo, os ventos do estado também servirão à geração elétrica em larga escala. Em seu papel indutor de políticas e ações para o desenvolvimento energético estadual, a Secretaria de Estado de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo, do Governo do Estado do Rio de Janeiro, promove o presente Atlas Eólico, como suporte ao planejamento do Governo estadual e à atração e agilização de investimentos, ao indicar aos investidores e à comunidade as melhores áreas e principais informações relevantes sobre mais um importante recurso natural do Estado do Rio de Janeiro.

Os mapas do potencial eólico foram realizados em base geográfica georreferenciada, para todo o território fluminense na resolução horizontal de 200m x 200m, o que fornece a informação deste recurso energético com um detalhamento inédito no Brasil. Este mapeamento foi viabilizado através do Projeto de Incentivo ao Uso de Fontes Alternativas de Energia e à Conservação de Energia no Estado do Rio de Janeiro, e realizado com o suporte e gerenciamento da SFE - Sociedade Fluminense de Energia (Usina Termelétrica Eletrobolt), através de Termo de Cooperação Técnica e Financeira. Também fundamental foi a cessão de dados anemométricos medidos em torres altas e locais representativos, por parte das empresas SIIF Énergies do Brasil, Gamesa Energia Brasil e SeaWest do Brasil.

Os regimes de vento na camada-limite atmosférica caracterizam-se pela sua acentuada variação geográfica, influenciados pela topografia e rugosidade da superfície terrestre, e também por fenômenos sinóticos e de mesoescala. Todos estes fatores foram levados em conta no cálculo dos mapas do presente Atlas, através de modelamento de mesoescala MesoMap - realizado na resolução de 3.6km x 3.6km. Além dos dados anemométricos, foram utilizados dados meteorológicos de reanálise (NCAR), para um período de 15 anos, visando a representatividade climatológica dos resultados. A interpolação final da distribuição dos regimes estatísticos de vento foi realizada por modelamento tridimensional de camada-limite (WindMap), sobre modelos digitais de relevo e rugosidade de todo o Estado, desenvolvidos a partir de processamento de cartas IBGE e imagens de satélite Landsat.

Os mapas temáticos apresentam o potencial eólico do Rio de Janeiro através de parâmetros estatísticos de velocidade e direção dos ventos, bem como seus regimes diurnos e sazonais. As informações são apresentadas em escalas temáticas com 256 níveis de cor, buscando maximizar o detalhamento qualitativo e quantitativo da informação. Aos mapas do potencial eólico estão sobrepostos a malha viária, os centros urbanos e principais consumidores de energia elétrica, o sistema elétrico estadual existente - geração, transmissão e subestações - e as áreas com restrições ambientais (parques, reservas).

A partir de todos os dados compilados, são realizadas análises e projeções, compondo o diagnóstico mais atual sobre as possibilidades de inserção desta fonte na matriz energética estadual e suas potenciais externalidades como benefício à população do Estado do Rio de Janeiro. Ressalta-se a identificação das áreas mais favoráveis, trazendo informações estratégicas para futuros cenários da expansão eólio-elétrica no Estado.



# 2. Energia Eólica e Tecnologia

## 2.1 A Atmosfera em Movimento

Em sua aparente imprevisibilidade, o vento resulta da contínua circulação das camadas de ar da atmosfera, sob a ação predominante da energia radiante do Sol e da rotação da Terra (Figura 2.1.1).

Dentre os mecanismos atuantes na formação dos ventos, destacam-se os aquecimentos desiguais da superfície terrestre, que ocorrem tanto em escala global (diferentes latitudes, estações do ano e ciclo dia-noite), quanto local (mar-terra, montanha-vale). Desse fato resulta que as velocidades e direções de vento apresentam tendências sazonais e diurnas bem definidas, dentro de seu caráter estocástico.

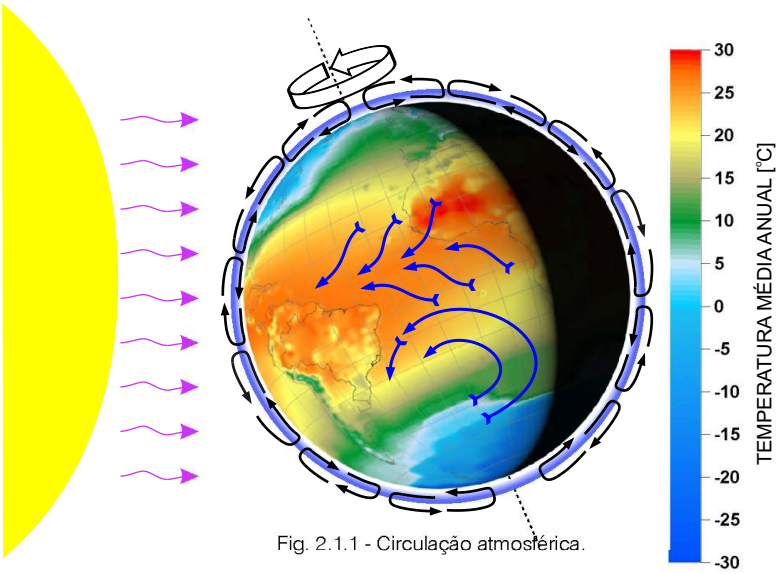



Fig. 2.1.1 - Circulação atmosférica.

No intervalo de horas ou dias, os ventos podem apresentar bastante variabilidade, mantendo, entretanto, um regime diurno predominante, regido por influências locais (microescala) e regionais (mesoescala).

No intervalo de meses ou anos, os regimes de vento passam a apresentar notável regularidade, tendo um regime sazonal bem definido ao longo do ano. Ao longo de décadas, em geral, as velocidades médias anuais apresentam variações inferiores a 10% da média de longo prazo.[1] Os regimes anuais e sazonais são predominantemente controlados pelas grandes escalas atmosféricas: a escala sinótica e a circulação geral planetária.[17]

Nas alturas de interesse ao aproveitamento energético, o vento é afetado de forma acentuada pelas condições de relevo e de rugosidade aerodinâmica do terreno, presença de obstáculos e estabilidade térmica vertical. No exemplo da figura 2.1.2, são ilustradas as velocidades na camada-limite atmosférica em dois locais planos, com cobertura de areia e restinga, respectivamente. Nota-se a grande dependência do perfil vertical de velocidade do vento com a altura, a rugosidade do terreno e a estabilidade térmica vertical da atmosfera (se estável, neutra ou instável).

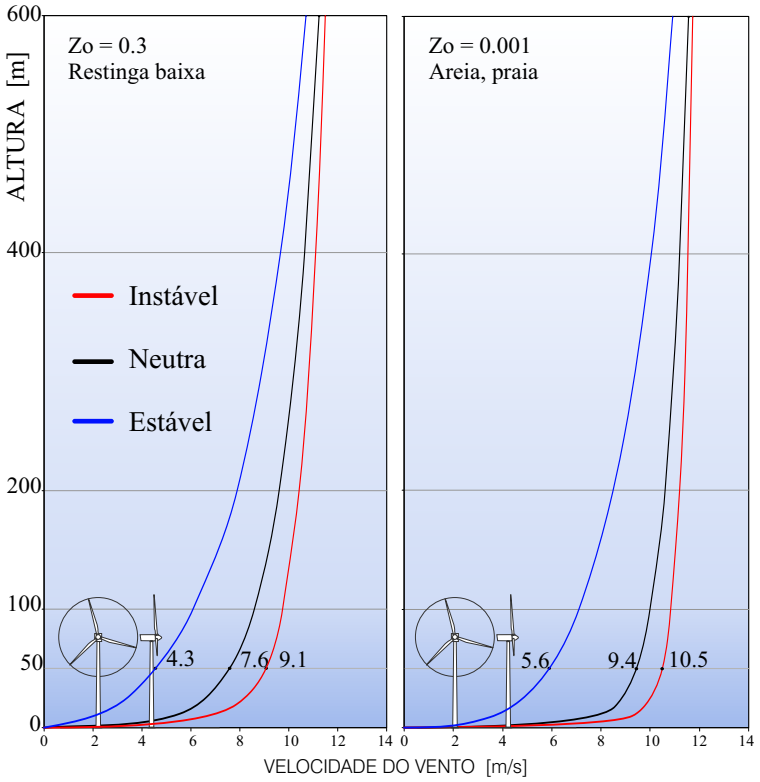
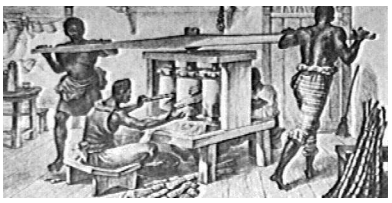



Fig. 2.1.2 - Vento x Altura: efeitos da rugosidade e estabilidade térmica vertical.

## 2.2 Histórico

O primeiro aproveitamento da força dos ventos pelo homem tem data bastante imprecisa mas, certamente, foi há milhares de anos, no oriente. Provavelmente, eram máquinas que utilizavam a força aerodinâmica de arrasto, sobre placas ou velas, para produzir trabalho.

A partir da Idade Média, o homem passou a utilizar as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo as grandes navegações e também maior eficiência às máquinas eólicas. Possivelmente, máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI.[2] O certo é que no século XIV na Holanda estas máquinas já apresentavam grande evolução técnica e de capacidade em potência e ampla aplicação como fonte de energia, principalmente na moagem de grãos, serrarias, e bombeamento d'água. Na descoberta do Brasil, em 1500, havia muitos milhares de moinhos de vento em toda a Europa, da Península Ibérica até os países nórdicos. Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas expandiram grandemente a sua aplicação na Europa: fabricação de papel para atender à demanda após a invenção da imprensa, produção de óleos vegetais e até grandes projetos de drenagem.[2]



Europa x Américas: 1500-1800

Avalia-se que a base escravocrata da colonização sul-americana, neste período, tenha sido fator preponderante de inibição da migração desta tecnologia. Com a expansão do uso da máquina a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso.

Um segundo surgimento de aplicação em larga escala de máquinas eólicas deu-se nos Estados Unidos, no século XIX. Após a abolição da escravatura naquele país, em 1863, iniciou-se a disseminação da utilização do catavento multipá para bombeamento d'água. Cataventos multipás chegaram a ser produzidos industrialmente em escalas de centenas de milhares de unidades/ano, por diversos fabricantes, o que possibilitou preços acessíveis à grande parte da população. Ao mesmo tempo em que constituiu um importante setor da economia, muitos historiadores atribuem importante parcela do sucesso e da rapidez da expansão colonizadora do Oeste norte-americano à disponibilidade de cataventos multipás de baixo custo - facilitando o acesso à água e a fixação de apoios em grandes áreas áridas ou semi-áridas. Um notável exemplo da escala de utilização destes cataventos é apresentado na Tabela 2.2.1, transcrita do *U.S. Statistical Abstract de 1919*,[3] reportando a evolução na geração de empregos e faturamento da indústria de cataventos multipás nos EUA ao longo de 40 anos.

Tabela 2.2.1 - Indústria de cataventos nos EUA, *U.S. Statistical Abstract* - 1919.[3]

| ANO | EMPREGADOS | FATURAMENTO (US$) |
|---|---|---|
| 1879 | 596 | 1.011.000 |
| 1889 | 1110 | 2.475.000 |
| 1899 | 2045 | 4.354.000 |
| 1909 | 2337 | 6.677.000 |
| 1919 | 1932 | 9.933.000 |

O uso do catavento multipás norte-americano expandiu-se pelos diversos continentes, inclusive no Brasil, onde na década de 1980 podiam-se encontrar quase uma dezena de fabricantes, em todo o país. Estima-se que mais de 6 milhões de cataventos multipás já foram produzidos no mundo.[2]

Também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, trazendo o acesso à energia elétrica no meio rural norte-americano. Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares destes aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países. A produção destas máquinas foi desativada gradualmente nas décadas de 1950-1960, à medida que as redes de eletrificação passaram a dominar o atendimento rural.

A geração de eletricidade em grande escala, alimentando de forma suplementar o sistema elétrico através do uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que já existe há diversas décadas. Os primeiros aproveitamentos eólio-elétricos foram realizados durante as décadas de 1940-50 nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e Dinamarca (Gedser). Pode-se dizer que o precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha (Hütter, 1955), já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta.

Na década de 1970 até meados da década de 1980, após a primeira grande crise de preços do

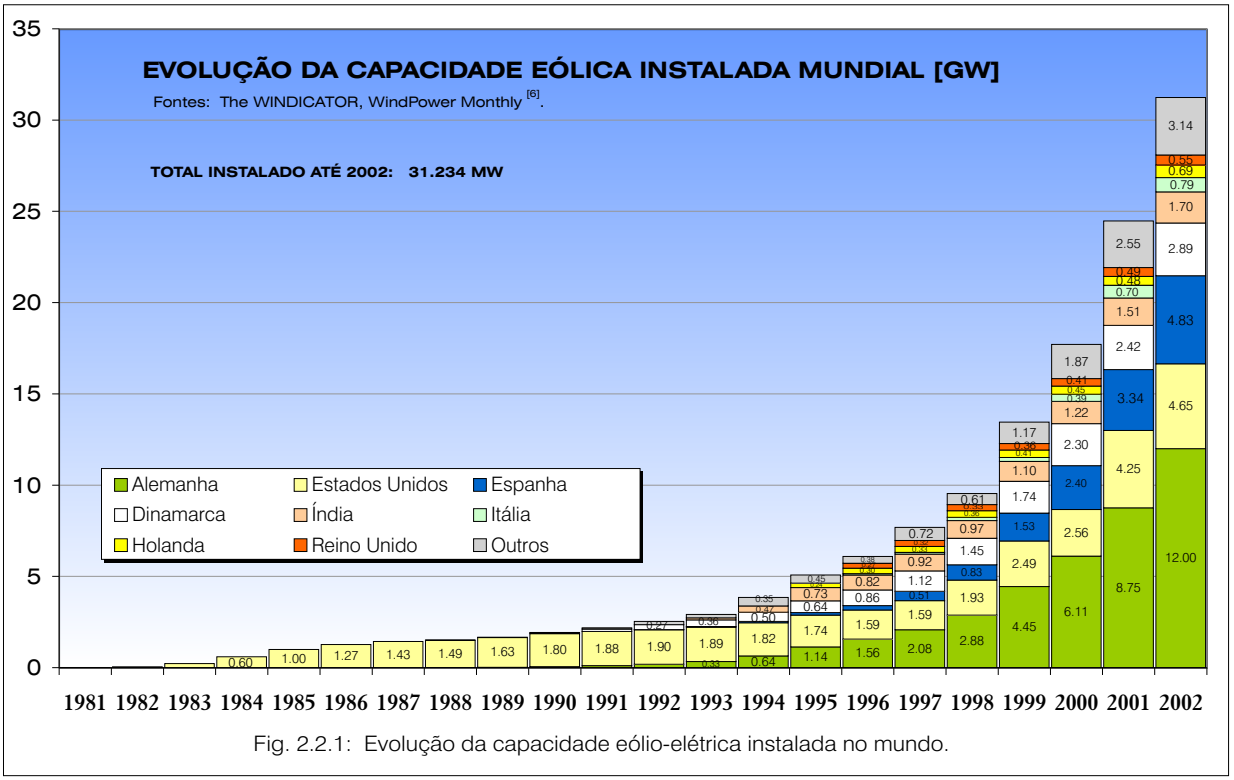



Fig. 2.2.1: Evolução da capacidade eólio-elétrica instalada no mundo.

DEBRA 100kW

petróleo, diversos países - incluindo o Brasil - dispenderam esforços em pesquisa da utilização da energia eólica para a geração elétrica. É desta época a turbina DEBRA 100kW (DEutsche BRAsileira), desenvolvida em conjunto entre os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil (CTA) e Alemanha (DFVLR).

Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólio-elétrico atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economicidade. O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas nascentes indústrias do setor, em regime de competição, alimentadas por mecanismos institucionais de incentivo - especialmente via remuneração pela energia produzida. Características também marcantes deste processo foram: (a) devido à modularidade, o investimento em geração elétrica passou a ser acessível a uma nova e ampla gama de investidores; (b) devido à produção em escalas industriais crescentes, o aumento de capacidade unitária das turbinas e novas técnicas construtivas, houveram reduções graduais e significativas no custo por Kilowatt instalado e, conseqüentemente, no custo de geração. O principal problema ambiental inicial - impactos de pássaros nas pás - praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte, com menores velocidades angulares dos rotores. Por ser uma fonte de geração praticamente inofensiva ao meio ambiente, os estudos de impacto ambiental são bem mais simplificados - e rápidos - que os requeridos por fontes tradicionais de geração elétrica. Este último fato, aliado às escalas industriais de produção e montagem de turbinas, com custos progressivamente decrescentes, fizeram da energia do vento a fonte energética com maiores taxas de crescimento em capacidade geradora, apresentando uma taxa composta de crescimento anual de 28% nos últimos 12 anos.[6] A Figura 2.2.1 apresenta a evolução cumulativa da capacidade eólio-elétrica instalada no mundo, ao longo das última décadas.[6]

## 2.3 A Energia do Vento

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento, que passa através da área varrida pelo rotor, e a transforma em energia elétrica. A potência elétrica é função do cubo da velocidade do vento $v$

$$P = \frac{1}{2}\rho A_r v^3 C_p \eta \qquad \text{(Watts)}$$

onde: $\rho$ - densidade do ar (1.225 kg/m$^3$ no nível do

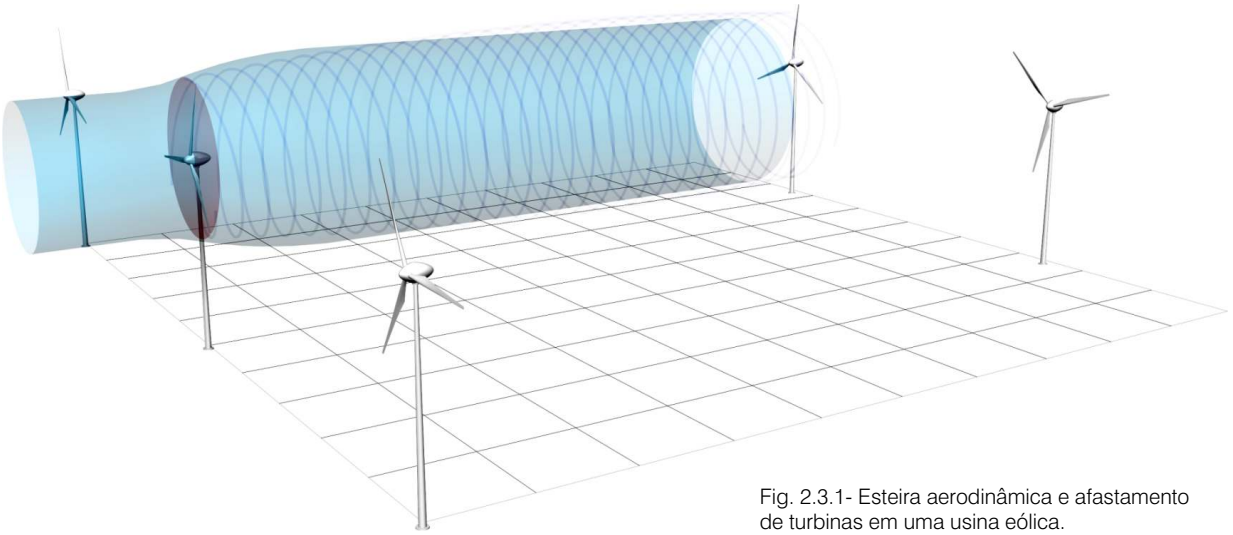


Fig. 2.3.1- Esteira aerodinâmica e afastamento de turbinas em uma usina eólica.

mar e a 15°C); $A_r$ - área varrida pelo rotor (= $\pi D^2/4$, D é o diâmetro do rotor ); $C_p$ - coeficiente aerodinâmico de potência do rotor (valor máximo teórico = 0.593, na prática atinge 0.45 e é variável com o vento, rotação, e parâmetros de controle da turbina); $v$ a velocidade do vento, em m/s; $\eta$ - eficiência do conjunto gerador/transmissões mecânicas e elétricas (~0.93-0.98).

Ao absorver a energia cinética, o rotor reduz a velocidade do vento imediatamente a jusante do disco; gradualmente essa velocidade se recupera, ao se misturar com as massas de ar do escoamento livre. Das forças de sustentação aerodinâmica nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, a qual também gradualmente se dissipa (Figura 2.3.1). Após alguma distância a jusante, o escoamento praticamente recupera a velocidade original e turbinas adicionais podem ser instaladas, sem perdas energéticas significativas. Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, condições de operação da turbina, rugosidade e complexidade do terreno, e com a estabilidade térmica da atmosfera.

## 2.4 Tecnologia

Com a acentuada expansão das usinas eólicas (Figura 2.4.1) no mundo, nos últimos anos, os geradores eólicos encontram-se em franco desenvolvimento tecnológico, tendo como principal tendência o aumento progressivo nas dimensões e capacidades das turbinas. Na Figura 2.4.2 são ilustradas as dimensões de turbinas disponíveis atualmente no mercado mundial, comparando-as com as do *Boeing 747*.

Deve-se mencionar, contudo, que as turbinas eólicas com capacidade de até 2000kW já podem ser consideradas como tecnologicamente consolidadas, pela quantidade de máquinas já operacionais no mundo. As maiores turbinas ilustradas, apesar de já disponíveis no mercado e com diversas unidades instaladas, ainda podem ser consideradas como na etapa de consolidação tecnológica. Os rotores das turbinas eólicas são fabricados em materiais compostos, com

Fig. 2.4.1: Usinas eólicas.

Fig. 2.4.2: Dimensões típicas das turbinas eólicas no mercado atual, comparação com as dimensões da aeronave *Boeing 747*.
Na foto, é mostrado o transporte rodoviário de uma pá de rotor eólico.

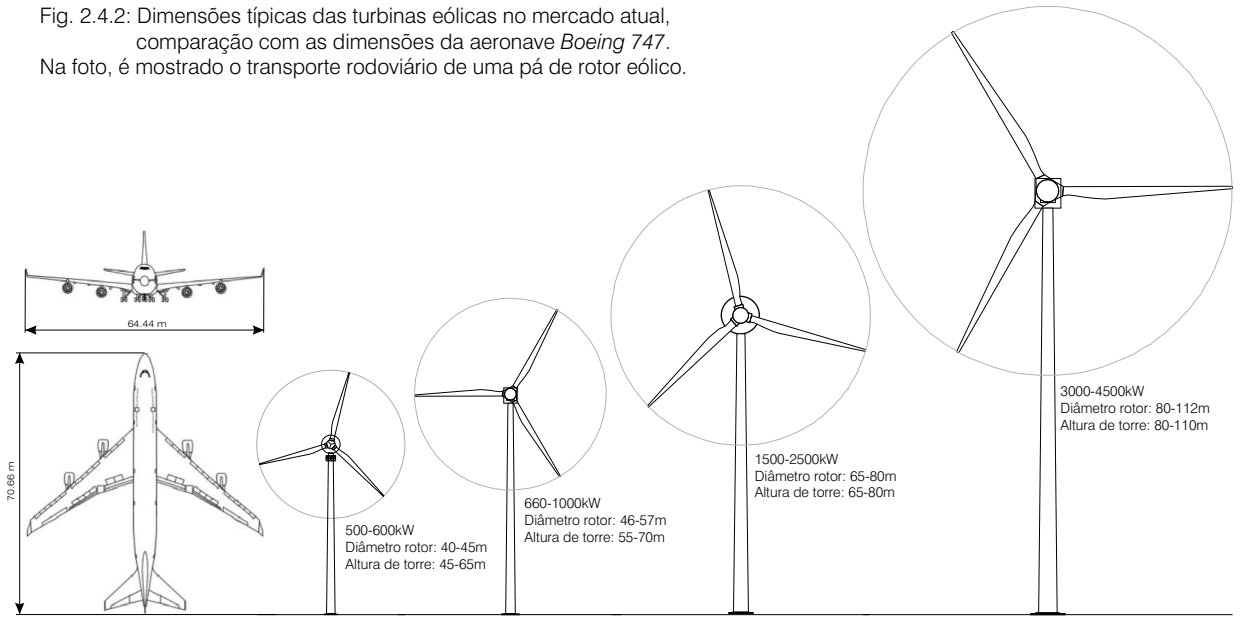


foto: Zig Koch

tecnologias e requisitos de peso, rigidez e aerodinâmica, característicos de estruturas aeronáuticas.

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro D. Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula aproximada para avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é dada por [5]

$$rpm = \frac{895}{D} + 6.9 \qquad D \text{ em metros}$$

À medida em que a tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas, a rotação se reduz: os diâmetros de rotores no mercado atual variam entre 40m e 100m, resultando em rotações da ordem de 30rpm a 15rpm, respectivamente. As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em vôo. Turbinas eólicas satisfazem os requisitos de ruído, mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. Estes aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração aptas à escala de GigaWatts.

O progressivo aumento nos diâmetros das turbinas traz aumentos generalizados no peso das máquinas. O peso de todo o conjunto que fica no topo da torre (rotor e nacele - mancais, gerador, sistemas) pode ser estimado de forma aproximada pela fórmula [5]

$$\text{Peso(rotor + nacele)} = \frac{D^2}{57.8} \qquad \text{(Toneladas)}$$

Por essa aproximação, o peso do conjunto no topo da torre é da ordem de 30 toneladas para máquinas de 40m de diâmetro, e será da ordem de 170 toneladas para turbinas de 100m de diâmetro. Dessas ordens de grandeza e da análise da expansão do mercado (Figura 2.2.1), pode-se concluir que a geração eólio-elétrica constitui uma indústria importante no consumo de aço e resinas para materiais compostos, com geração de empregos em todo o ciclo produtivo.

Uma usina eólio-elétrica (UEE) é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área. Essa proximidade geográfica tem a vantagem econômica da diluição de custos: arrendamento de área, fundações, aluguel de guindastes e custos de montagem, linhas de transmissão, equipes de operação e manutenção,

e estoques de reposição. Usinas eólicas com turbinas de projeto consolidado e equipes de manutenção adequadamente capacitadas apresentam fatores de disponibilidade próximos de 98%.

Usualmente, a geração elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 2.5 - 3.0 m/s; abaixo desses valores o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente 12.0 - 15.0 m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina. Em ventos muito fortes ($v > 25$ m/s, por exemplo) atua o sistema automático de proteção. Ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento, e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina; neste caso a rotação das pás é reduzida (por passo ou estol) e o sistema elétrico é desconectado da rede elétrica. Turbinas eólicas de grande porte tém controle inteiramente automático, através de atuadores rápidos, *softwares* e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. Usualmente se usa telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos/manutenção.

## 2.5 Potenciais Eólicos

A viabilidade técnica e econômica de empreendimentos eólicos requer uma predição confiável da energia gerada na usina. Para tanto, o mapeamento dos recursos eólicos deve compreender uma rede anemométrica qualificada (equipamentos com alta confiabilidade, durabilidade e adequadamente dispostos em torres de medições altas, 50 a 70m, com anemômetros previamente calibrados em túnel de vento e um sistema eficiente de coleta de dados e verificação de falhas),[7,8] operando por um período mínimo de 1 ano, e modelos de topografia e rugosidade com alta resolução. Complementarmente, devem ser realizados, sempre que possível, estudos de representatividade climatológica com medições de longo prazo próximas ao local, avaliando-se as variações interanuais do vento e o seu impacto na geração energética ao longo de toda a vida útil da usina (15 a 20 anos). As medições anemométricas devem ser mantidas por todo o período de operação da usina, possibilitando um acompanhamento contínuo do desempenho das turbinas e melhorando as estimativas de longo prazo.

O cálculo da produção energética e a localização das turbinas, dentro de uma usina eólica, deve levar em consideração a curva de potência certificada por órgãos homologadores independentes (e.g. DEWI, WINDTEST KWK GmbH, Risoe), a influência da altitude e temperatura na densidade local do ar, o fator de disponibilidade esperado e a avaliação das perdas energéticas por interferência aerodinâmica entre rotores.[9, 10] O cálculo do campo de velocidades em toda a área da usina é realizado por modelos numéricos de simulação de camada-limite,[11 a 15] que extrapolam os dados anemométricos efetivamente medidos, utilizando modelos de relevo e rugosidade. Fatores também importantes a serem considerados são a influência da estabilidade térmica vertical da atmosfera e a densidade do ar. O processo de otimização envolve o compromisso entre a maximização da energia gerada e o aproveitamento dos fatores condicionantes do terreno e infra-estrutura.

A Figura 2.5.1 ilustra o processo de otimização de uma usina eólica.

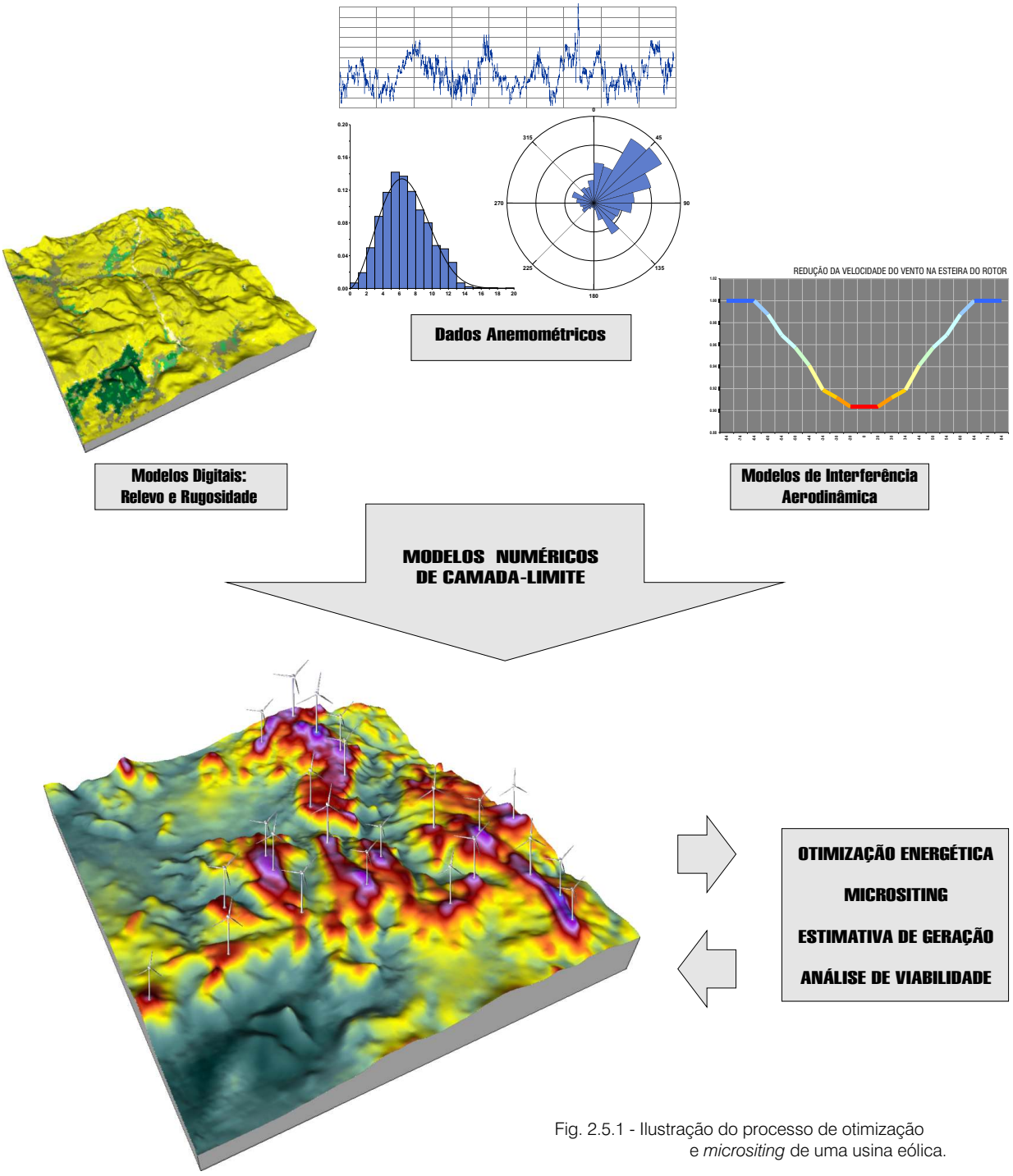



Fig. 2.5.1 - Ilustração do processo de otimização e *micrositing* de uma usina eólica.

# 3. O Estado do Rio de Janeiro

## 3.1 Geografia e Demografia

O Estado do Rio de Janeiro ocupa uma extremidade da região sudeste do Brasil (Figura 3.1.1). Seu território está situado entre as latitudes 23°22'08"S e 20°45'46"S, e entre as longitudes 44°53'19"W e 40°57'28"W. Seus pontos extremos abrangem distâncias de 408 km no sentido Leste-Oeste e 285 km no sentido Norte-Sul.

O litoral, com 636 km de extensão, alterna planícies costeiras com variadas formas de praias, lagoas e baías, algumas de fama mundial por sua notável beleza.

Na área territorial de 43 864 km$^2$, vive uma população de 14.4 milhões de pessoas, das quais 96% em áreas urbanas e 4% em áreas rurais. A taxa média de crescimento anual da população é de 1.3%.[25] Com uma população economicamente ativa de 6 353 208 habitantes, o Estado do Rio de Janeiro produziu em 1999 um PIB (Produto Interno Bruto) de 113 bilhões de Reais, dos quais 0.6% provenientes da Agricultura/Pecuária, 29.3% da Indústria, e 70.1% de Serviços. (Censo IBGE, 2000).

Na Figura 3.1.2 é apresentada uma vista em perspectiva do Estado com a localização das principais cidades e baías.

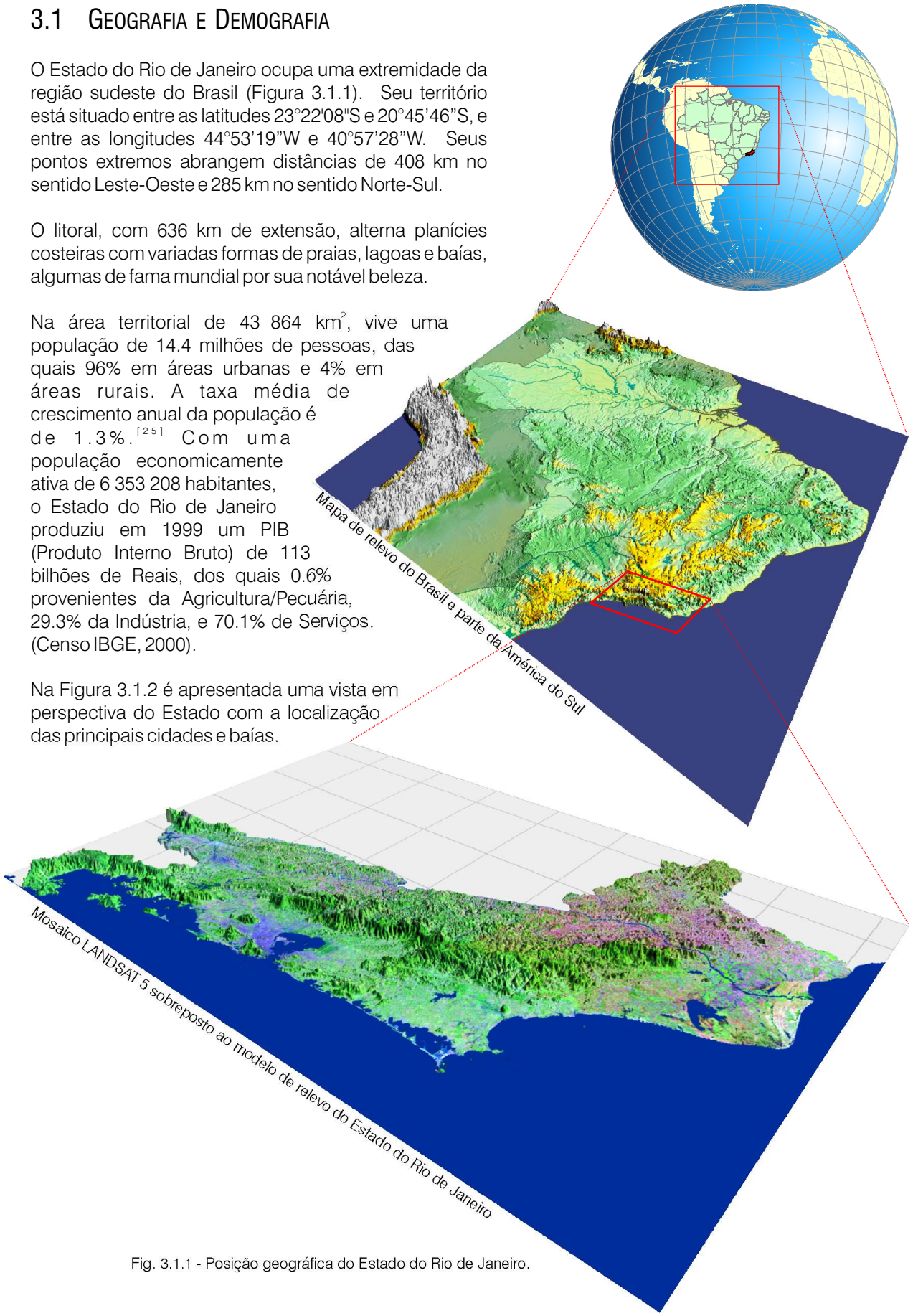
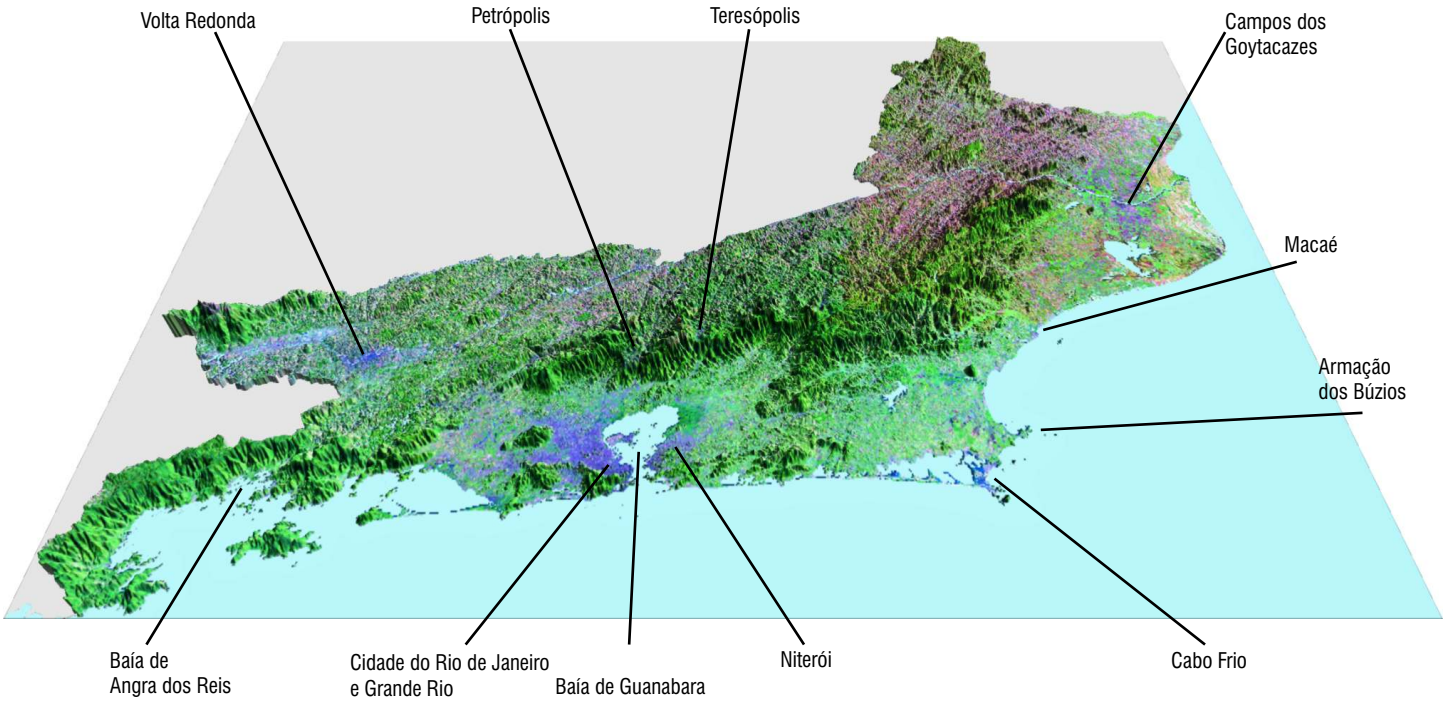



Fig. 3.1.1 - Posição geográfica do Estado do Rio de Janeiro.

Fig. 3.1.2 - Vista em perspectiva do Estado do Rio de Janeiro.




## 3.2 Consumo de Energia Elétrica

No ano de 2000, o consumo de energia elétrica no Estado do Rio de Janeiro foi de 32.3 TWh, caindo para 28.9 TWh em 2001, em conseqüência do racionamento de energia. Isto representa cerca de 10% do consumo do Brasil e 20% do consumo da Região Sudeste. Diferente dos perfis de consumo nacional e regional, onde o consumo Industrial representa mais de 43% do consumo total, no Estado predomina o consumo Residencial (33.2%), seguido do Industrial (27.5%) e do Comercial (22.7%). [38](Figura 3.2.1)

As Figuras 3.2.2 e 3.2.3 mostram o predomínio da Capital no consumo de eletricidade, com mais da metade do total do Estado (16.7 TWh), seguida do restante da Região Metropolitana, com 6.4 TWh (20.5% do consumo estadual) e da região do Médio Paraíba, com 4.2 TWh (13.3%). As demais regiões juntas somam 4.1 TWh (13.0%). Além da cidade do Rio de Janeiro, destacam-se como centros de consumo os municípios de Volta Redonda (consumo anual de 2.68 TWh em 2000), Duque de Caxias (1.06 TWh), Niterói (1.09 TWh) e São Gonçalo (1.02 TWh). Ao contrário do que acontece no Estado, o consumo comercial supera o industrial na Capital, no resto da Região Metropolitana e na Região Norte.[23]

Nas Figuras 3.2.2, 3.2.3 e no mapa da página 14 são apresentados a população e o consumo anual de energia elétrica por município e por região do Estado. A Figura 3.2.2 mostra que o consumo regional *per capita* é semelhante em todo o Estado, com exceção da Região do Médio Paraíba, onde o consumo *per capita* é maior, devido ao alto consumo no setor Industrial .

As frações de consumo das Regiões em cada setor de atividade mostram que o consumo da Capital predomina em todos os setores, exceto o rural, com frações de 44% a 67% do consumo total

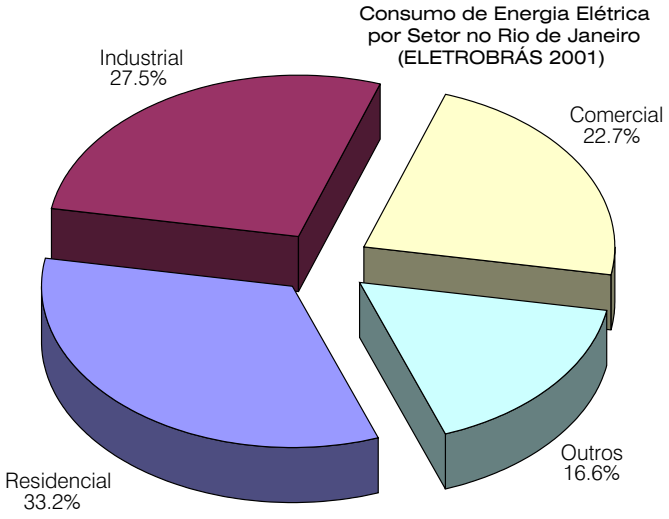



Fig. 3.2.1 - Consumo de energia anual por setor no Rio de Janeiro.[38]

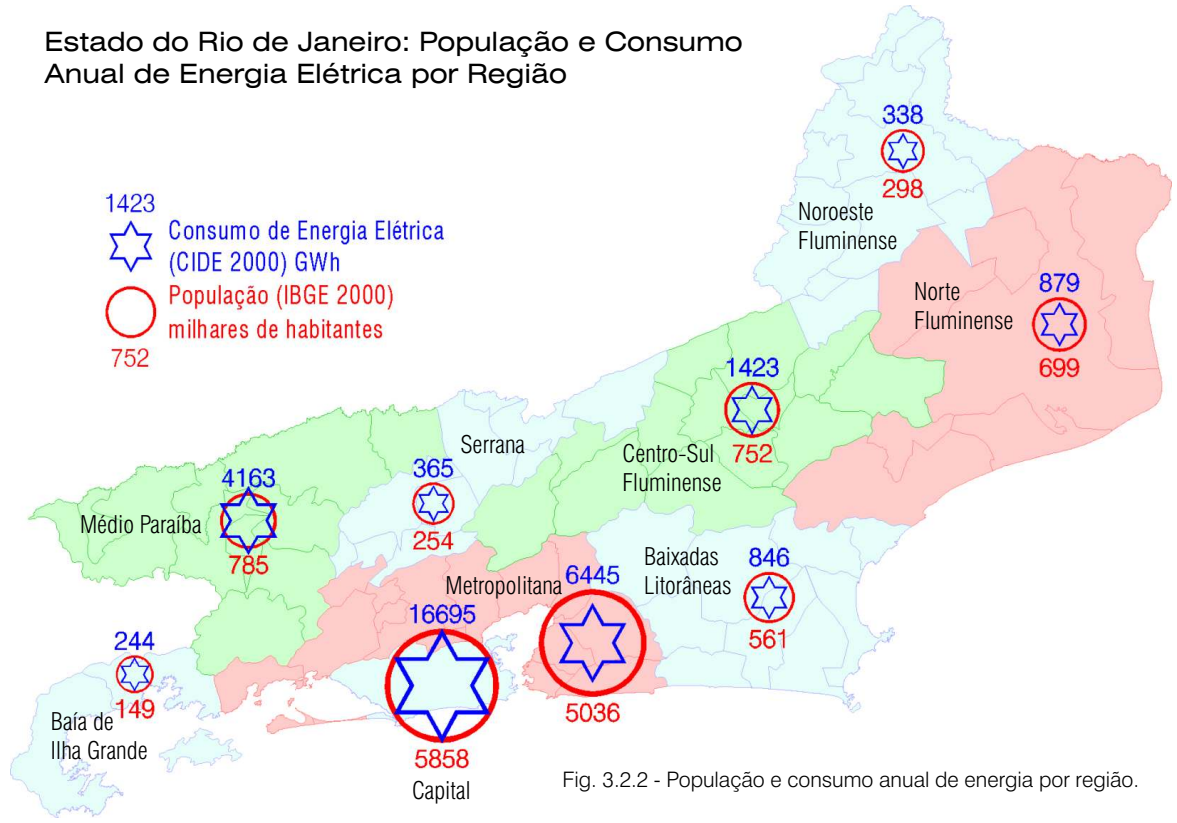



Fig. 3.2.2 - População e consumo anual de energia por região.

de cada setor (Figura 3.2.3). Em segundo lugar, com cerca de metade do consumo da Capital, vem o restante da Região Metropolitana, seguida pela Região do Médio Paraíba. A principal exceção a este quadro geral verifica-se no setor Industrial, onde o consumo na Região do Médio Paraíba supera em quase 3 vezes o consumo da Região Metropolitana. A Figura 3.2.3 mostra ainda que: (1) a Capital consome mais de 2/3 da energia destinada ao setor Comercial e quase metade da destinada ao setor Industrial do Estado; (2) o parque industrial da Região do Médio Paraíba consome mais de 1/3 da energia consumida no setor Industrial.

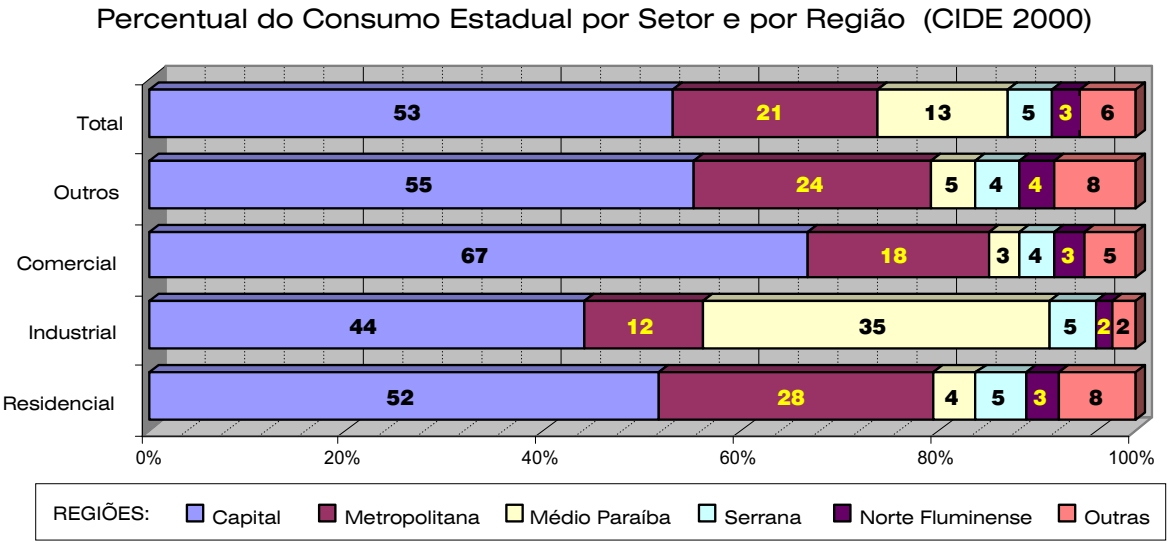



Fig. 3.2.3 - Percentual de consumo de energia de cada região por setor de atividade no Estado do Rio de Janeiro.[23]

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

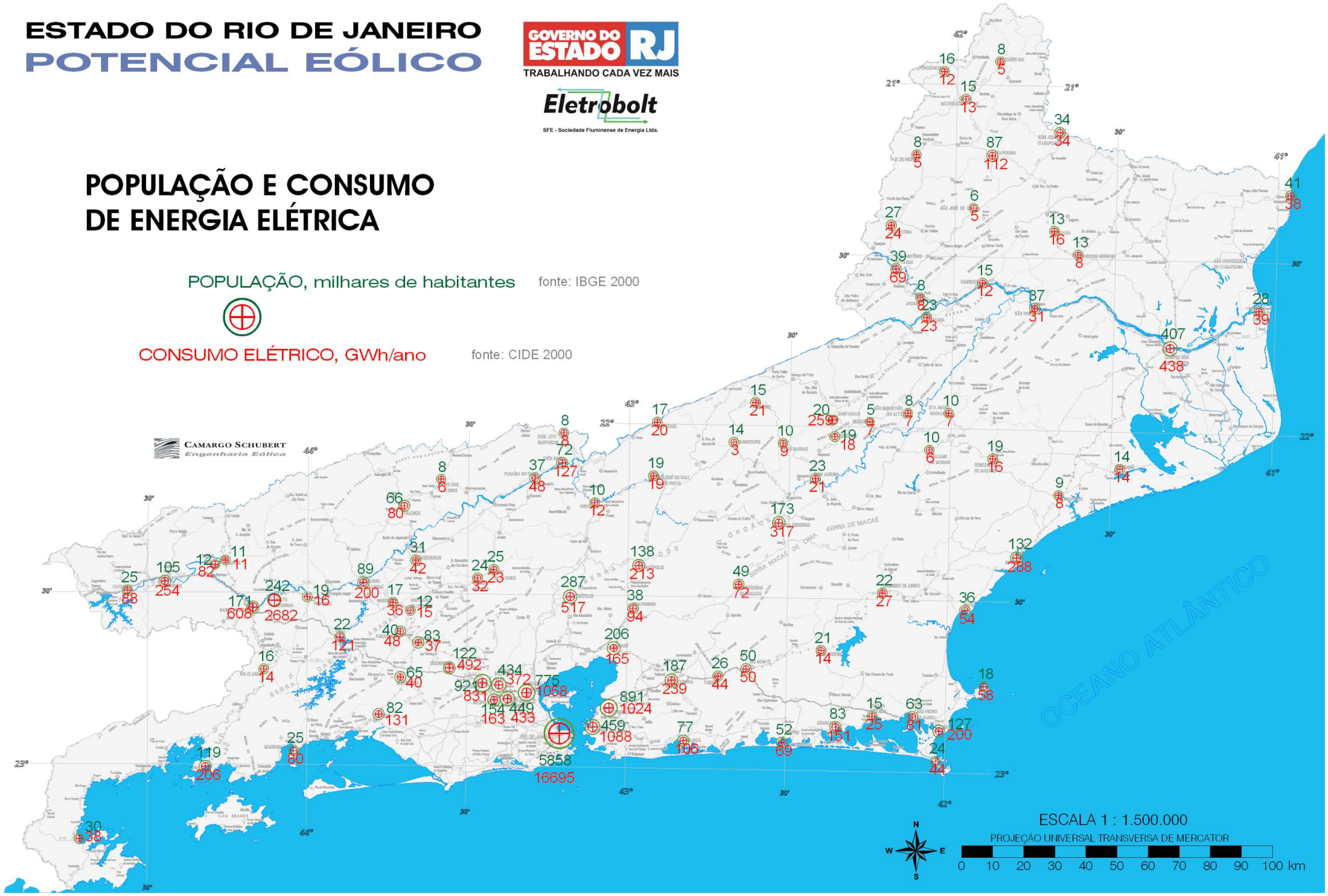
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## POPULAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

POPULAÇÃO, milhares de habitantes — fonte: IBGE 2000

CONSUMO ELÉTRICO, GWh/ano — fonte: CIDE 2000



## 3.3 Infra-Estrutura

**Domicílios:** Segundo o último censo (IBGE 2000), haviam no Estado do Rio de Janeiro 4 260 140 domicílios, sendo 95.5% urbanos e 4.5% rurais; 84.8% deles são servidos pelo sistema de abastecimento de água, 62.9% por esgoto sanitário e 93.3% por coleta de lixo.[25]

**Rodovias:** Até 2000 haviam 5 483 km de rodovias federais, estaduais e municipais pavimentadas no Estado.

**Telecomunicações:** Em 2002 o Estado totalizava 6.42 milhões de terminais de telefonia fixa e 4.97 milhões de telefonia móvel.

**Geração de Energia Elétrica:** Existem em operação no Estado um total de 34 empreendimentos de geração elétrica,[22] com uma capacidade instalada de 5.54 GW de potência. Deste montante, as usinas termoelétricas representam 41.0%, as usinas termonucleares (Angra I e Angra II, únicas do país) 36.3% e as usinas hidroelétricas 22.2%, restando 0.5% para empreendimentos de menor porte.[22] (Figura 3.3.1)

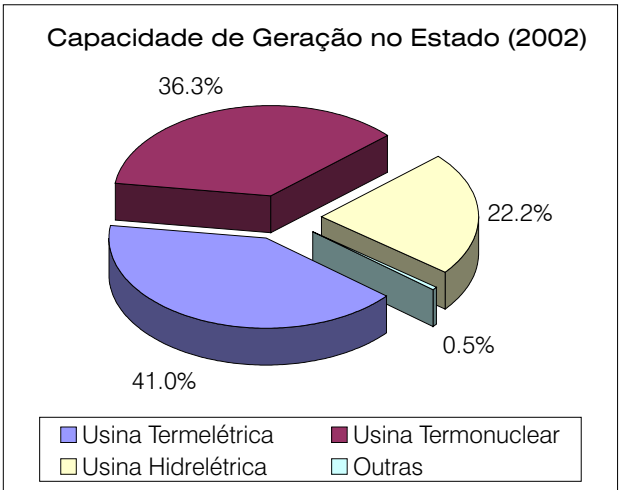



Fig. 3.3.1 - Capacidade de Geração de Energia Elétrica no Rio de Janeiro.[22]

**Novos Empreendimentos:** Para os próximos anos está prevista a adição de 5.67 GW na capacidade de geração, proveniente de 4 usinas termoelétricas atualmente em construção, com capacidade total de 2.63 GW, além de mais 22 empreendimentos outorgados entre 1998 e 2002.[22]

A Figura 3.3.2 mostra a situação do Estado do Rio de Janeiro no sistema elétrico interligado nacional, com a localização das principais usinas. Nas páginas seguintes são apresentados mapas do sistema elétrico e da malha viária estadual.

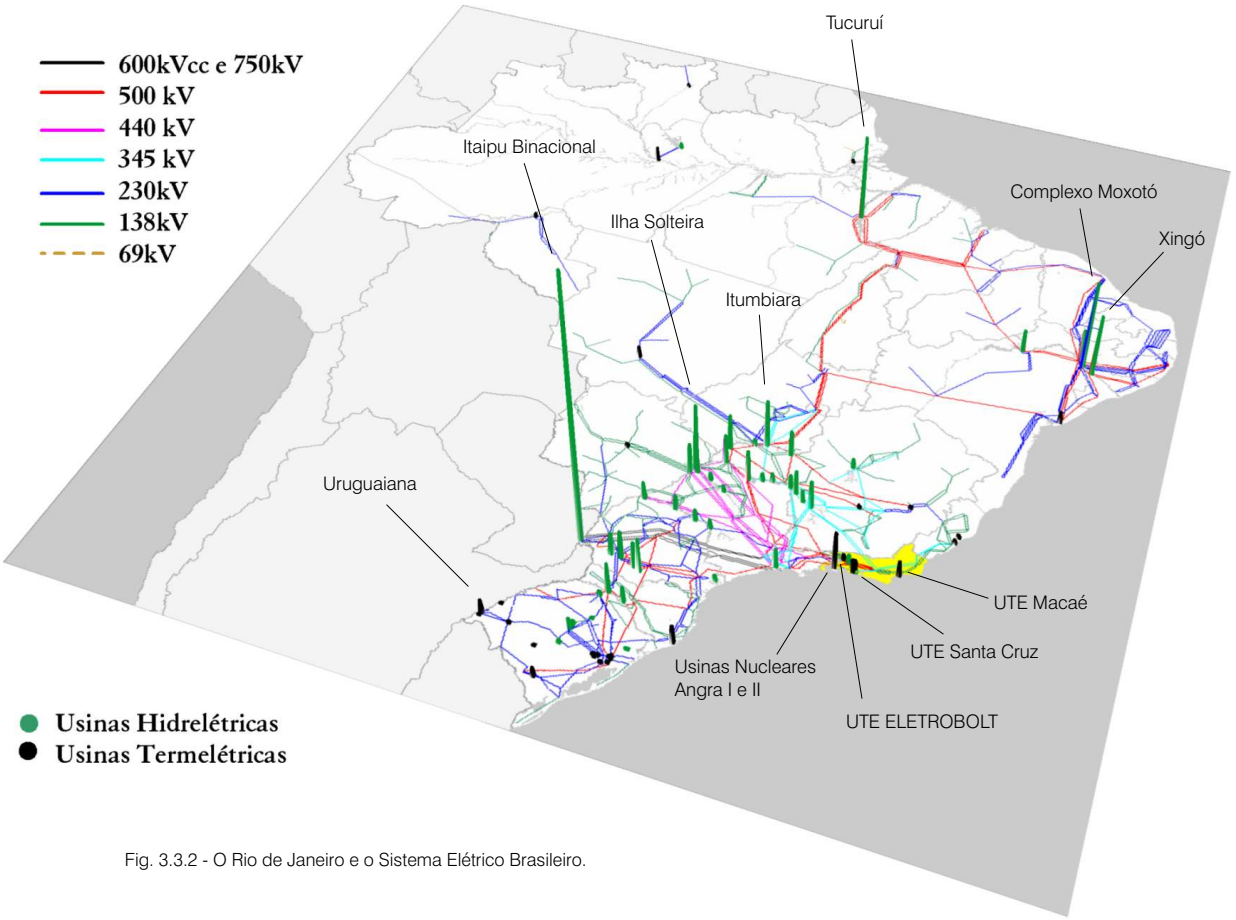


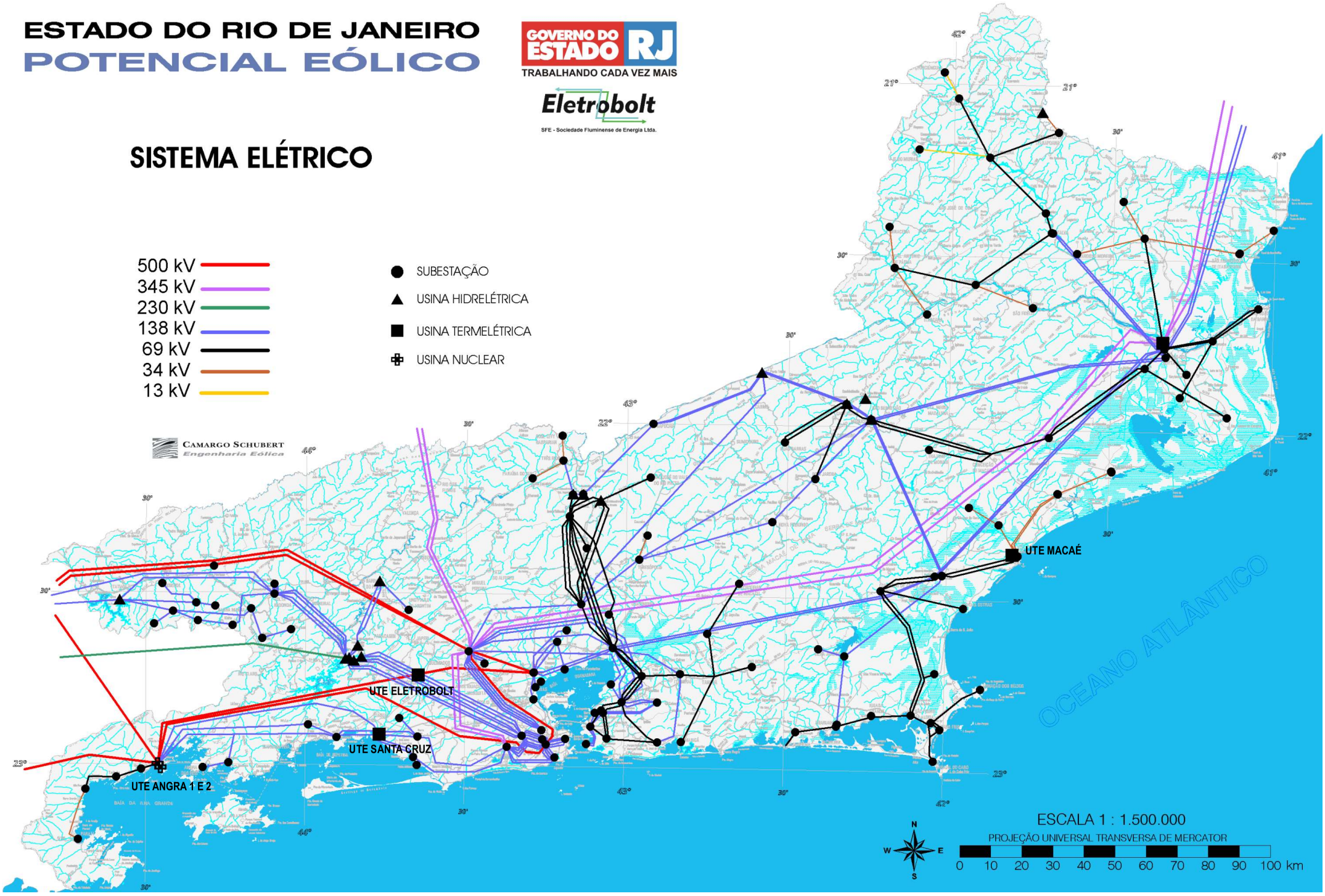

Fig. 3.3.2 - O Rio de Janeiro e o Sistema Elétrico Brasileiro.

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## SISTEMA ELÉTRICO



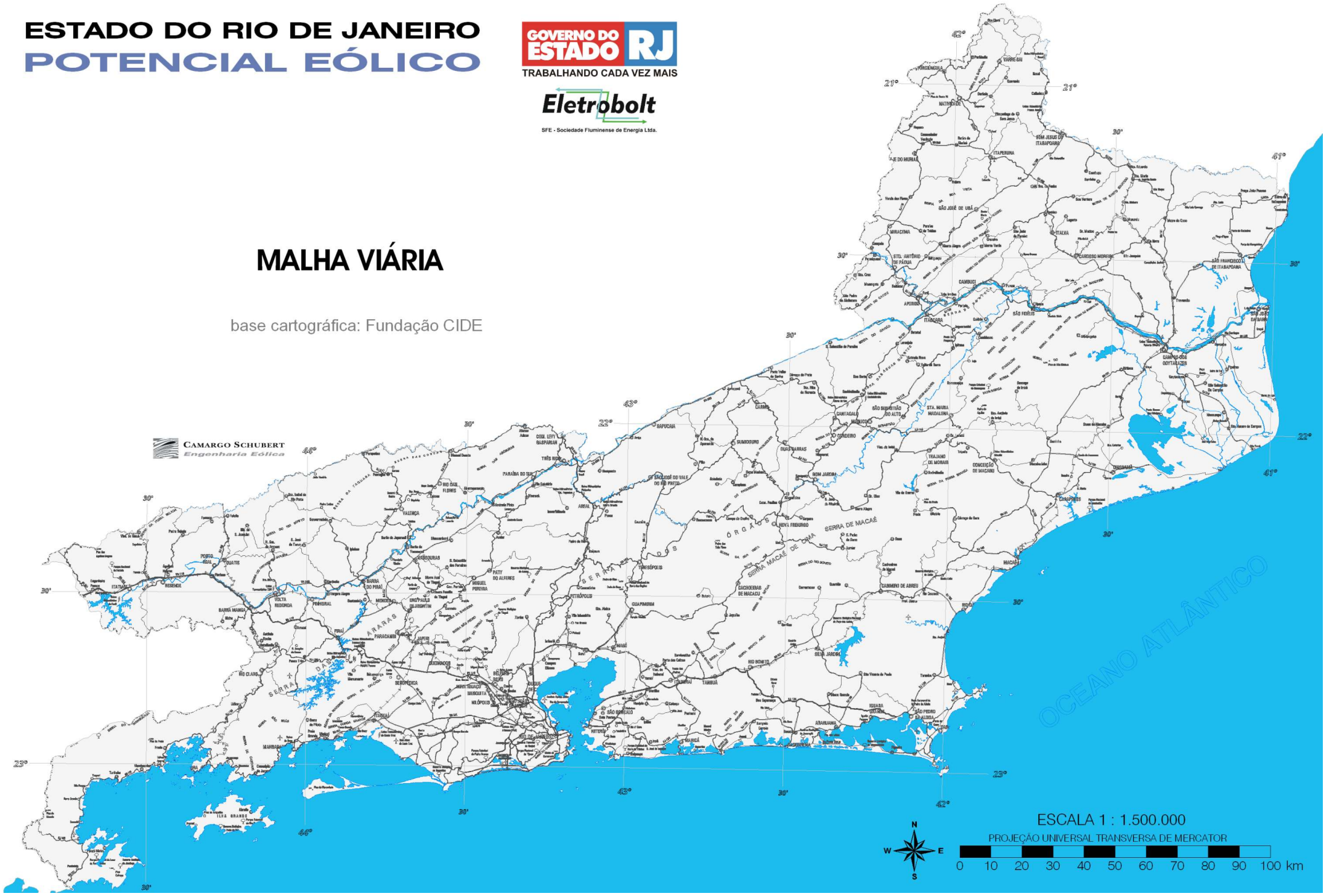
# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## MALHA VIÁRIA

base cartográfica: Fundação CIDE



## 3.4 Unidades de Conservação da Natureza

Todo o território do Rio de Janeiro está inserido no bioma da Mata Atlântica. Na época do Descobrimento do Brasil, cerca de 97% do território fluminense era coberto pela Mata Atlântica. Após 5 séculos de exploração econômica dos recursos naturais, este bioma ocupa apenas 17% da área do Estado, o equivalente a 7346 km$^2$. Deste total, aproximadamente 5700 km$^2$ (78%) estão protegidos pelas Unidades de Conservação da Natureza.[26]

Até o ano de 2001, o Estado do Rio de Janeiro possuía 66 Unidades de Conservação e 57 áreas naturais tombadas pela União e pelo Estado, estando, respectivamente, sob tutela do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano do Rio de Janeiro (SEMADUR).

As Unidades de Conservação subdividem-se em Unidades de Proteção Integral e Unidades de Uso Sustentável.

**Unidades de Proteção Ambiental:** são em número de 21 no Rio de Janeiro, abrangendo 2 Estações Ecológicas, 6 Reservas Biológicas, 1 Reserva Ecológica, 1 Reserva Florestal, 5 Parques Nacionais e 6 Parques Estaduais.

**Unidades de Uso Sustentável:** são ao todo 45, sendo 12 Áreas de Proteção Ambiental, 2 Áreas de Relevante Interesse Ecológico, 1 Floresta Nacional, 1 Reserva Extrativista Marinha e 29 Reservas Particulares do Patrimônio Natural.

Na Tabela 3.4.1 são listadas as Unidades de Conservação da Natureza do Estado do Rio de Janeiro no ano de 2001,[26] exceto as Reservas Particulares do Patrimônio Natural.

No mapa a seguir, são apresentadas as áreas ocupadas pelas Unidades de Conservação do Rio de Janeiro, numeradas em conformidade com a Tabela 3.4.1.

foto: Mark Greene

UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

| | UNIDADES ESTADUAIS | | UNIDADES FEDERAIS |
|---|---|---|---|
| 1 | REBIO de Araras | 21 | RESEC de Alcobaça |
| 2 | ESEC do Paraíso | 22 | REBIO União |
| 3 | RESEC da Juatinga | 23 | REBIO do Tinguá |
| 4 | PE da Pedra Branca | 24 | REBIO Poço das Antas |
| 5 | PE da Ilha Grande | 25 | ESEC de Tamoios |
| 6 | PE do Desengano | 26 | PN do Itatiaia |
| 7 | REBIO Arqueológica de Guaratiba | 27 | PN da Tijuca |
| 8 | REBIO da Praia do Sul | 28 | PN da Serra da Bocaina |
| 9 | PE da Serra da Tiririca | 29 | PN da Restinga de Jurubatiba |
| 10 | PE Marinho do Aventureiro | 30 | PN da Serra dos Órgãos |
| 11 | PE da Chacrinha | 31 | RESEX do Arraial do Cabo |
| 12 | REFLO do Grajaú | 32 | FLONA Mário Xavier |
| 13 | APA de Tamoios | 33 | ARIE da Floresta de Cicuta |
| 14 | APA da Serra de Sapiatiba | 34 | ARIE do Arquipélago de Cagarras |
| 15 | APA de Maricá | 35 | APA de Petrópolis |
| 16 | APA de Massambaba | 36 | APA da Mantiqueira |
| 17 | APA de Gericinó-Mendanha | 37 | APA de Guapimirim |
| 18 | APA de Mangaratiba | 38 | APA de Cairuçu |
| 19 | APA da Bacia do Frade | | |
| 20 | APA da Floresta do Jacarandá | | |

Siglas:

| |
|---|
| APA - Área de Proteção Ambiental |
| ARIE - Área de Relevante Interesse Ecológico |
| ESEC - Estação Ecológica |
| FLONA - Floresta Nacional |
| PE - Parque Estadual |
| PN - Parque Nacional |
| REBIO - Reserva Biológica |
| REFLO - Reserva Florestal |
| RESEC - Reserva Ecológica |
| RESEX - Reserva Extrativista |

Tab. 3.4.1 - Unidades de Conservação da Natureza do Estado do Rio de Janeiro.[26]

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

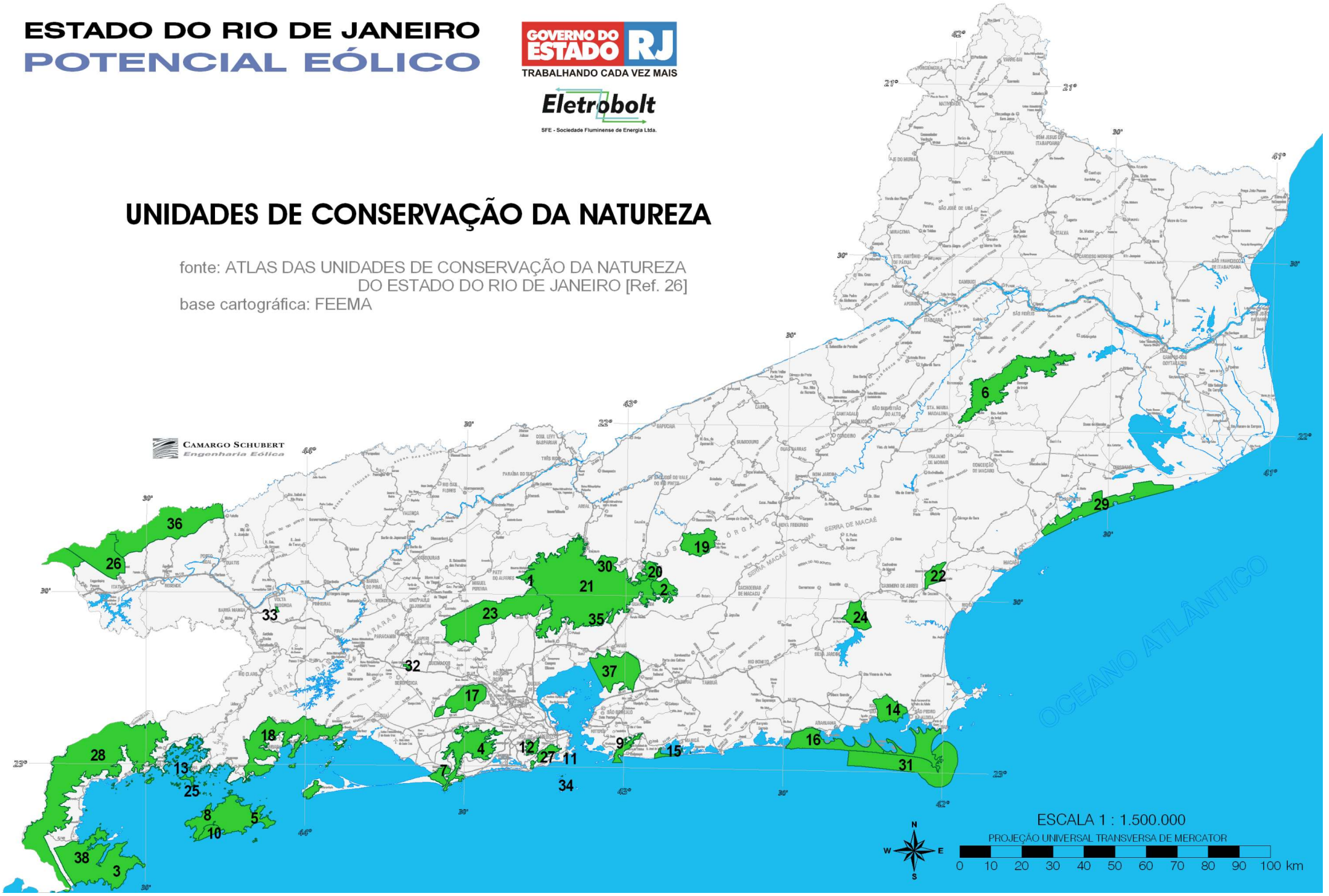
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA

fonte: ATLAS DAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO [Ref. 26]

base cartográfica: FEEMA



## 3.5 Regimes de Vento

A distribuição geral dos ventos sobre o Brasil, e que afeta o Estado do Rio de Janeiro, é controlada pelas grandes escalas atmosféricas: a escala sinótica e a circulação geral planetária.[17] Este perfil geral apresenta variações significativas na mesoescala e na microescala,[17] devido à diversidade das características do terreno, tais como geometria e altitude, presença de obstáculos, cobertura vegetal, albedo, e existência de grandes extensões de massas de água. Estes fatores atuantes nas escalas menores podem resultar em regimes de vento locais bastante distintos.

O Estado do Rio de Janeiro está situado numa zona de predomíno da influência do centro de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (Figura 3.5.1), resultando em acentuada ocorrência de ventos de quadrante leste e nordeste, como refletido no Mapa de Rosa-dos-Ventos, Freqüências x Direção (Capítulo 4, página 25). Sobreposto a este mecanismo, agem as intermitentes incursões de massas polares, as frentes frias, resultando em uma marcante sazonalidade. Estes mecanismos constituem as principais influências da escala sinótica na dinâmica atmosférica, ao qual se sobrepõem os mecanismos de mesoescala, tais como as brisas marinhas, terrestres e lacustres, brisas montanha-vale e jatos noturnos. Nas regiões serranas ocorrem também as acelerações orográficas e ocasionais canalizações do escoamento entre passos de montanhas, bem como uma variada e complexa interação entre o deslocamento atmosférico e as formações montanhosas típicas do Estado do Rio de Janeiro.

As regiões com ventos médios anuais mais intensos no Estado (Figura 3.5.2 e mapas de potencial eólico do Capítulo 4 - páginas 35, 37 e 39), situam-se no litoral norte fluminense, na região dos lagos, Cabo Frio e Búzios, e também na região serrana, polígono Piraí-Vassouras-Petrópolis. Na área montanhosa, os ventos mais intensos são geralmente encontrados nos cumes e cristas das elevações, onde o efeito de compressão do escoamento atmosférico é mais acentuado.

Ao longo do litoral, a influência da mesoescala é mais pronunciada, atuando através das brisas marinhas e terrestres, criando um ciclo diurno característico. Como apresentado no Mapa de Regime Diurno Médio Anual (Capítulo 4, página 29) e na Figura 3.5.2, o Litoral Norte Fluminense apresenta as maiores variações das médias diurnas anuais: no início da manhã, as velocidades atingem um mínimo; com

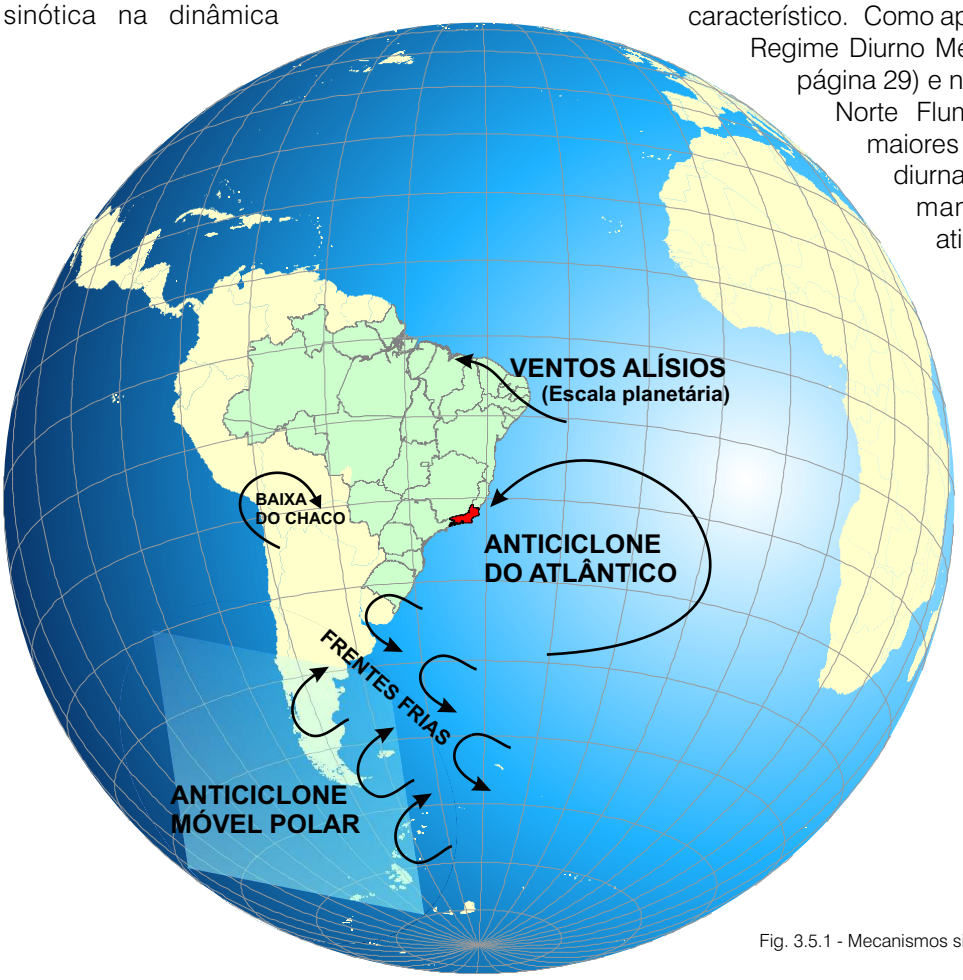



Fig. 3.5.1 - Mecanismos sinóticos dominantes no regime de ventos brasileiro e fluminense.

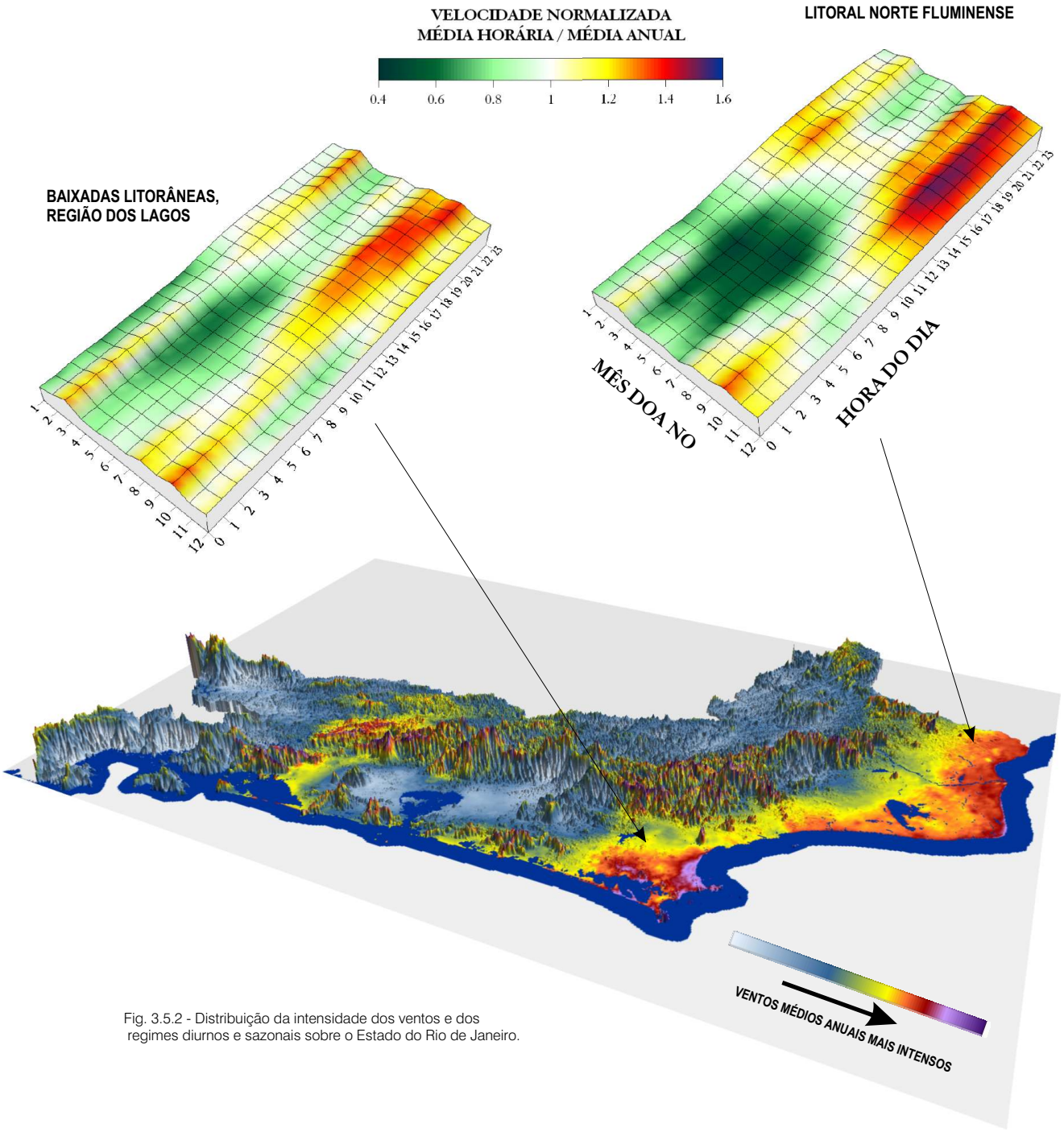



Fig. 3.5.2 - Distribuição da intensidade dos ventos e dos regimes diurnos e sazonais sobre o Estado do Rio de Janeiro.

o nascer do sol, o aquecimento do continente acentua a influência das brisas marinhas, que atingem um máximo no período que se estende do final da tarde ao início da noite; com o poente, o continente vai progressivamente esfriando, a atmosfera torna-se mais estável, e a intensidade das brisas marinhas diminui, até o raiar do novo dia, onde a dinâmica recomeça. Na Região dos Lagos, o regime diurno é semelhante, porém menos acentuado. Já na região serrana, o vento tende a apresentar maiores intensidades no período próximo ao início da manhã.

O regime de ventos sobre o Estado do Rio de Janeiro apresenta uma grande sazonalidade, em geral, com a ocorrência de ventos mais intensos nos meses de primavera (setembro a novembro), e mais brandos nos meses de final de outono e início de inverno (abril a junho), conforme pode ser visto nos mapas do Capítulo 4 - páginas 41, 43 e 45 - e na Figura 3.5.2.

# 4. Mapas Eólicos do Rio de Janeiro


4.1 Rosa-dos-Ventos Anual, Freqüências x Direção

4.2 Rosa-dos-Ventos Anual, Velocidades x Direção

4.3 Regime Diurno Anual

4.4 Fator de Forma de Weibull Anual

4.5 Densidade do Ar, Média Anual

4.6 Potencial Eólico a 50 metros de Altura

4.7 Potencial Eólico a 75 metros de Altura

4.8 Potencial Eólico a 100 metros de Altura

4.9 Potencial Eólico Sazonal a 50 metros de Altura

4.10 Potencial Eólico Sazonal a 75 metros de Altura

4.11 Potencial Eólico Sazonal a 100 metros de Altura

4.12 Fator de Forma de Weibull Sazonal

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

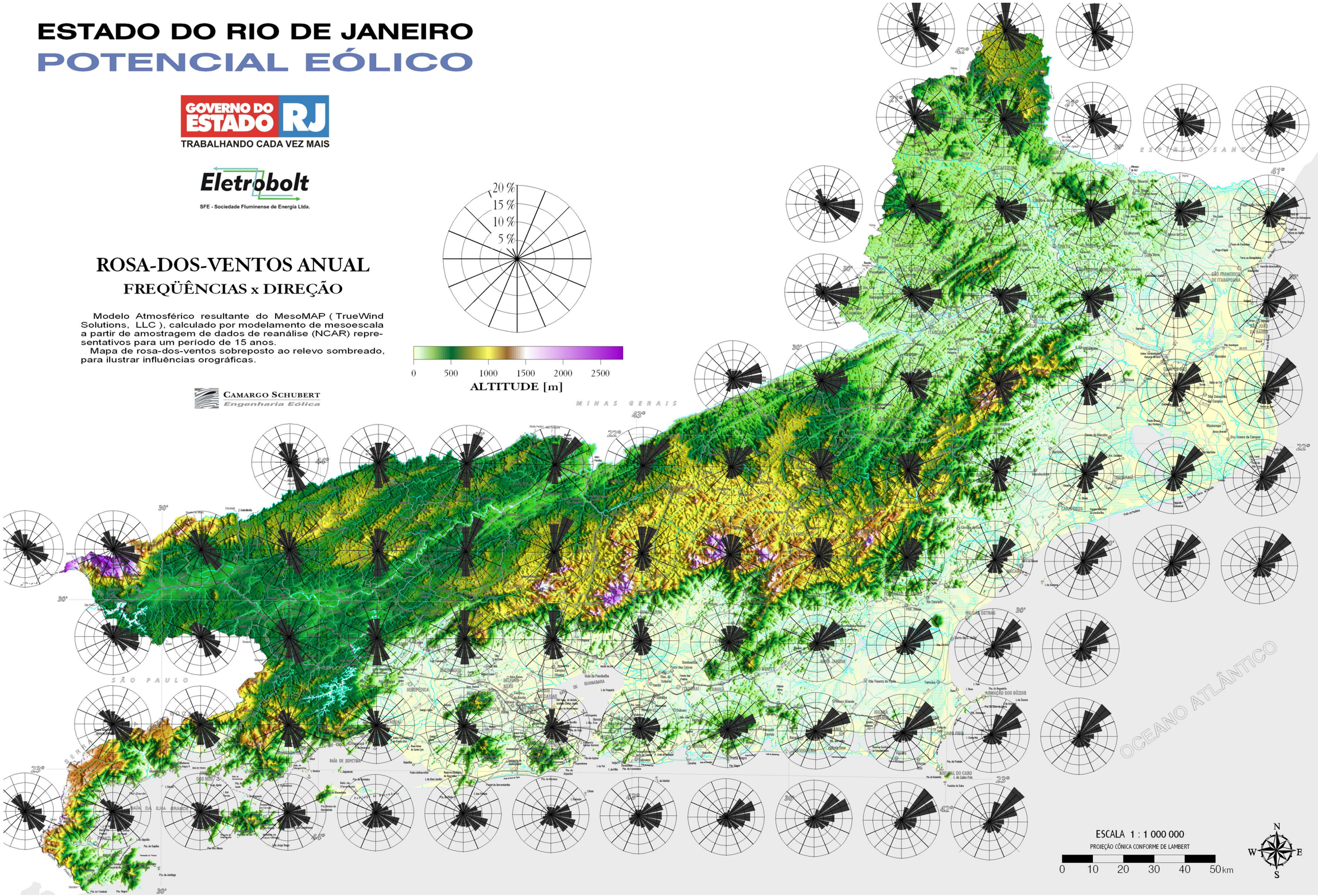
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## ROSA-DOS-VENTOS ANUAL
### FREQÜÊNCIAS x DIREÇÃO

Modelo Atmosférico resultante do MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ), calculado por modelamento de mesoescala a partir de amostragem de dados de reanálise (NCAR) representativos para um período de 15 anos.
Mapa de rosa-dos-ventos sobreposto ao relevo sombreado, para ilustrar influências orográficas.

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica




ROSA-DOS-VENTOS ANUAL, FREQÜÊNCIAS X DIREÇÃO

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## ROSA-DOS-VENTOS ANUAL
### VELOCIDADES A 50 m x DIREÇÃO

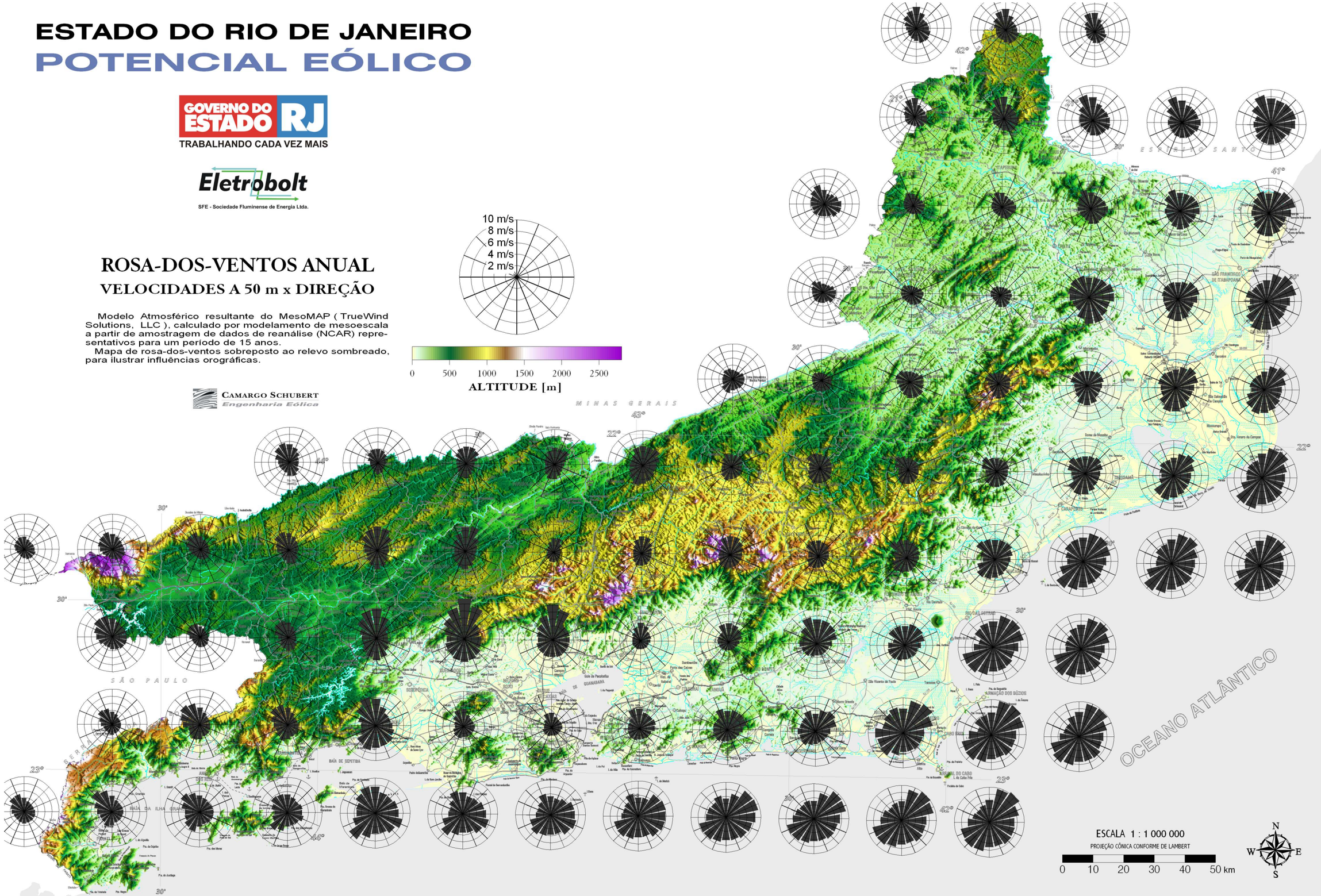
Modelo Atmosférico resultante do MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ), calculado por modelamento de mesoescala a partir de amostragem de dados de reanálise (NCAR) representativos para um período de 15 anos.
Mapa de rosa-dos-ventos sobreposto ao relevo sombreado, para ilustrar influências orográficas.

CAMARGO SCHUBERT
*Engenharia Eólica*








MINAS GERAIS
ESPÍRITO SANTO
SÃO PAULO
OCEANO ATLÂNTICO
ITAPEMIRIM
SÃO FRANCISCO DE ITABAPOANA
MARATAÍZES
ITAPIPOCA
ITAPEBUSSU
ANCHIETA
GUARAPARI
VILA VELHA
VITÓRIA
SERRA
CARIACICA
VIANA
GUARAPARI
ANCHIETA
PIÚMA
ARACRUZ
LINHARES
SÃO MATEUS
JAGUARÉ
CONCEIÇÃO DA BARRA
PEDRO CANÁRIO
PINHEIROS
BOA ESPERANÇA
NOVA VENÉCIA
MUCURICI
MONTANHA
PONTO BELO
ECOPORANGA
ÁGUA DOCE DO NORTE
VILA PAVÃO
BARRA DE SÃO FRANCISCO
MANTENÓPOLIS
ALTO RIO NOVO
COLATINA
BAIXO GUANDU
MARILÂNDIA
ARACRUZ
IBIRAÇU
SANTA TERESA
SANTA MARIA DE JETIBÁ
DOMINGOS MARTINS
MARECHAL FLORIANO
CASTELO
VENDA NOVA DO IMIGRANTE
ATÍLIO VIVACQUA
MUQUI
ICONHA
MIMOSO DO SUL
BOM JESUS DO NORTE
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM
VARGEM ALTA
RIO NOVO DO SUL
ITAPEMIRIM
PRESIDENTE KENNEDY
MARATAÍZES
ITAPIPOCA
ITAPEBUSSU
GUARAPARI
ANCHIETA
PIÚMA
ARACRUZ
LINHARES
SÃO MATEUS
JAGUARÉ
CONCEIÇÃO DA BARRA
PEDRO CANÁRIO
PINHEIROS
BOA ESPERANÇA
NOVA VENÉCIA
MUCURICI
MONTANHA
PONTO BELO
ECOPORANGA
ÁGUA DOCE DO NORTE
VILA PAVÃO
BARRA DE SÃO FRANCISCO
MANTENÓPOLIS
ALTO RIO NOVO
COLATINA
BAIXO GUANDU
MARILÂNDIA
IBIRAÇU
SANTA TERESA
SANTA MARIA DE JETIBÁ
DOMINGOS MARTINS
MARECHAL FLORIANO
CASTELO
VENDA NOVA DO IMIGRANTE
ATÍLIO VIVACQUA
MUQUI
ICONHA
MIMOSO DO SUL
BOM JESUS DO NORTE
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM
VARGEM ALTA
RIO NOVO DO SUL
ITAPEMIRIM
PRESIDENTE KENNEDY
ITAGUAÇU
ITARANA
SANTA LEOPOLDINA
CARAPINA
SERRA
VILA VELHA
VITÓRIA
VIANA

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

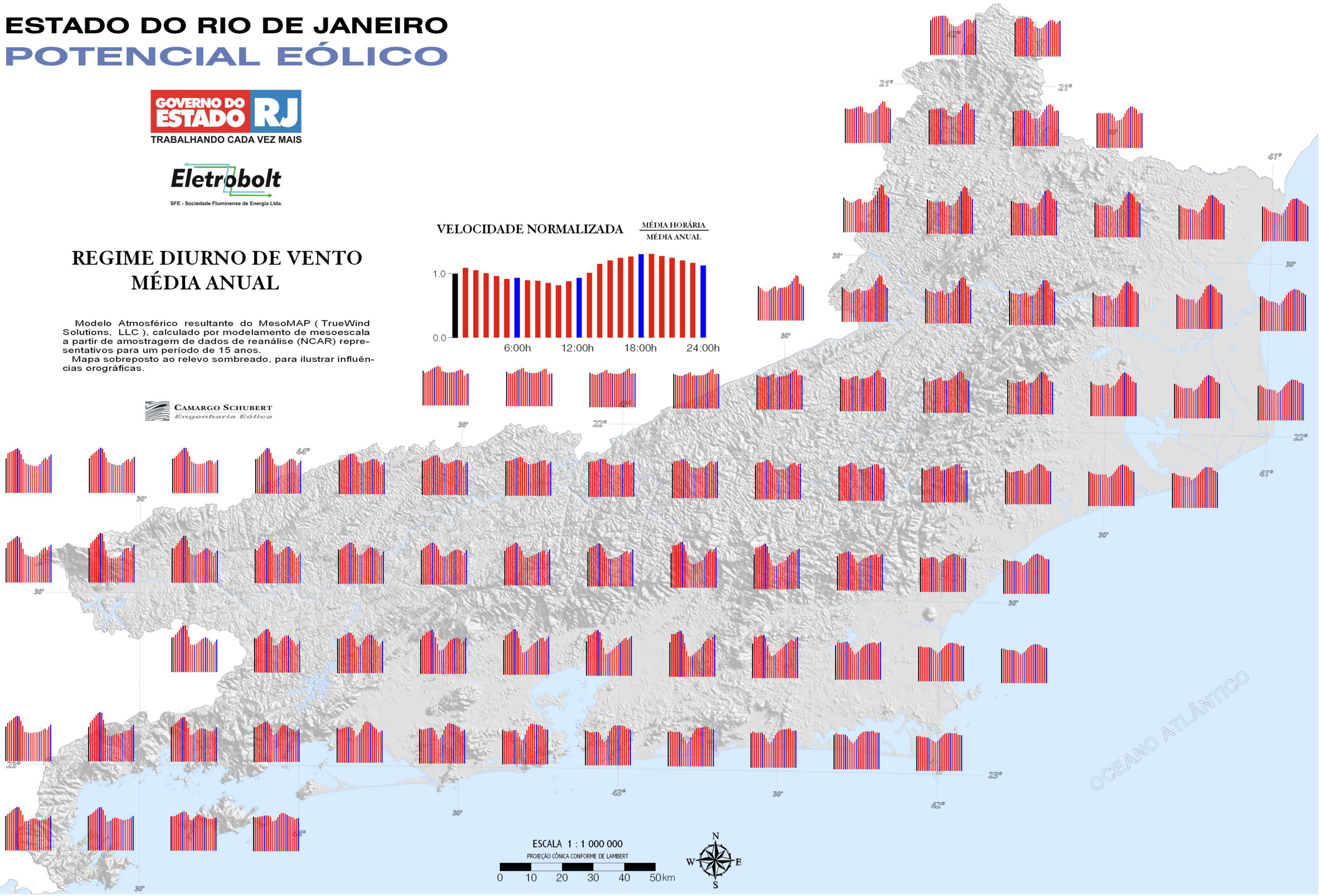
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## REGIME DIURNO DE VENTO
## MÉDIA ANUAL

Modelo Atmosférico resultante do MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ), calculado por modelamento de mesoescala a partir de amostragem de dados de reanálise (NCAR) representativos para um período de 15 anos.
Mapa sobreposto ao relevo sombreado, para ilustrar influências orográficas.

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica




REGIME DIURNO ANUAL

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## FATOR DE FORMA $k$, WEIBULL

Calculado a partir do modelo de mesoescala MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ) e de medições anemométricas em torres de 50 e 60 m de altura.

1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3

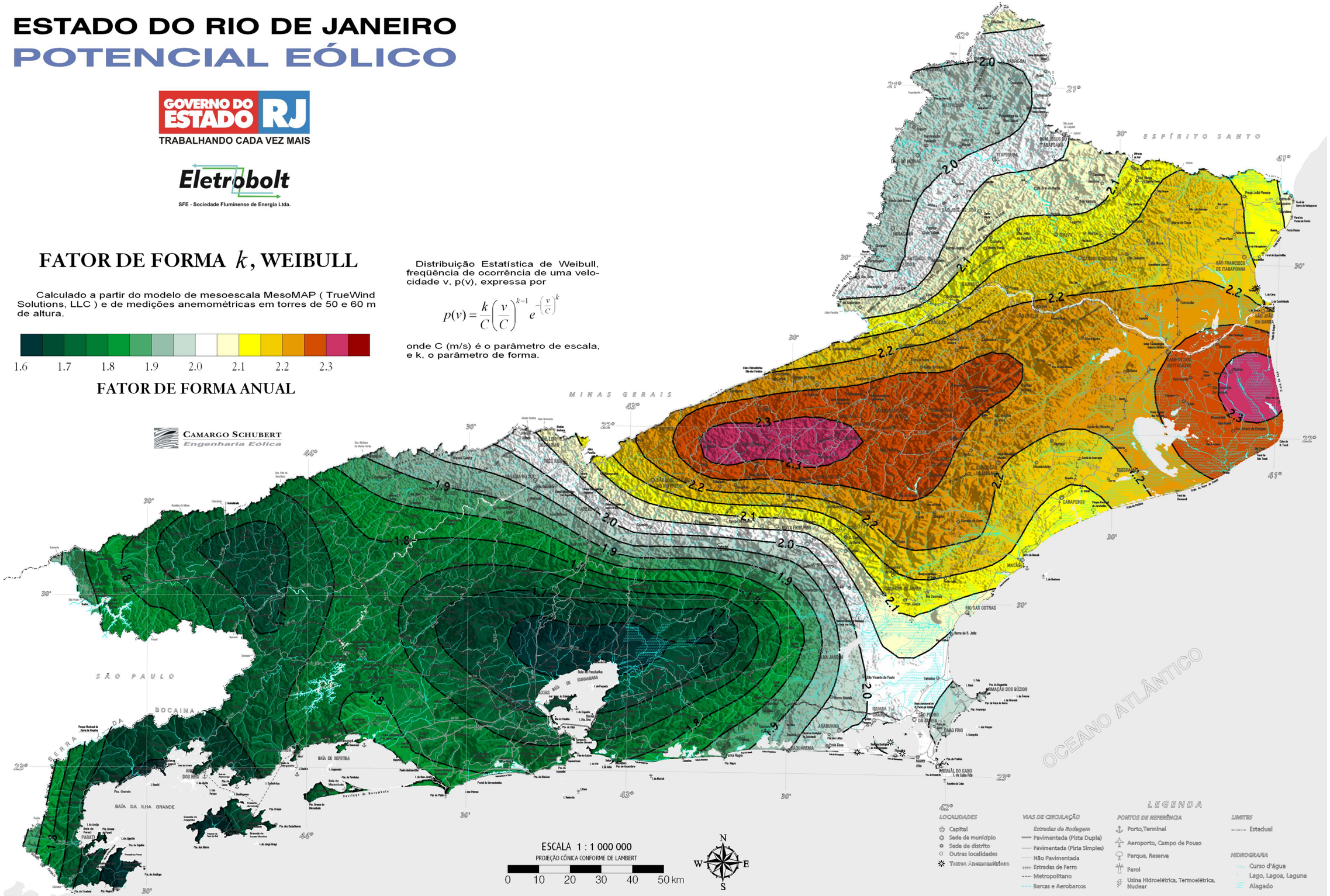
FATOR DE FORMA ANUAL

Distribuição Estatística de Weibull, freqüência de ocorrência de uma velocidade v, p(v), expressa por

$$p(v) = \frac{k}{C}\left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^{k}}$$

onde C (m/s) é o parâmetro de escala, e k, o parâmetro de forma.

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica




FATOR DE FORMA DE WEIBULL ANUAL

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

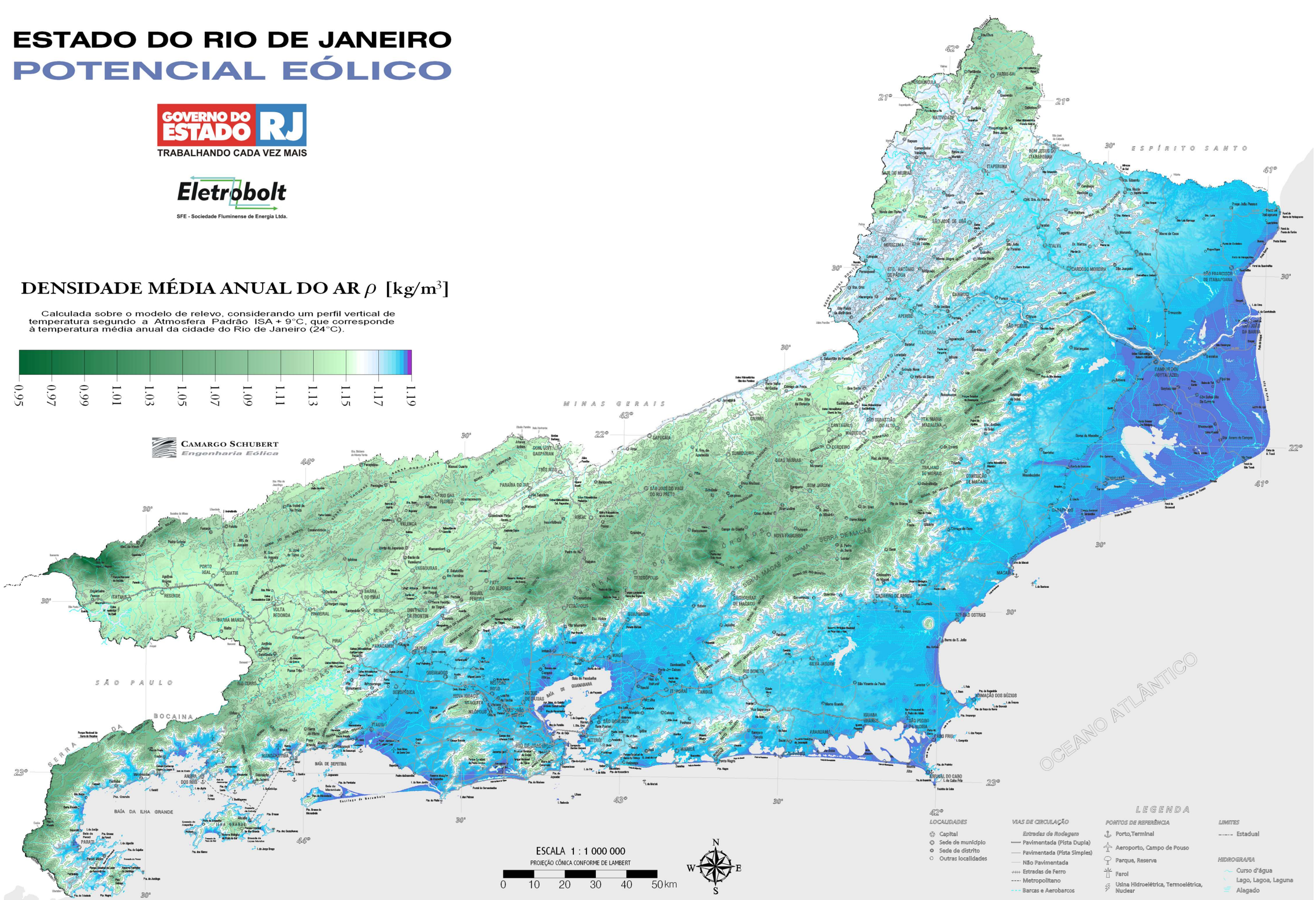
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## DENSIDADE MÉDIA ANUAL DO AR $\rho$ [kg/m$^3$]

Calculada sobre o modelo de relevo, considerando um perfil vertical de temperatura segundo a Atmosfera Padrão ISA + 9°C, que corresponde à temperatura média anual da cidade do Rio de Janeiro (24°C).

0.95 0.97 0.99 1.01 1.03 1.05 1.07 1.09 1.11 1.13 1.15 1.17 1.19

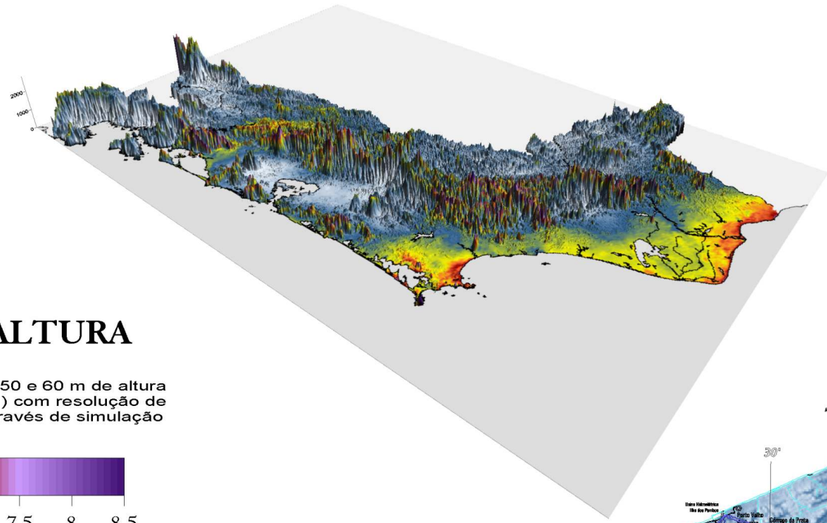
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.



## POTENCIAL EÓLICO A 50 m DE ALTURA

Calculado a partir de medições anemométricas em torres de 50 e 60 m de altura e do modelo de mesoescala MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ) com resolução de 3.6 km x 3.6 km e interpolado para a resolução de 200 m x 200 m através de simulação de camada-limite atmosférica pelo software WindMAP.

2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5

VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

ESPÍRITO SANTO
MINAS GERAIS
SÃO PAULO
OCEANO ATLÂNTICO
BAÍA DE SEPETIBA
BAÍA DA ILHA GRANDE

ESCALA 1 : 1 000 000
PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT
0 10 20 30 40 50 km

N W E S

SISTEMA ELÉTRICO
500 kV
345 kV
230 kV
138 kV
69 kV
34,5 kV
13,8 kV

LEGENDA

LOCALIDADES
Capital
Sede de município
Sede de distrito
Outras localidades
Torres Anemométricas
Restrições Ambientais
Parques, Reservas

VIAS DE CIRCULAÇÃO
Estradas de Rodagem
Pavimentada (Pista Dupla)
Pavimentada (Pista Simples)
Não Pavimentada
Estradas de Ferro
Metropolitano
Barcas e Aerobarcos

PONTOS DE REFERÊNCIA
Porto,Terminal
Aeroporto, Campo de Pouso
Parque, Reserva
Farol
Usina Hidroelétrica, Termoelétrica, Nuclear

LIMITES
Estadual

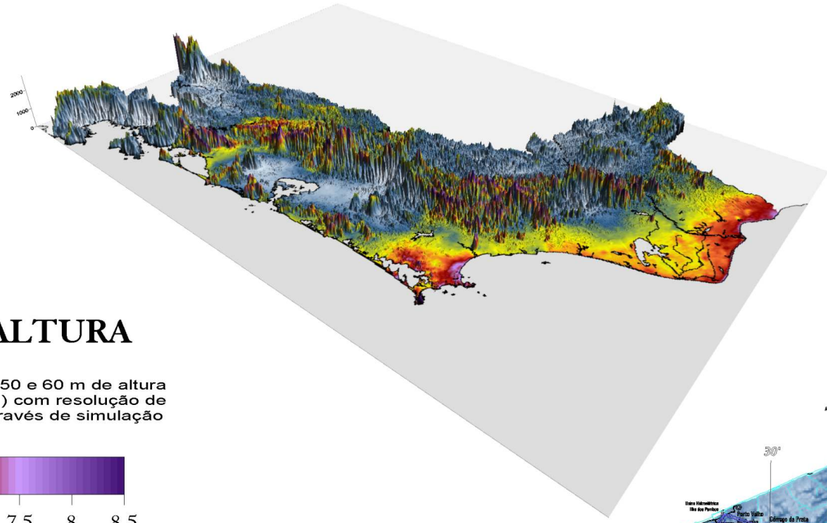
HIDROGRAFIA
Curso d'água
Lago, Lagos, Laguna
Alagado

POTENCIAL EÓLICO A 50 metros DE ALTURA

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.



## POTENCIAL EÓLICO A 75 m DE ALTURA

Calculado a partir de medições anemométricas em torres de 50 e 60 m de altura e do modelo de mesoescala MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ) com resolução de 3.6 km x 3.6 km e interpolado para a resolução de 200 m x 200 m através de simulação de camada-limite atmosférica pelo software WindMAP.

2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5

VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

ESCALA 1 : 1 000 000
PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT
0 10 20 30 40 50 km

SISTEMA ELÉTRICO
500 kV
345 kV
230 kV
138 kV
69 kV
34,5 kV
13,8 kV

LEGENDA
LOCALIDADES
Capital
Sede de município
Sede de distrito
Outras localidades
Torres Anemométricas
Restrições Ambientais Parques, Reservas

VIAS DE CIRCULAÇÃO
Estradas de Rodagem
Pavimentada (Pista Dupla)
Pavimentada (Pista Simples)
Não Pavimentada
Estradas de Ferro
Metropolitano
Barcas e Aerobarcos

PONTOS DE REFERÊNCIA
Porto,Terminal
Aeroporto, Campo de Pouso
Parque, Reserva
Farol
Usina Hidroelétrica, Termoelétrica, Nuclear

LIMITES
Estadual

HIDROGRAFIA
Curso d'água
Lago, Lagos, Laguna
Alagado

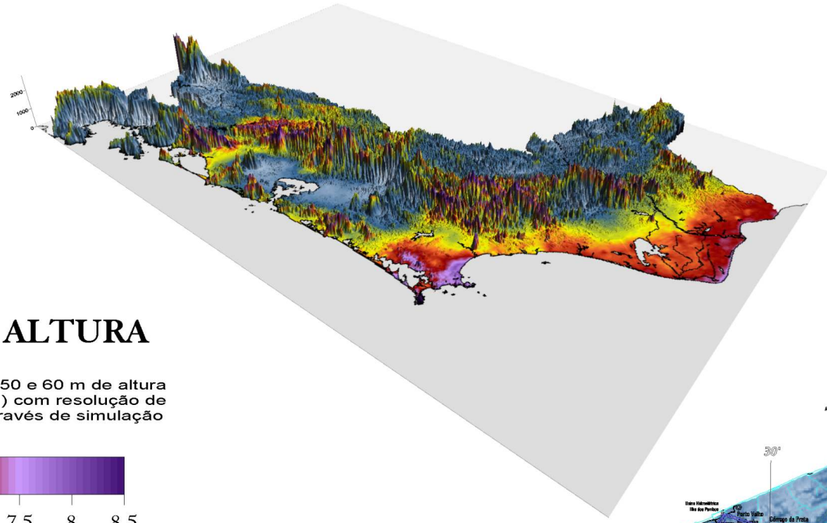
ESPÍRITO SANTO
MINAS GERAIS
SÃO PAULO
OCEANO ATLÂNTICO

POTENCIAL EÓLICO A 75 metros DE ALTURA

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.



## POTENCIAL EÓLICO A 100 m DE ALTURA

Calculado a partir de medições anemométricas em torres de 50 e 60 m de altura e do modelo de mesoescala MesoMAP ( TrueWind Solutions, LLC ) com resolução de 3.6 km x 3.6 km e interpolado para a resolução de 200 m x 200 m através de simulação de camada-limite atmosférica pelo software WindMAP.

2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5

VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

ESPÍRITO SANTO
MINAS GERAIS
SÃO PAULO
OCEANO ATLÂNTICO

ESCALA 1 : 1 000 000
PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT
0 10 20 30 40 50 km

SISTEMA ELÉTRICO
500 kV
345 kV
230 kV
138 kV
69 kV
34,5 kV
13,8 kV

LEGENDA

LOCALIDADES
Capital
Sede de município
Sede de distrito
Outras localidades
Torres Anemométricas
Restrições Ambientais Parques, Reservas

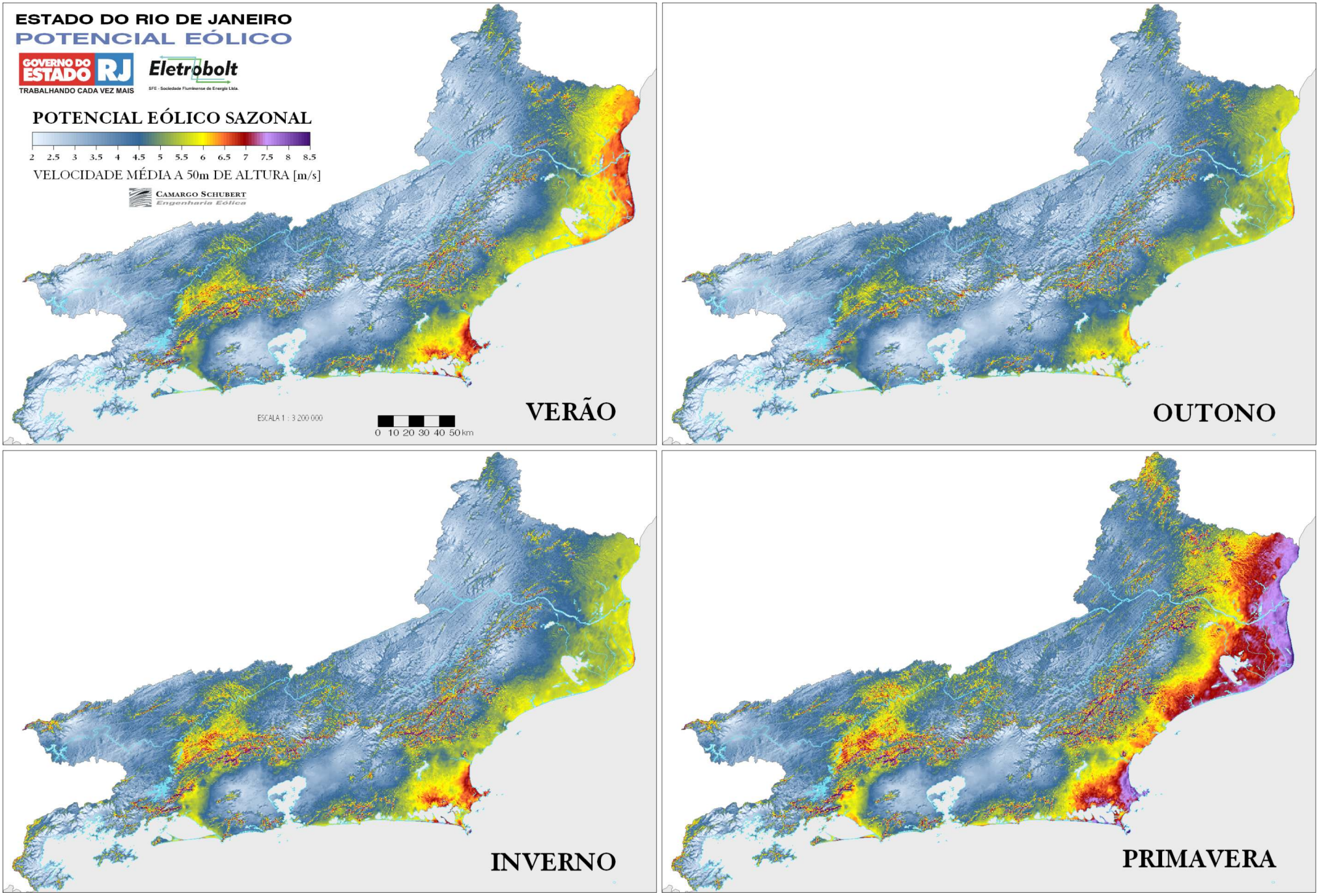
VIAS DE CIRCULAÇÃO
Estradas de Rodagem
Pavimentada (Pista Dupla)
Pavimentada (Pista Simples)
Não Pavimentada
Estradas de Ferro
Metropolitano
Barcas e Aerobarcos

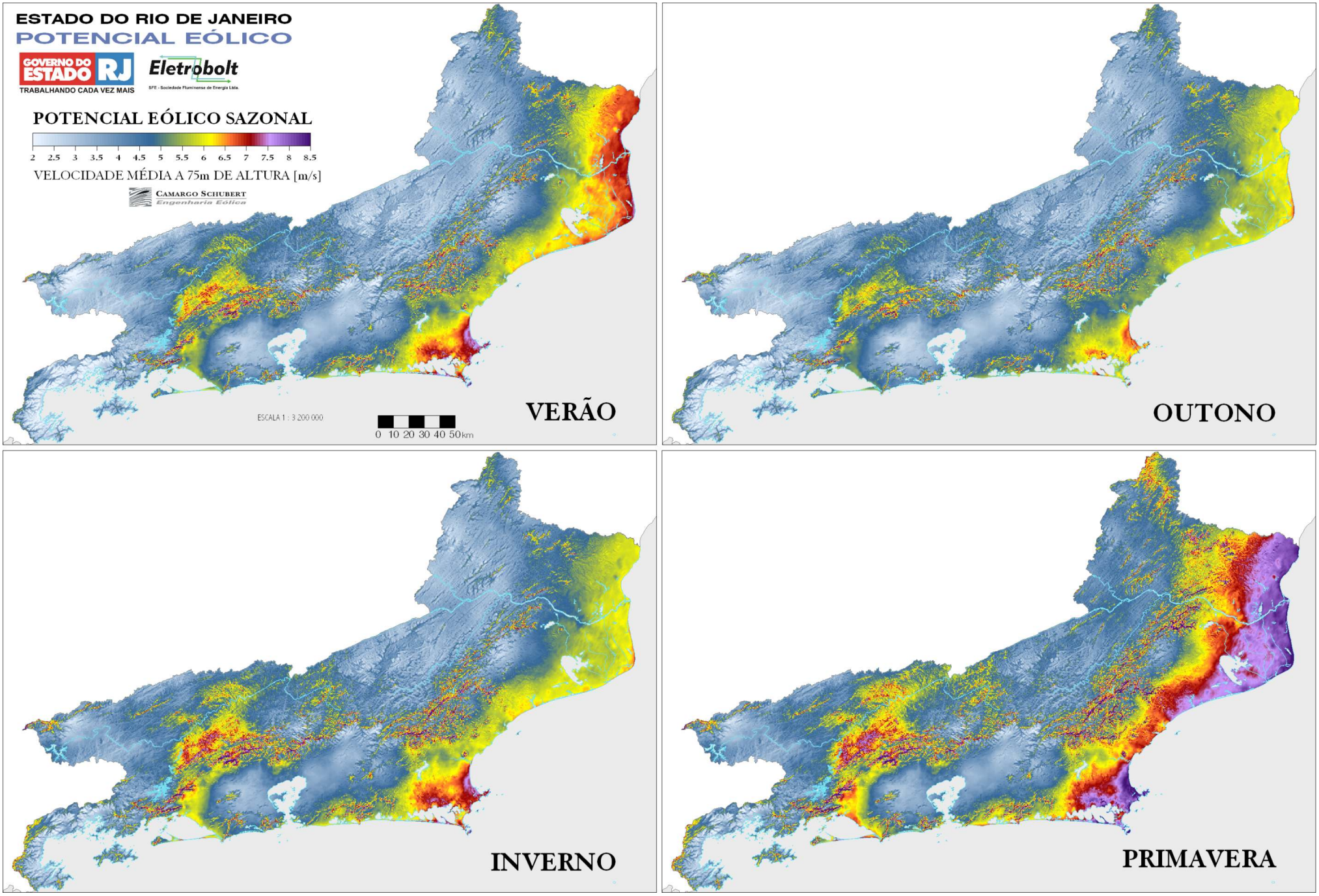
PONTOS DE REFERÊNCIA
Porto,Terminal
Aeroporto, Campo de Pouso
Parque, Reserva
Farol
Usina Hidroelétrica, Termoelétrica, Nuclear

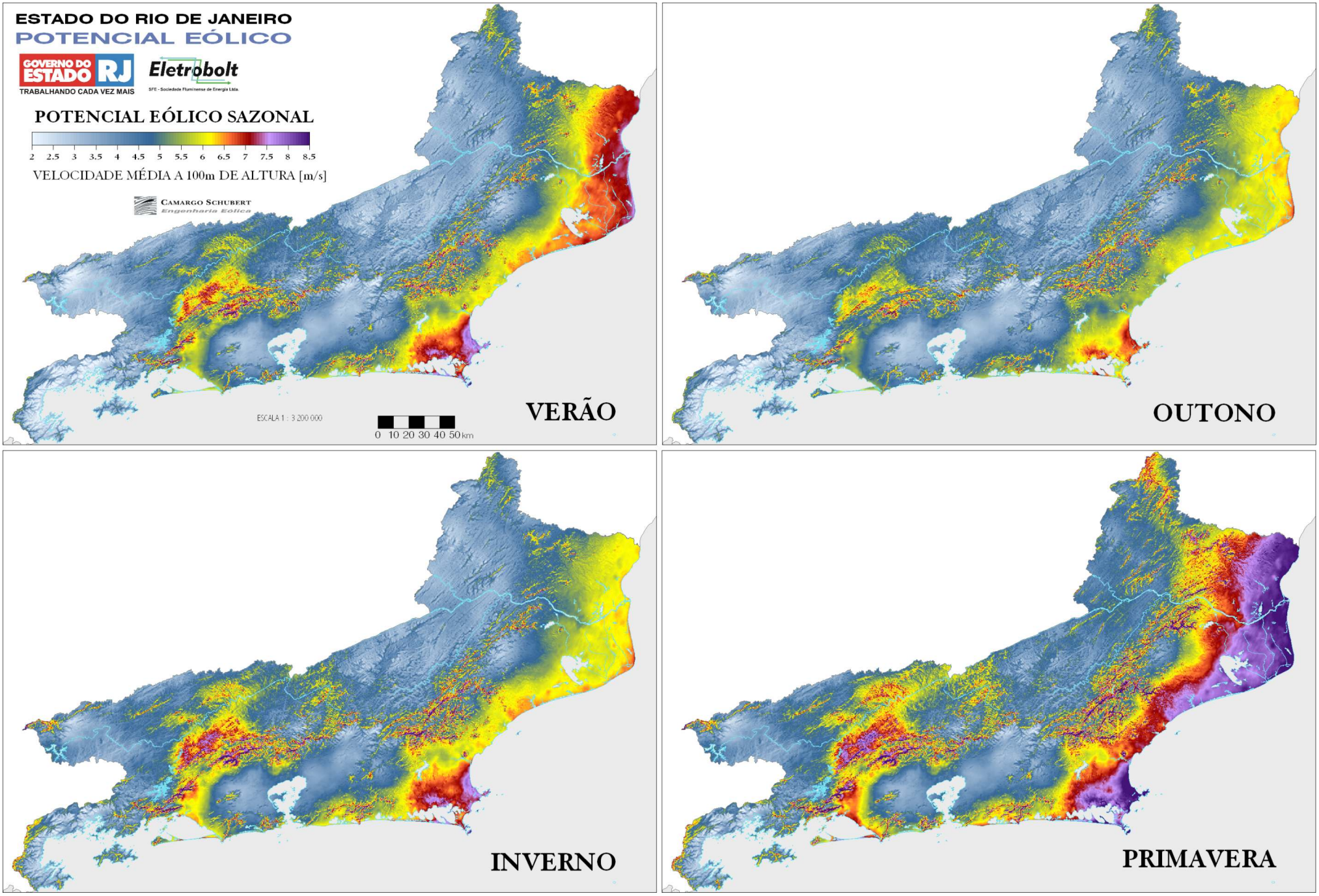
LIMITES
Estadual

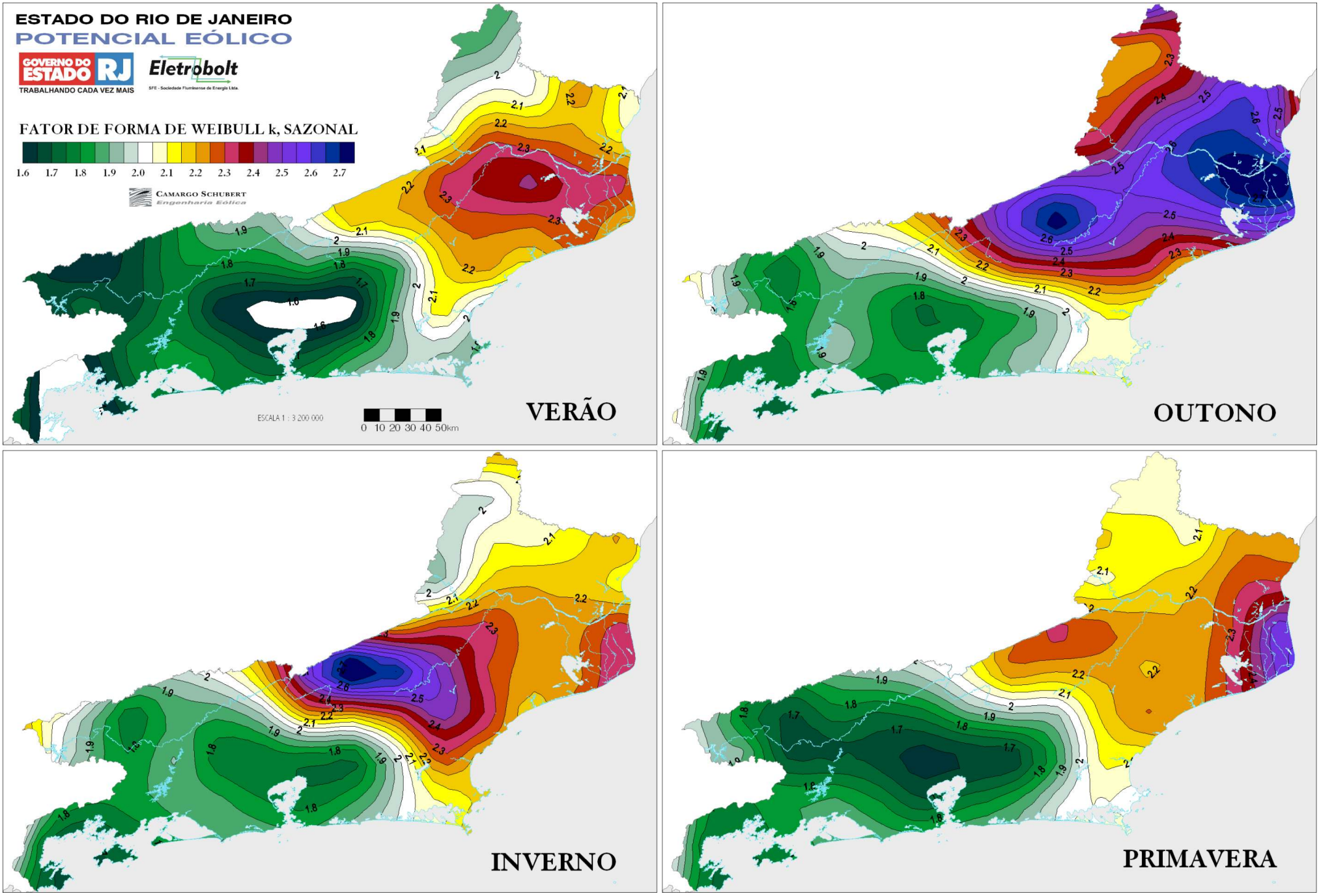
HIDROGRAFIA
Curso d'água
Lago, Lagos, Laguna
Alagado

POTENCIAL EÓLICO A 100 metros DE ALTURA


ESTADO DO RIO DE JANEIRO
POTENCIAL EÓLICO
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.
POTENCIAL EÓLICO SAZONAL
2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5
VELOCIDADE MÉDIA A 50m DE ALTURA [m/s]
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica
ESCALA 1 : 3.200.000
0 10 20 30 40 50 km
VERÃO
OUTONO
INVERNO
PRIMAVERA


ESTADO DO RIO DE JANEIRO
POTENCIAL EÓLICO
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.
POTENCIAL EÓLICO SAZONAL
2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5
VELOCIDADE MÉDIA A 75m DE ALTURA [m/s]
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica
ESCALA 1 : 3 200 000
0 10 20 30 40 50 km
VERÃO
OUTONO
INVERNO
PRIMAVERA


ESTADO DO RIO DE JANEIRO
POTENCIAL EÓLICO
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.
POTENCIAL EÓLICO SAZONAL
2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5
VELOCIDADE MÉDIA A 100m DE ALTURA [m/s]
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica
ESCALA 1 : 3.200.000
0 10 20 30 40 50 km
VERÃO
OUTONO
INVERNO
PRIMAVERA


ESTADO DO RIO DE JANEIRO
POTENCIAL EÓLICO
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.
FATOR DE FORMA DE WEIBULL k, SAZONAL
1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica
ESCALA 1 : 3 200 000
0 10 20 30 40 50km
VERÃO
OUTONO
INVERNO
PRIMAVERA

# 5. Análises e Diagnósticos

## 5.1 Potencial Eólico Estimado

O potencial eólico do Estado do Rio de Janeiro foi calculado a partir da integração dos mapas de velocidades médias anuais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia de usinas eólicas no estado-da-arte mundial. Nesse processo foram adotadas as seguintes considerações:

- Para as velocidades de vento calculadas nas 3 alturas, 50m, 75m e 100m, foram consideradas curvas de desempenho típicas de turbinas eólicas de 750 kW e 1.5 MW, com diâmetros de rotor de 50m e 77m, respectivamente, e torres de 50m (750 kW), 75m e 100m (1.5 MW) de altura. Na Figura 5.1.1 são apresentas as curvas de potência das turbinas consideradas.
- Foi considerada uma taxa de ocupação média de terreno de 1.5 MW/km$^2$, o que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas comerciais em terrenos planos, sem restrições de uso do solo (e.g. topografia desfavorável, áreas habitadas, difícil acesso, áreas alagáveis, restrições ambientais) e sem obstáculos. [18 a 21]
- Para todo o território do Rio de Janeiro, nos respectivos mapas com resolução de 200m x 200m, foram integradas as áreas com velocidades médias anuais a partir de 5.5m/s, em faixas de 0.5m/s. A integração e o cálculo do potencial de geração foi realizado em separado para os casos de usinas eólicas implantadas em *terra* (*onshore*), onde foram descartadas as áreas abrangidas pelas principais lagoas, rios, represas e mar, e *sobre água* (*offshore*), abrangendo apenas as áreas das 2 principais lagoas do Estado: a Lagoa de Araruama e a Lagoa Feia.

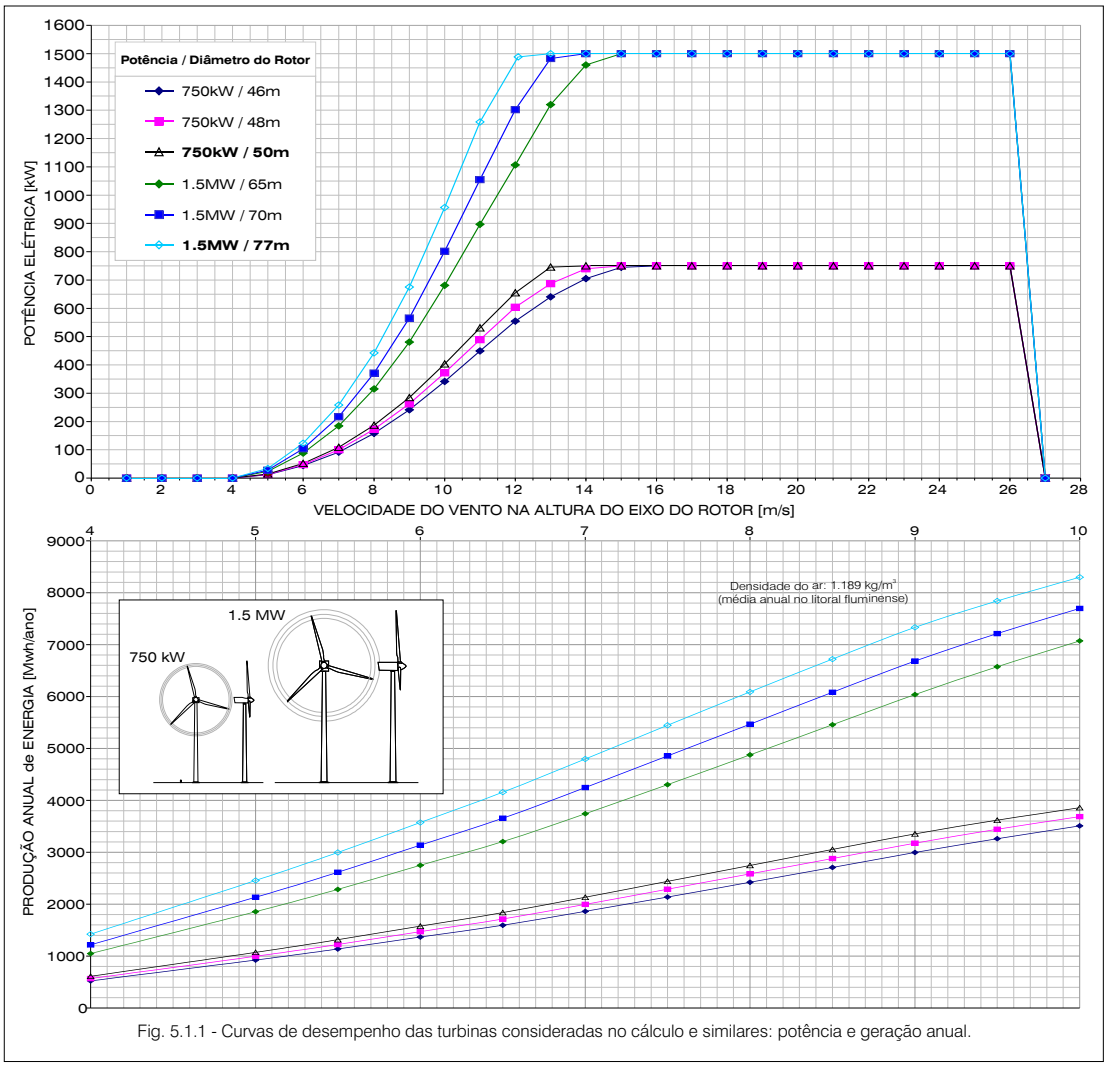



Fig. 5.1.1 - Curvas de desempenho das turbinas consideradas no cálculo e similares: potência e geração anual.

- O efeito da densidade do ar na produção de energia (e correspondente fator de capacidade) foi calculado para cada local a partir do Mapa de Densidade do Ar, apresentado no Capítulo 4.

- Na integração das curvas de potência das turbinas, foram calculadas as distribuições de velocidade do vento locais, considerando os Fatores de Forma de Weibull (k) apresentados no mapa correspondente do Capítulo 4.

- No cálculo de geração e desempenho de usina foi considerado um fator de disponibilidade de 98%, um fator de eficiência (interferência aerodinâmica entre rotores) de 97% e um fator de perdas de 2%.

As Tabelas 5.1.1 e 5.1.2 apresentam o resultado da integração dos mapas e o Potencial Eólico do Estado do Rio de Janeiro. Deve ser observado que os fatores de capacidade e o potencial de geração não apresentarão variações significativas ao utilizar-se curvas de potência de turbinas eólicas com dimensões próximas das consideradas, por exemplo, considerar-se turbinas de 1.2 MW-1.8 MW ao invés de 1.5 MW.

Os limiares mínimos de atratividade para investimentos em geração eólica dependem dos contextos econômicos e institucionais de cada país, variando, em termos de velocidades médias anuais, entre 5.5m/s e 7.0m/s. Tecnicamente, médias anuais a partir de 6.0m/s já constituem condições favoráveis para a operação de usinas eólicas.

Os resultados da integração cumulativa em terra indicam um potencial estimado de 0.75 GW, 1.52 GW e 2.81 GW, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7.0m/s, nas alturas de 50m, 75m e 100m, respectivamente. Considerando-se um limiar de velocidade de 6.5m/s, este potencial eleva-se consideravelmente, sendo de 1.96 GW, 5.16 GW e 8.44 GW (Tabela 5.1.1). Sobre água, estima-se um potencial de 0.42 GW, 0.52 GW, 0.57 GW, para ventos iguais ou superiores a 6.5m/s, nas 3 alturas de integração (Tabela 5.1.2).

Como referência comparativa, o sistema elétrico brasileiro possuía uma capacidade total instalada de 82.3 GW até o final de 2002,[22] e o total de recursos hidráulicos no Brasil (inventariado mais estimado) é de 143.4 GW.[24] O Estado do Rio de Janeiro possui uma capacidade instalada de 5.54 GW, tendo, adicionalmente, 2.63 GW de usinas termo-elétricas em construção.[22] O consumo de energia elétrica no Estado foi de 31.4 TWh no ano de 2000,[23] ao passo que a estimativa de geração eólica anual é de 2.16 TWh, 4.84 TWh e 8.87 TWh nas alturas de 50m, 75m e 100m, para faixas de velocidade acima de 7.0m/s.

**POTENCIAL EÓLICO EM TERRA (ONSHORE)**

INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE

| ALTURA [m] | VENTO [m/s] | ÁREA [km²] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | FATOR DE CAPACIDADE | ENERGIA ANUAL [GWh] |
|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 5.5-6.0 | 3792 | 5688 | 0.192 | 9556 |
| | 6.0-6.5 | 2728 | 4092 | 0.230 | 8257 |
| | 6.5-7.0 | 807 | 1210 | 0.269 | 2853 |
| | 7.0-7.5 | 268 | 402 | 0.304 | 1070 |
| | 7.5-8.0 | 111 | 167 | 0.334 | 488 |
| | 8.0-8.5 | 59 | 88 | 0.366 | 283 |
| | ⩾ 8.5 | 59 | 89 | 0.414 | 323 |
| 75 | 5.5-6.0 | 4278 | 6417 | 0.220 | 12350 |
| | 6.0-6.5 | 3781 | 5671 | 0.267 | 13264 |
| | 6.5-7.0 | 2424 | 3636 | 0.307 | 9776 |
| | 7.0-7.5 | 640 | 960 | 0.344 | 2891 |
| | 7.5-8.0 | 218 | 326 | 0.374 | 1069 |
| | 8.0-8.5 | 85 | 128 | 0.399 | 446 |
| | ⩾ 8.5 | 74 | 110 | 0.443 | 428 |
| 100 | 5.5-6.0 | 4534 | 6802 | 0.221 | 13148 |
| | 6.0-6.5 | 3633 | 5449 | 0.264 | 12598 |
| | 6.5-7.0 | 3751 | 5627 | 0.311 | 15329 |
| | 7.0-7.5 | 1315 | 1973 | 0.346 | 5983 |
| | 7.5-8.0 | 377 | 566 | 0.380 | 1884 |
| | 8.0-8.5 | 109 | 163 | 0.402 | 575 |
| | ⩾ 8.5 | 74 | 111 | 0.441 | 430 |

INTEGRAÇÃO CUMULATIVA

| VENTO [m/s] | ÁREA [km²] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | ENERGIA ANUAL [GWh] |
|---|---|---|---|
| ⩾ 5.5 | 7824 | 11736 | 22829 |
| ⩾ 6.0 | 4032 | 6048 | 13273 |
| ⩾ 6.5 | 1304 | 1956 | 5016 |
| ⩾ 7.0 | 497 | 746 | 2163 |
| ⩾ 7.5 | 229 | 344 | 1093 |
| ⩾ 8.0 | 118 | 177 | 605 |
| ⩾ 8.5 | 59 | 89 | 323 |
| ⩾ 5.5 | 11499 | 17249 | 40224 |
| ⩾ 6.0 | 7221 | 10832 | 27875 |
| ⩾ 6.5 | 3440 | 5161 | 14611 |
| ⩾ 7.0 | 1016 | 1524 | 4835 |
| ⩾ 7.5 | 376 | 564 | 1944 |
| ⩾ 8.0 | 159 | 238 | 875 |
| ⩾ 8.5 | 74 | 110 | 428 |
| ⩾ 5.5 | 13794 | 20691 | 49946 |
| ⩾ 6.0 | 9260 | 13889 | 36799 |
| ⩾ 6.5 | 5627 | 8441 | 24201 |
| ⩾ 7.0 | 1876 | 2813 | 8872 |
| ⩾ 7.5 | 560 | 840 | 2889 |
| ⩾ 8.0 | 183 | 275 | 1005 |
| ⩾ 8.5 | 74 | 111 | 430 |

Tab. 5.1.1- Potencial Eólico *Onshore* do Estado do Rio de Janeiro.

**POTENCIAL EÓLICO SOBRE ÁGUA (OFFSHORE)**

| | INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE | | | | | INTEGRAÇÃO CUMULATIVA | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ALTURA [m] | VENTO [m/s] | ÁREA [km²] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | FATOR DE CAPACIDADE | ENERGIA ANUAL [GWh] | VENTO [m/s] | ÁREA [km²] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | ENERGIA ANUAL [GWh] |
| 50 | **5.5-6.0** | 16 | 24 | 0.206 | 44 | **⩾ 5.5** | 392 | 587 | 1456 |
| | **6.0-6.5** | 98 | 146 | 0.240 | 308 | **⩾ 6.0** | 375 | 563 | 1412 |
| | **6.5-7.0** | 146 | 220 | 0.280 | 539 | **⩾ 6.5** | 278 | 417 | 1105 |
| | **7.0-7.5** | 98 | 146 | 0.319 | 409 | **⩾ 7.0** | 132 | 197 | 566 |
| | **7.5-8.0** | 34 | 51 | 0.352 | 157 | **⩾ 7.5** | 34 | 51 | 157 |
| | **⩾ 8.0** | 0 | 0 | 0.000 | 0 | **⩾ 8.0** | 0 | 0 | 0 |
| 75 | **5.5-6.0** | 1 | 1 | 0.242 | 2 | **⩾ 5.5** | 392 | 588 | 1735 |
| | **6.0-6.5** | 45 | 67 | 0.279 | 163 | **⩾ 6.0** | 391 | 587 | 1734 |
| | **6.5-7.0** | 163 | 245 | 0.316 | 679 | **⩾ 6.5** | 347 | 520 | 1570 |
| | **7.0-7.5** | 124 | 185 | 0.357 | 580 | **⩾ 7.0** | 183 | 275 | 891 |
| | **7.5-8.0** | 59 | 89 | 0.395 | 308 | **⩾ 7.5** | 60 | 90 | 311 |
| | **⩾ 8.0** | 1 | 1 | 0.418 | 3 | **⩾ 8.0** | 1 | 1 | 3 |
| 100 | **5.5-6.0** | 0 | 0 | 0.000 | 0 | **⩾ 5.5** | 392 | 588 | 1798 |
| | **6.0-6.5** | 13 | 20 | 0.282 | 49 | **⩾ 6.0** | 392 | 588 | 1798 |
| | **6.5-7.0** | 154 | 230 | 0.321 | 648 | **⩾ 6.5** | 379 | 568 | 1749 |
| | **7.0-7.5** | 146 | 219 | 0.357 | 684 | **⩾ 7.0** | 225 | 337 | 1101 |
| | **7.5-8.0** | 75 | 112 | 0.399 | 392 | **⩾ 7.5** | 79 | 119 | 417 |
| | **⩾ 8.0** | 5 | 7 | 0.421 | 25 | **⩾ 8.0** | 5 | 7 | 25 |

Tab. 5.1.2- Potencial Eólico *Offshore* do Estado do Rio de Janeiro. Inclui apenas as áreas da Lagoa Feia e da Lagoa de Araruama.

A Figura 5.1.2 apresenta os mapas do potencial eólico *offshore* do Estado do Rio de Janeiro, nas alturas de 50, 75 e 100m, com os ventos médios anuais sobre as duas maiores lagoas do Estado: a Lagoa de Araruama e a Lagoa Feia.

## 5.2 Áreas Mais Favoráveis

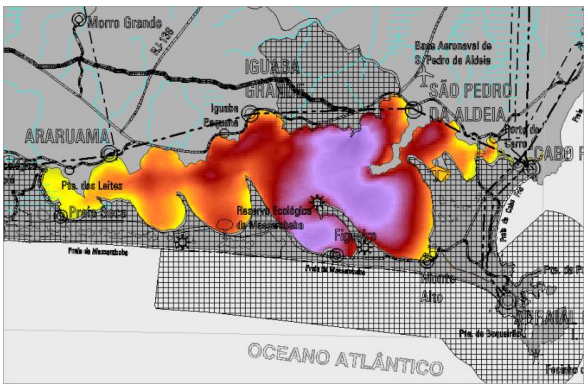
Os mapas de potencial eólico apresentados no Capítulo 4 evidenciam três principais áreas para empreendimentos eólio-elétricos no Estado do Rio de Janeiro (Figura 5.2.1):

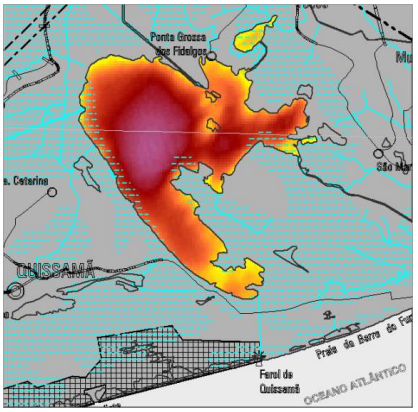
**Área 1, Litoral Norte Fluminense**: extensa planície costeira, com baixa rugosidade e regimes de vento propícios a aproveitamentos eólicos, com velocidades médias anuais em torno de 6.5m/s (a 50m de altura) nas melhores áreas. Área com densidade demográfica relativamente baixa e mais distante de grandes subestações, tem vocação para grandes usinas eólicas (dezenas a centenas de Megawatts), necessárias para diluir os custos da interligação ao sistema elétrico regional. Os principais centros de consumo na região são os municípios de Campos de Goytacazes (com 407 mil habitantes e um consumo anual de 438 GWh, no ano de 2000), São Francisco de Itabapoana (41 mil, 38 GWh) e São João da Barra (28 mil, 39 GWh). [23, 25] Ao sul desta área situa-se o Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, estendendo-se por 44 quilômetros de litoral, nos municípios de Macaé, Carapebus e Quissamã. [26]

**Área 2, Cabo Frio e Búzios, Região dos Lagos**: área litorânea de esplêndida beleza por seus inúmeros acidentes geográficos, com densidade demográfica relativamente elevada, próxima de subestações de médio e grande porte, com velocidades médias anuais próximas de 7.0m/s (a 50m de altura) nas melhores áreas. Apresenta vocação para usinas eólicas de dezenas até centenas de Megawatts, dispersas entre as oportunidades geográficas existentes. Área com tendência a ter maior custo de terreno para empreendimentos deste tipo, mas menores custos de interligação ao sistema elétrico. Como principais centros de consumo, destacam-se os municípios de Cabo Frio (127 mil, 200 GWh), Araruana (83 mil, 151 GWh), São Pedro da Aldeia (63 mil, 82 GWh), Saquarema (53 mil, 69 GWh), Armação dos Búzios (18 mil, 58 GWh), Rio das Ostras (36 mil, 54 GWh) e Arraial do Cabo (24 mil, 44 GWh). [23, 25] Nessa área situam-se as Áreas de Proteção Ambiental da Serra de Sapiatiba e de Massambaba e a Reserva Extrativista Marinha do Arraial do Cabo, criada para evitar a pesca predatória num dos locais com maior abundância de peixes no Estado. [26]

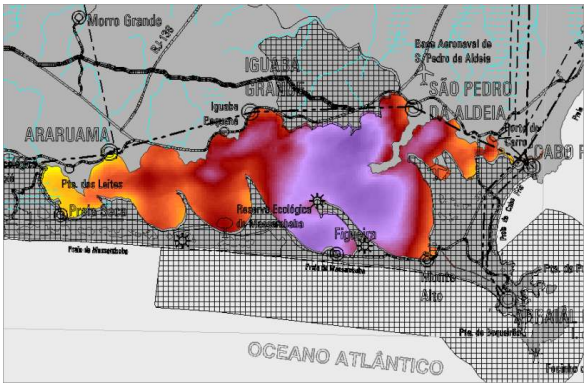
**Lagoa de Araruama** | **Lagoa Feia**

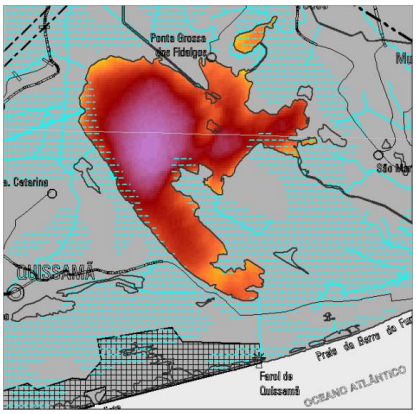
**50m de ALTURA**



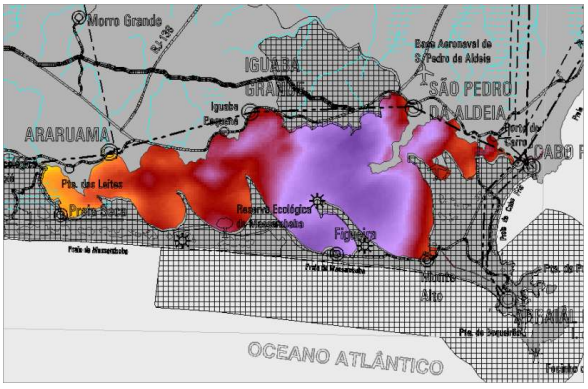



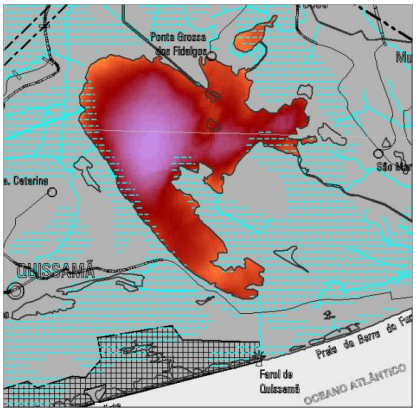

**75m de ALTURA**




**100m de ALTURA**




**VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]**

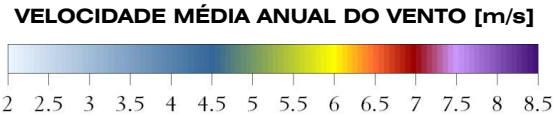



Fig. 5.1.2 - Potencial Eólico *Offshore* sobre as duas principais lagoas do Rio de Janeiro.

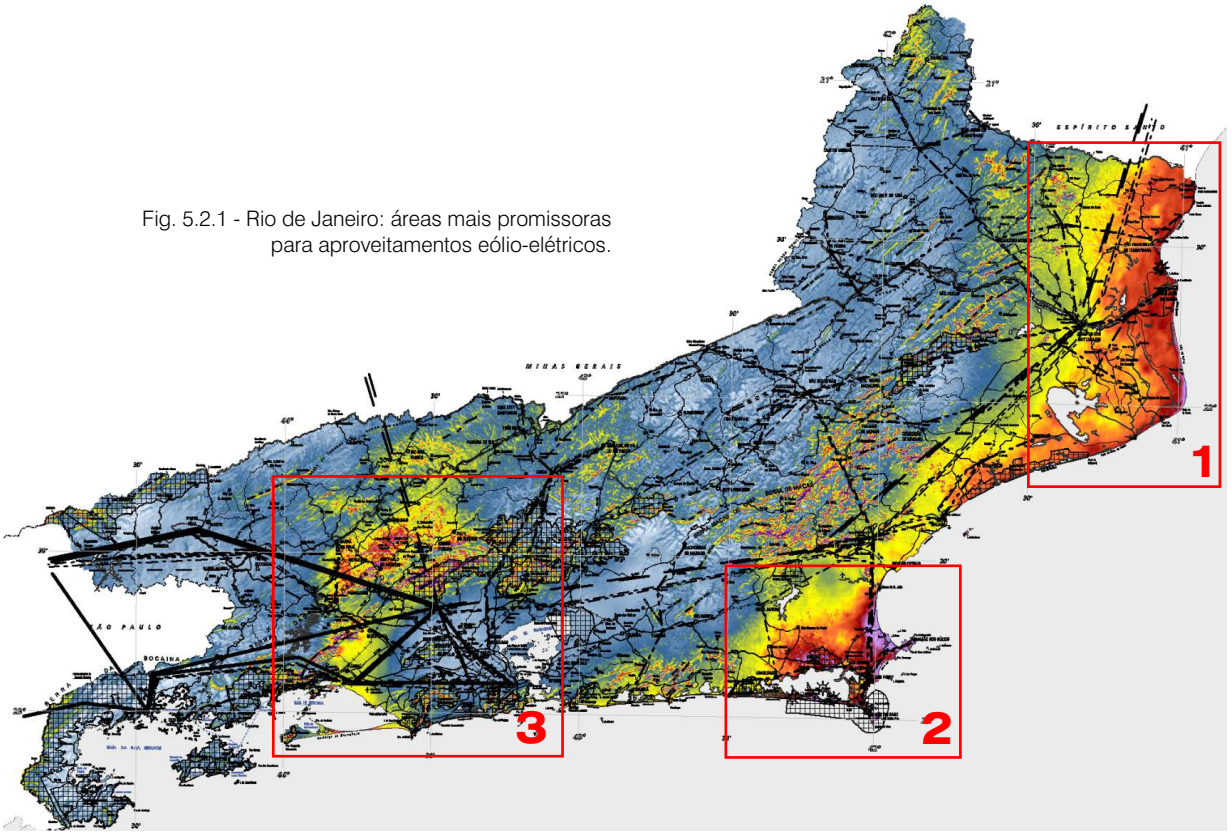



Fig. 5.2.1 - Rio de Janeiro: áreas mais promissoras para aproveitamentos eólio-elétricos.

**Área 3, Região Serrana, polígono Piraí-Vassouras-Petrópolis**: apresenta algumas áreas propícias a usinas eólicas de pequeno a médio porte (até poucas dezenas de Megawatts), com velocidades médias anuais de 6.0m/s a 6.5m/s nos melhores locais, podendo ultrapassar 7.5m/s nas maiores elevações. Por serem áreas com relevo mais complexo, podem existir potenciais dificuldades de acesso para transporte e montagem de turbinas, interligação ao sistema elétrico e subestações eventualmente distantes. Os principais centros de consumo são os municípios de Petrópolis (287 mil, 517 GWh), Piraí (22 mil, 121 GWh), Paracambi (40 mil, 48 GWh), Vassouras (31 mil, 42 GWh), Mendes (17 mil, 36 GWh) e Miguel Pereira (24 mil, 32 GWh).[23, 25] Nessa área situam-se as Reservas Biológicas do Tinguá e de Araras, que preservam áreas remanescentes de Mata Atlântica.[26]

A seguir são apresentados os mapas de velocidades médias anuais destas áreas, nas 3 alturas de integração.

As Tabelas 5.2.1 a 5.2.3 apresentam o potencial eólico estimado para cada uma destas 3 áreas.

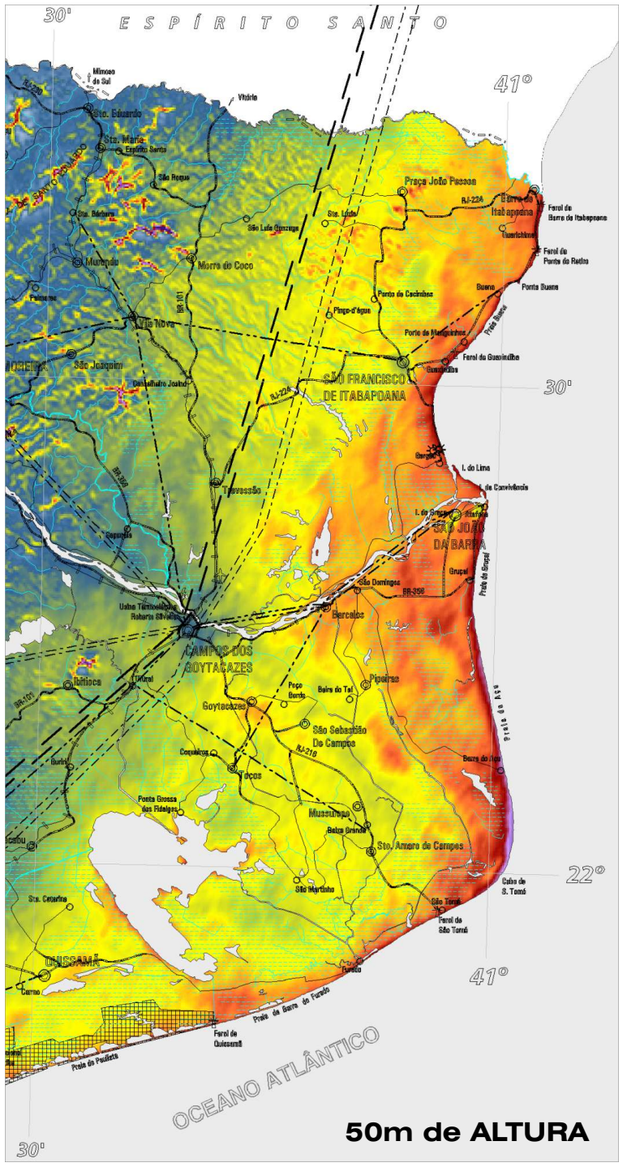
No cálculo do potencial de geração foram adotadas as mesmas premissas de integração: fator de capacidade corrigido pela densidade do ar, considerando-se as distribuições locais de velocidade de vento; fator de disponibilidade de 98%; fator de eficiência de 97%; fator de perdas de 2%; taxa de ocupação média de 1.5 MW/km$^2$; e foram descartadas as áreas cobertas pelas principais lagoas, rios e mar.

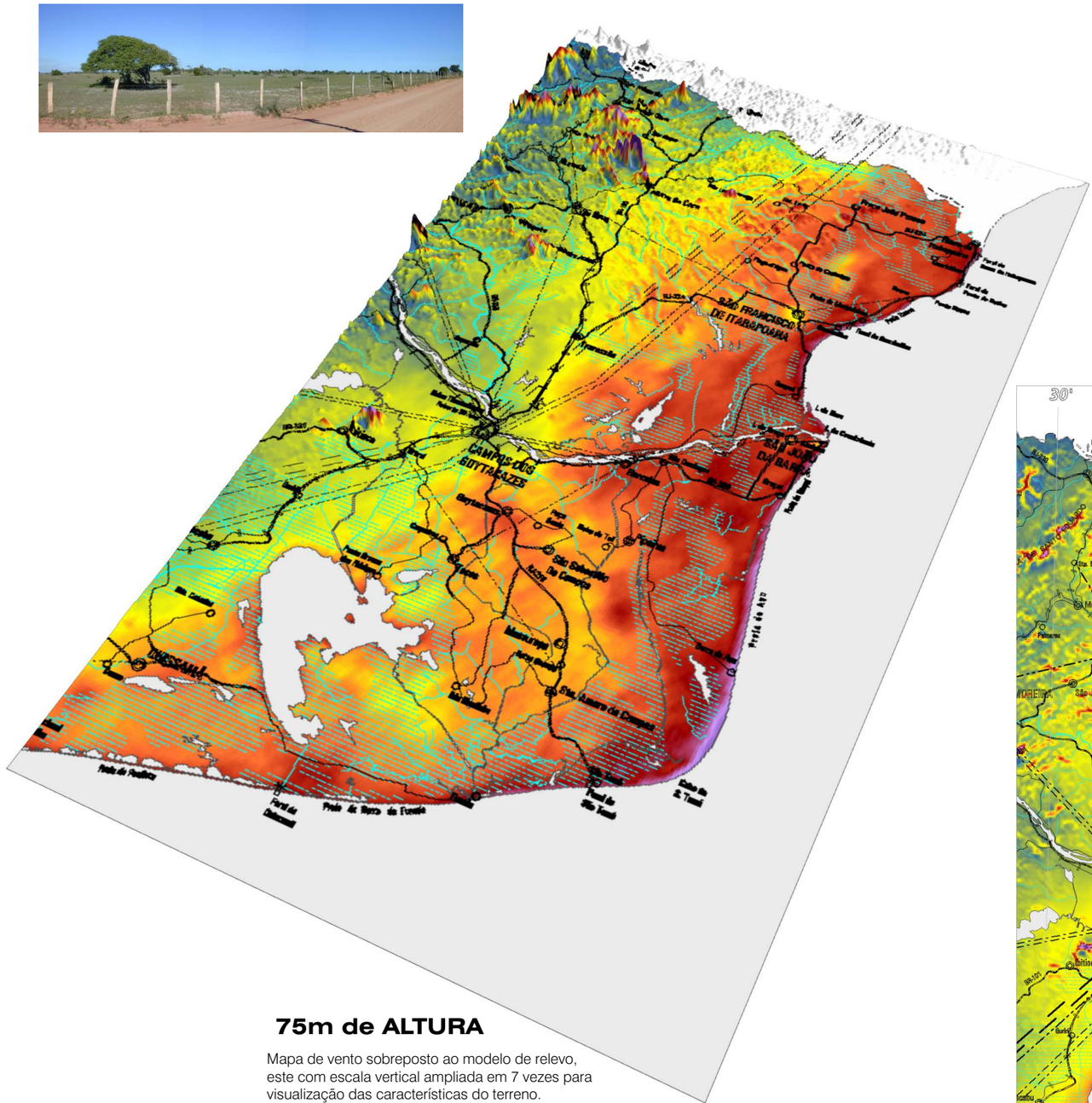
# ÁREA 1: LITORAL NORTE FLUMINENSE

## ESTADO DO RIO DE JANEIRO
## POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

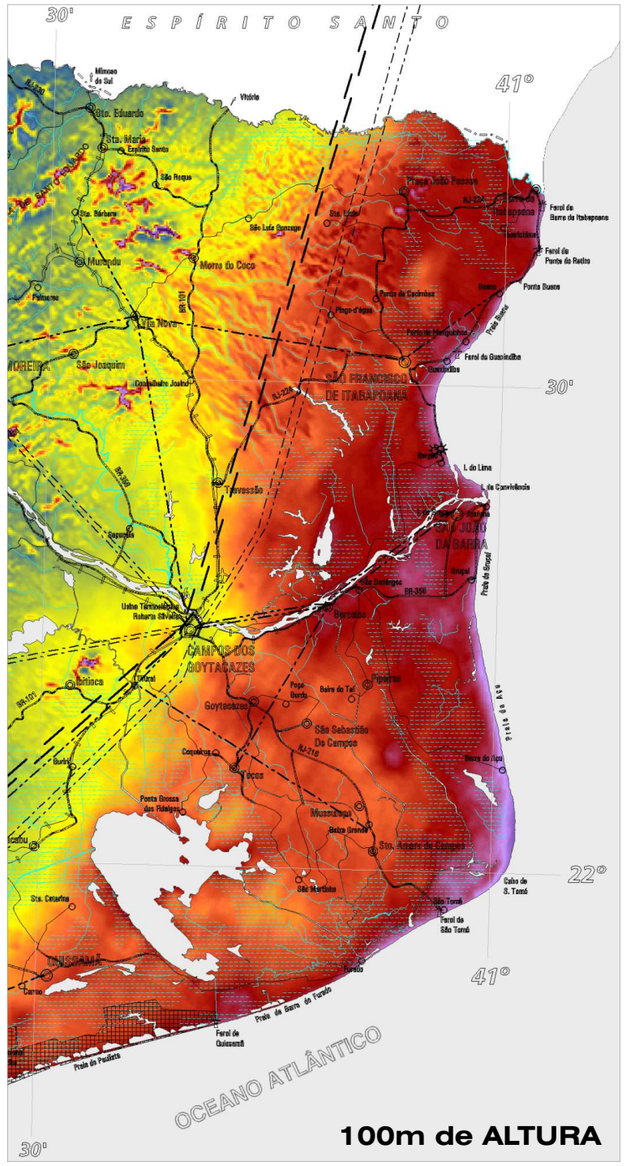
Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.




**75m de ALTURA**

Mapa de vento sobreposto ao modelo de relevo, este com escala vertical ampliada em 7 vezes para visualização das características do terreno.




**VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]**

2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5

CAMARGO SCHUBERT
*Engenharia Eólica*

**Legenda**

*SISTEMA ELÉTRICO*
- 500 kV
- 345 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 34,5 kV
- 13,8 kV

*LOCALIDADES*
- Capital
- Sede de município
- Sede de distrito
- Outras localidades
- Torres Anemométricas
- Restrições Ambientais Parques, Reservas

*VIAS DE CIRCULAÇÃO*
*Estradas de Rodagem*
- Pavimentada (Pista Dupla)
- Pavimentada (Pista Simples)
- Não Pavimentada
- Estradas de Ferro
- Metropolitano
- Barcas e Aerobarcos

*PONTOS DE REFERÊNCIA*
- Porto,Terminal
- Aeroporto, Campo de Pouso
- Parque, Reserva
- Farol
- Usina Hidroelétrica, Termoelétrica, Nuclear

*LIMITES*
- Estadual

*HIDROGRAFIA*
- Curso d'água
- Alagado
- Lago, Lagos, Laguna Mar

**ESCALA 1 : 700 000**
PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT

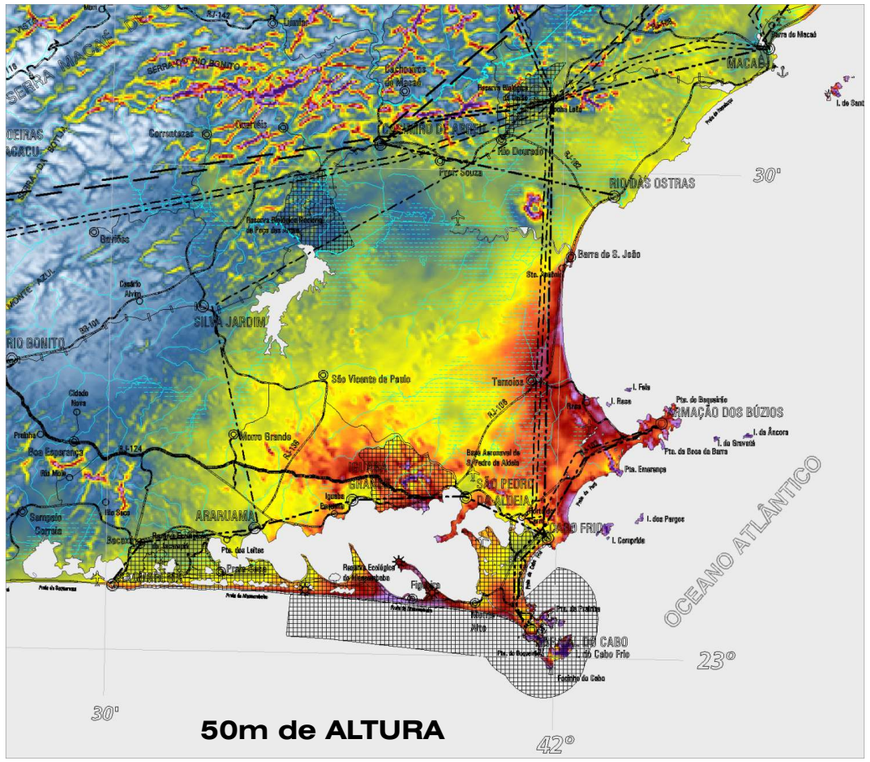
0 10 20 30 40 50 km

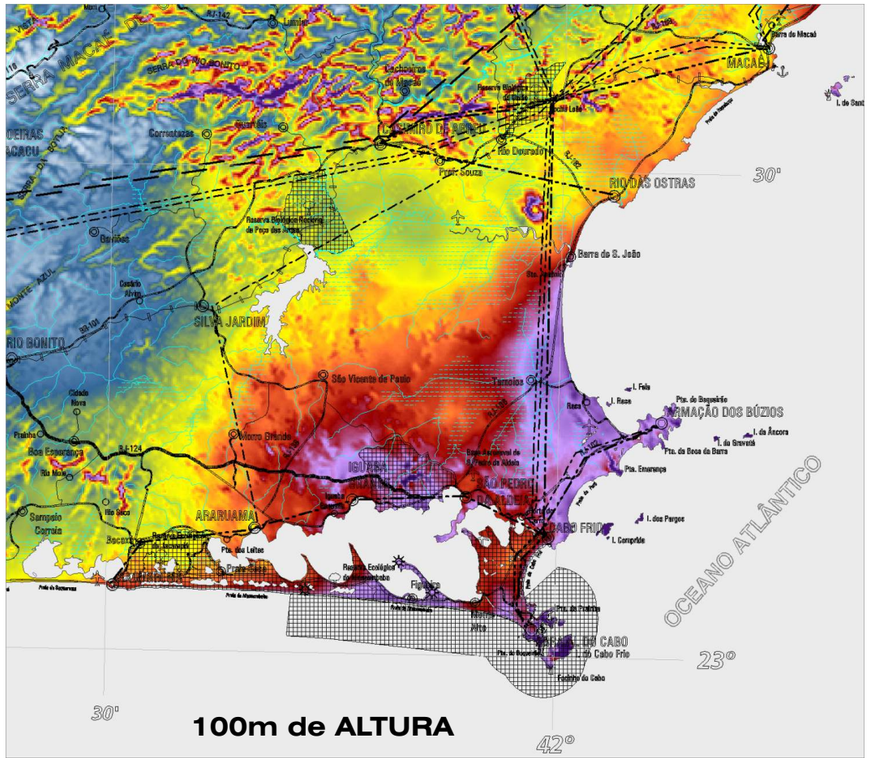
# ÁREA 2: CABO FRIO E BÚZIOS, REGIÃO DOS LAGOS

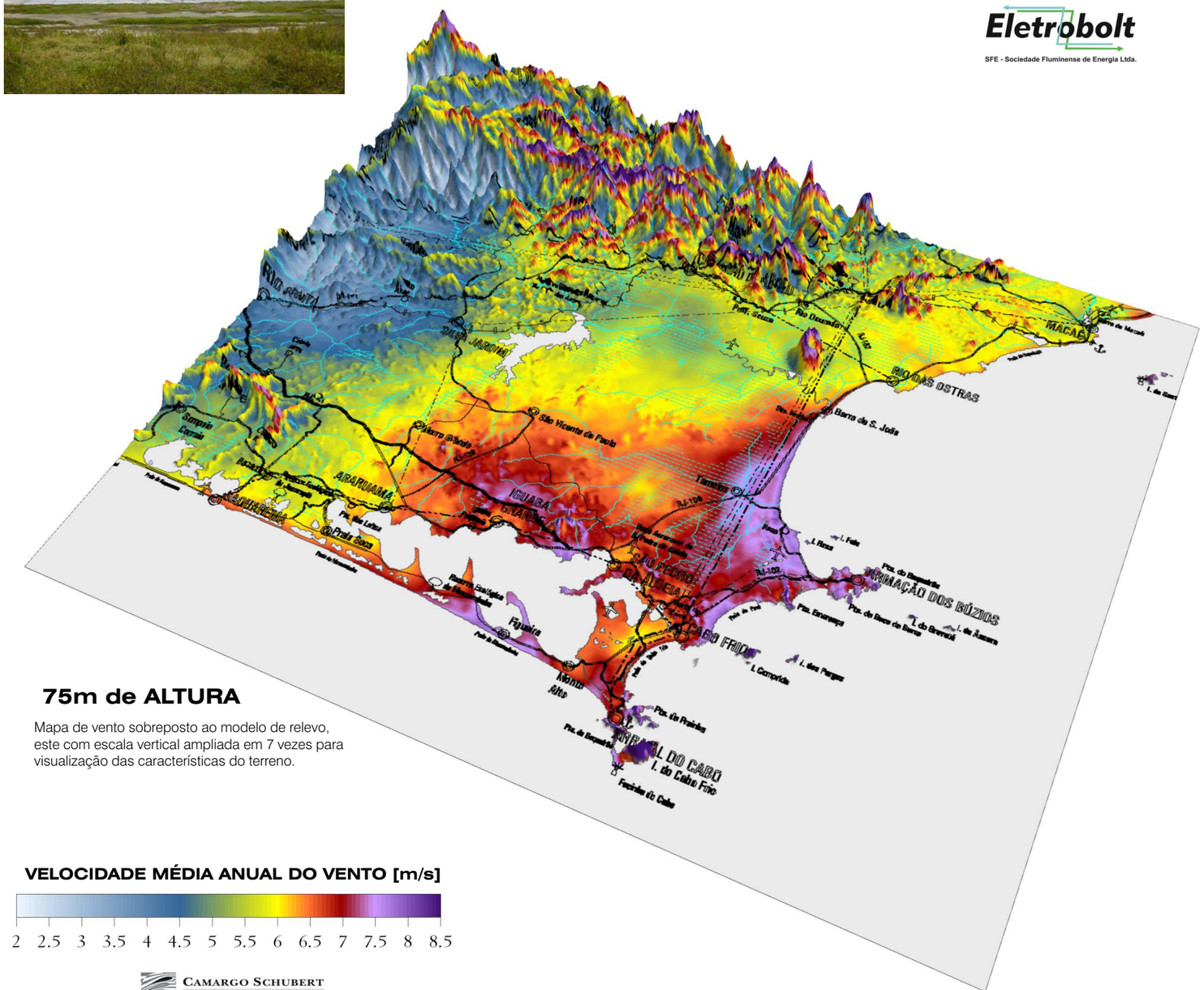
## ESTADO DO RIO DE JANEIRO
## POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.






**75m de ALTURA**

Mapa de vento sobreposto ao modelo de relevo, este com escala vertical ampliada em 7 vezes para visualização das características do terreno.

**VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]**

2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5

CAMARGO SCHUBERT
*Engenharia Eólica*

**Legenda**

*SISTEMA ELÉTRICO*
500 kV
345 kV
230 kV
138 kV
69 kV
34,5 kV
13,8 kV

*LOCALIDADES*
Capital
Sede de município
Sede de distrito
Outras localidades
Torres Anemométricas
Restrições Ambientais Parques, Reservas

*VIAS DE CIRCULAÇÃO*
*Estradas de Rodagem*
Pavimentada (Pista Dupla)
Pavimentada (Pista Simples)
Não Pavimentada
Estradas de Ferro
Metropolitano
Barcas e Aerobarcos

*PONTOS DE REFERÊNCIA*
Porto,Terminal
Aeroporto, Campo de Pouso
Parque, Reserva
Farol
Usina Hidroelétrica, Termoelétrica, Nuclear

*LIMITES*
Estadual

*HIDROGRAFIA*
Curso d'água
Alagado
Lago, Lagos, Laguna
Mar

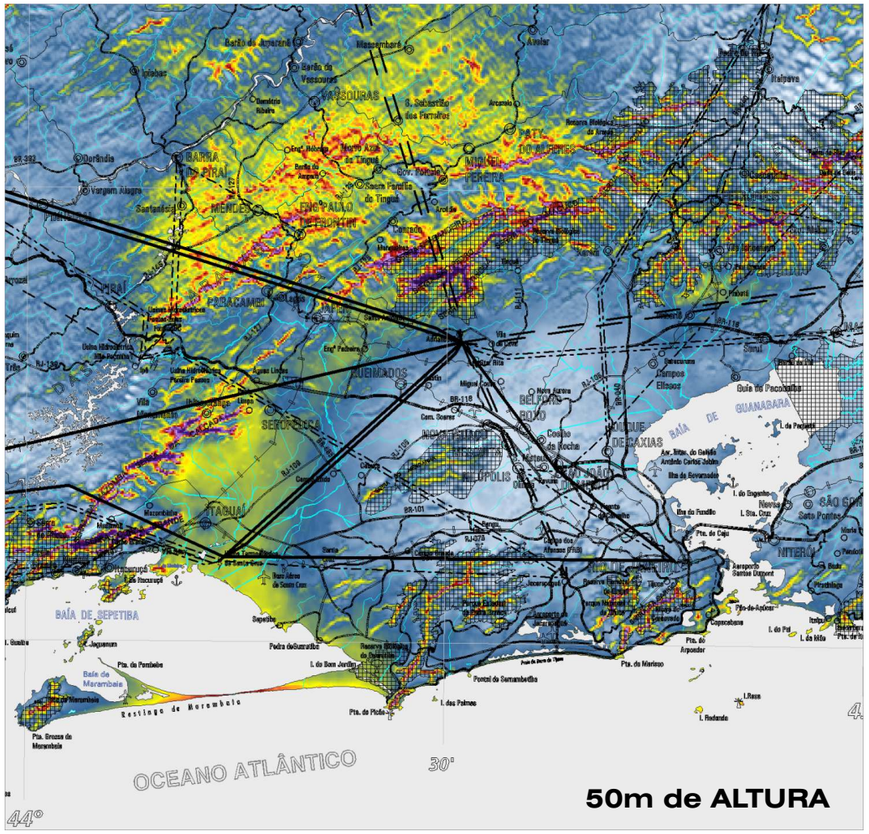
**ESCALA 1 : 700 000**
PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT
0 10 20 30 40 50 km

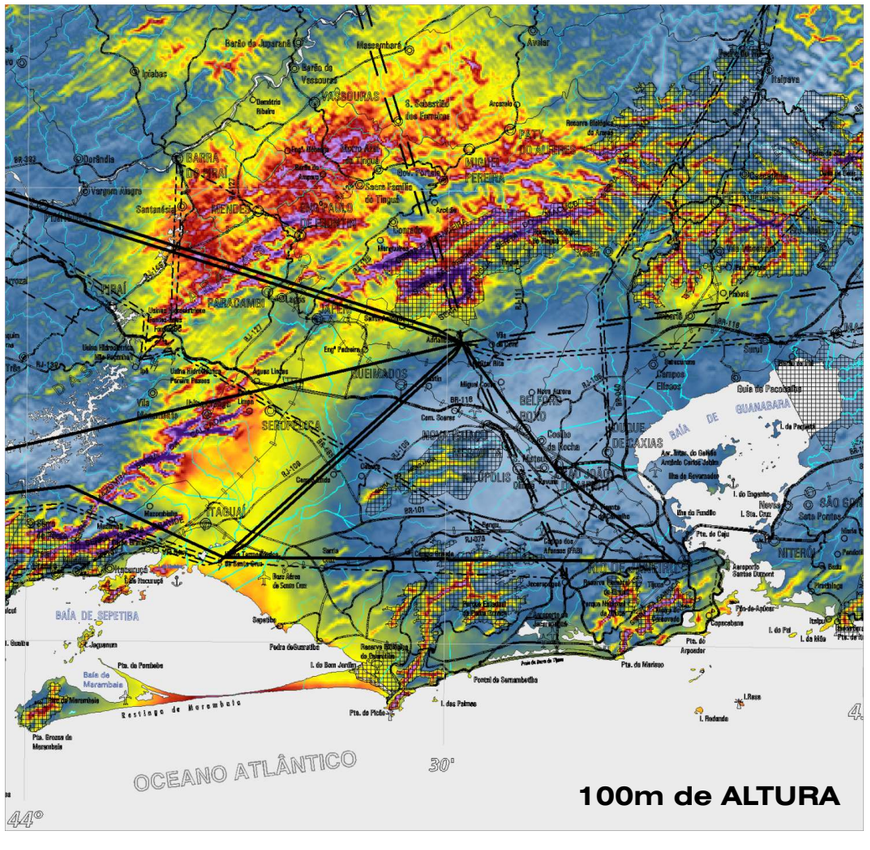
# ÁREA 3: REGIÃO SERRANA, POLÍGONO PIRAÍ-VASSOURAS-PETRÓPOLIS

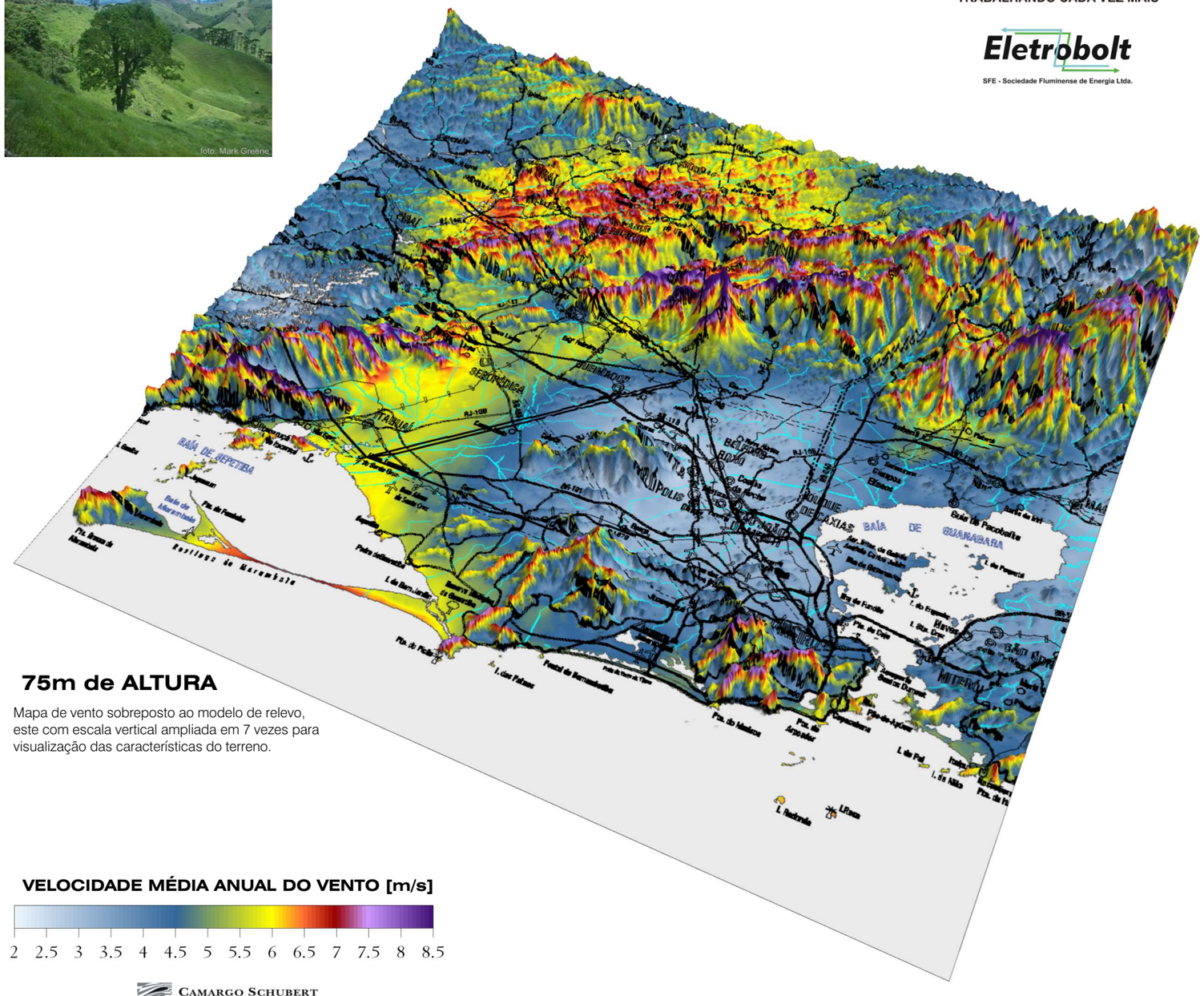
## ESTADO DO RIO DE JANEIRO
## POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.






Mapa de vento sobreposto ao modelo de relevo, este com escala vertical ampliada em 7 vezes para visualização das características do terreno.

**VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO [m/s]**

2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

**Legenda**

*SISTEMA ELÉTRICO*
- 500 kV
- 345 kV
- 230 kV
- 138 kV
- 69 kV
- 34,5 kV
- 13,8 kV

*LOCALIDADES*
- Capital
- Sede de município
- Sede de distrito
- Outras localidades
- Torres Anemométricas

Restrições Ambientais
Parques, Reservas

*VIAS DE CIRCULAÇÃO*
*Estradas de Rodagem*
- Pavimentada (Pista Dupla)
- Pavimentada (Pista Simples)
- Não Pavimentada
- Estradas de Ferro
- Metropolitano
- Barcas e Aerobarcos

*PONTOS DE REFERÊNCIA*
- Porto,Terminal
- Aeroporto, Campo de Pouso
- Parque, Reserva
- Farol
- Usina Hidroelétrica, Termoelétrica, Nuclear

*LIMITES*
- Estadual

*HIDROGRAFIA*
- Curso d'água
- Alagado
- Lago, Lagoa, Laguna
- Mar

ESCALA 1 : 750 000
PROJEÇÃO CÔNICA CONFORME DE LAMBERT
0 10 20 30 40 50 km

## ÁREA 1 - LITORAL NORTE FLUMINENSE: POTENCIAL EÓLICO

| | INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE | | | | | INTEGRAÇÃO CUMULATIVA | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ALTURA [m] | VENTO [m/s] | ÁREA [km$^2$] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | FATOR DE CAPACIDADE | ENERGIA ANUAL [GWh] | VENTO [m/s] | ÁREA [km$^2$] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | ENERGIA ANUAL [GWh] |
| 50 | 5.5-6.0 | 1619 | 2429 | 0.193 | 4106 | ⩾ 5.5 | 3464 | 5196 | 9859 |
| | 6.0-6.5 | 1570 | 2355 | 0.231 | 4759 | ⩾ 6.0 | 1844 | 2767 | 5753 |
| | 6.5-7.0 | 242 | 362 | 0.269 | 854 | ⩾ 6.5 | 275 | 412 | 995 |
| | 7.0-7.5 | 27 | 41 | 0.315 | 112 | ⩾ 7.0 | 33 | 50 | 140 |
| | 7.5-8.0 | 4 | 6 | 0.353 | 20 | ⩾ 7.5 | 6 | 9 | 28 |
| | 8.0-8.5 | 1 | 1 | 0.385 | 5 | ⩾ 8.0 | 2 | 2 | 9 |
| | ⩾ 8.5 | 1 | 1 | 0.434 | 4 | ⩾ 8.5 | 1 | 1 | 4 |
| 75 | 5.5-6.0 | 1071 | 1606 | 0.218 | 3064 | ⩾ 5.5 | 4406 | 6609 | 15821 |
| | 6.0-6.5 | 1815 | 2722 | 0.272 | 6484 | ⩾ 6.0 | 3335 | 5003 | 12756 |
| | 6.5-7.0 | 1398 | 2097 | 0.310 | 5700 | ⩾ 6.5 | 1520 | 2281 | 6273 |
| | 7.0-7.5 | 112 | 167 | 0.352 | 515 | ⩾ 7.0 | 122 | 184 | 573 |
| | 7.5-8.0 | 9 | 13 | 0.394 | 46 | ⩾ 7.5 | 11 | 16 | 57 |
| | 8.0-8.5 | 1 | 2 | 0.422 | 7 | ⩾ 8.0 | 2 | 3 | 11 |
| | ⩾ 8.5 | 1 | 1 | 0.464 | 4 | ⩾ 8.5 | 1 | 1 | 4 |
| 100 | 5.5-6.0 | 1024 | 1535 | 0.221 | 2977 | ⩾ 5.5 | 4932 | 7398 | 18816 |
| | 6.0-6.5 | 1008 | 1513 | 0.267 | 3540 | ⩾ 6.0 | 3908 | 5862 | 15839 |
| | 6.5-7.0 | 2285 | 3428 | 0.315 | 9463 | ⩾ 6.5 | 2900 | 4350 | 12300 |
| | 7.0-7.5 | 594 | 892 | 0.350 | 2730 | ⩾ 7.0 | 615 | 922 | 2837 |
| | 7.5-8.0 | 18 | 28 | 0.395 | 96 | ⩾ 7.5 | 20 | 31 | 107 |
| | 8.0-8.5 | 1 | 2 | 0.421 | 8 | ⩾ 8.0 | 2 | 3 | 11 |
| | ⩾ 8.5 | 1 | 1 | 0.459 | 4 | ⩾ 8.5 | 1 | 1 | 4 |

Tab. 5.2.1- Potencial Eólico Estimado para a Área 1.

## ÁREA 2 - CABO FRIO E BÚZIOS, REGIÃO DOS LAGOS: POTENCIAL EÓLICO

| | INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE | | | | | INTEGRAÇÃO CUMULATIVA | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ALTURA [m] | VENTO [m/s] | ÁREA [km$^2$] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | FATOR DE CAPACIDADE | ENERGIA ANUAL [GWh] | VENTO [m/s] | ÁREA [km$^2$] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | ENERGIA ANUAL [GWh] |
| 50 | 5.5-6.0 | 762 | 1143 | 0.193 | 1936 | ⩾ 5.5 | 1649 | 2473 | 4994 |
| | 6.0-6.5 | 468 | 702 | 0.235 | 1445 | ⩾ 6.0 | 886 | 1329 | 3058 |
| | 6.5-7.0 | 283 | 425 | 0.276 | 1028 | ⩾ 6.5 | 418 | 627 | 1613 |
| | 7.0-7.5 | 93 | 140 | 0.312 | 382 | ⩾ 7.0 | 135 | 203 | 584 |
| | 7.5-8.0 | 22 | 33 | 0.341 | 100 | ⩾ 7.5 | 42 | 63 | 202 |
| | 8.0-8.5 | 11 | 17 | 0.376 | 56 | ⩾ 8.0 | 20 | 30 | 103 |
| | ⩾ 8.5 | 8 | 13 | 0.423 | 47 | ⩾ 8.5 | 8 | 13 | 47 |
| 75 | 5.5-6.0 | 1014 | 1521 | 0.223 | 2975 | ⩾ 5.5 | 2581 | 3871 | 9268 |
| | 6.0-6.5 | 696 | 1044 | 0.267 | 2445 | ⩾ 6.0 | 1566 | 2349 | 6293 |
| | 6.5-7.0 | 462 | 693 | 0.311 | 1885 | ⩾ 6.5 | 871 | 1306 | 3848 |
| | 7.0-7.5 | 289 | 434 | 0.353 | 1342 | ⩾ 7.0 | 409 | 613 | 1963 |
| | 7.5-8.0 | 89 | 134 | 0.385 | 452 | ⩾ 7.5 | 119 | 179 | 621 |
| | 8.0-8.5 | 18 | 27 | 0.413 | 97 | ⩾ 8.0 | 30 | 45 | 169 |
| | ⩾ 8.5 | 12 | 18 | 0.456 | 72 | ⩾ 8.5 | 12 | 18 | 72 |
| 100 | 5.5-6.0 | 886 | 1329 | 0.225 | 2615 | ⩾ 5.5 | 3015 | 4523 | 11288 |
| | 6.0-6.5 | 928 | 1392 | 0.266 | 3247 | ⩾ 6.0 | 2130 | 3195 | 8673 |
| | 6.5-7.0 | 567 | 851 | 0.313 | 2331 | ⩾ 6.5 | 1202 | 1803 | 5425 |
| | 7.0-7.5 | 385 | 578 | 0.354 | 1792 | ⩾ 7.0 | 634 | 952 | 3095 |
| | 7.5-8.0 | 206 | 308 | 0.391 | 1056 | ⩾ 7.5 | 249 | 374 | 1303 |
| | 8.0-8.5 | 31 | 46 | 0.416 | 168 | ⩾ 8.0 | 44 | 66 | 247 |
| | ⩾ 8.5 | 13 | 20 | 0.454 | 79 | ⩾ 8.5 | 13 | 20 | 79 |

Tab. 5.2.2- Potencial Eólico Estimado para a Área 2.

## ÁREA 3 - REGIÃO SERRANA, POLÍGONO PIRAÍ-VASSOURAS-PETRÓPOLIS: POTENCIAL EÓLICO

| | INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE | | | | | INTEGRAÇÃO CUMULATIVA | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ALTURA [m] | VENTO [m/s] | ÁREA [km$^2$] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | FATOR DE CAPACIDADE | ENERGIA ANUAL [GWh] | VENTO [m/s] | ÁREA [km$^2$] | POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW] | ENERGIA ANUAL [GWh] |
| 50 | **5.5-6.0** | 551 | 827 | 0.196 | 1420 | ⩾ **5.5** | 1127 | 1691 | 3436 |
| | **6.0-6.5** | 286 | 428 | 0.232 | 870 | ⩾ **6.0** | 576 | 864 | 2016 |
| | **6.5-7.0** | 140 | 209 | 0.266 | 488 | ⩾ **6.5** | 290 | 436 | 1145 |
| | **7.0-7.5** | 69 | 103 | 0.297 | 267 | ⩾ **7.0** | 151 | 226 | 657 |
| | **7.5-8.0** | 38 | 56 | 0.328 | 162 | ⩾ **7.5** | 82 | 124 | 390 |
| | **8.0-8.5** | 19 | 29 | 0.358 | 91 | ⩾ **8.0** | 45 | 67 | 228 |
| | ⩾ **8.5** | 26 | 38 | 0.410 | 137 | ⩾ **8.5** | 26 | 38 | 137 |
| 75 | **5.5-6.0** | 946 | 1419 | 0.225 | 2795 | ⩾ **5.5** | 1996 | 2994 | 6848 |
| | **6.0-6.5** | 513 | 770 | 0.261 | 1764 | ⩾ **6.0** | 1050 | 1575 | 4052 |
| | **6.5-7.0** | 284 | 426 | 0.297 | 1106 | ⩾ **6.5** | 537 | 805 | 2289 |
| | **7.0-7.5** | 130 | 195 | 0.328 | 562 | ⩾ **7.0** | 253 | 379 | 1183 |
| | **7.5-8.0** | 59 | 88 | 0.357 | 275 | ⩾ **7.5** | 122 | 184 | 621 |
| | **8.0-8.5** | 31 | 46 | 0.387 | 156 | ⩾ **8.0** | 64 | 96 | 346 |
| | ⩾ **8.5** | 33 | 50 | 0.436 | 190 | ⩾ **8.5** | 33 | 50 | 190 |
| 100 | **5.5-6.0** | 1078 | 1617 | 0.227 | 3220 | ⩾ **5.5** | 2561 | 3842 | 8959 |
| | **6.0-6.5** | 721 | 1081 | 0.263 | 2492 | ⩾ **6.0** | 1484 | 2225 | 5740 |
| | **6.5-7.0** | 404 | 607 | 0.298 | 1584 | ⩾ **6.5** | 763 | 1144 | 3248 |
| | **7.0-7.5** | 203 | 304 | 0.330 | 881 | ⩾ **7.0** | 358 | 538 | 1663 |
| | **7.5-8.0** | 82 | 123 | 0.358 | 387 | ⩾ **7.5** | 156 | 233 | 782 |
| | **8.0-8.5** | 38 | 57 | 0.388 | 194 | ⩾ **8.0** | 73 | 110 | 396 |
| | ⩾ **8.5** | 35 | 53 | 0.435 | 201 | ⩾ **8.5** | 35 | 53 | 201 |

Tab. 5.2.3- Potencial Eólico Estimado para a Área 3.

## 5.3 Aspectos Estratégicos

Atualmente, a energia eólica é a fonte energética com as maiores taxas de crescimento em capacidade geradora, apresentando uma taxa média de crescimento anual de 32% nos últimos 5 ano.[6] Em 2001, foi atingida a impressionante taxa de 38%. No ano de 2002, foram instalados mais de 6.7 GW, resultando num crescimento anual de 27% e numa capacidade instalada mundial que ultrapassa 31 GW.[6]

Este crescimento deve-se à contínua queda verificada no custo da geração eólica nos últimos anos. Estudos realizados pela Agência Internacional de Energia *(International Energy Agency)* indicam que cada vez que a capacidade mundial instalada duplica, ocorre uma redução de 18% no preço da energia.[27] O preço final de geração eólica depende dos custos de instalação, dos custos correntes, tais como seguro e manutenção, do custo de capital e da velocidade do vento na área do empreendimento. À medida que as turbinas eólicas crescem em tamanho e capacidade, e as usinas operam com um maior número de máquinas, seus preços e custos operacionais decrescem. Hoje, as usinas eólicas com menores custos de instalação, em áreas de ventos intensos, tém um custo de geração competitivo com todas as fontes fósseis. Os cenários atuais indicam que até mesmo as usinas *offshore* devem ser plenamente competitivas com o gás, pelo ano de 2010.[27]

Além disso, enquanto o custo dos combustíveis fósseis tende a aumentar a longo prazo, estando ainda sujeito às inseguranças dos mercados e políticas internacionais, a energia eólica, ao contrário das fontes de energia não renováveis, é uma fonte segura, a custos fixos, e disponível localmente, não havendo riscos de flutuações de preços de sua matéria prima, o vento.[27]

Estudos realizadas na América do Norte e na Europa, indicam que se a capacidade eólica global continuar a dobrar a cada 3 anos, mantendo-se as mesmas tendências de custo, espera-se que haja uma redução de 30% nos custos da energia eólica pelo ano de 2006.[27] Adicionalmente, o desenvolvimento continuado dos sistemas de controle, de pás eólicas com maior desempenho aerodinâmico, e as contínuas evoluções tecnológicas em todos os níveis, contribuirão para melhorar ainda mais a eficiência dos aerogeradores.

A indústria eólica gera também externalidades importantes, como a criação de empregos nos ciclos de fabricação, instalação, operação e manutenção, o desenvolvimento econômico e a melhoria da qualidade de vida.

Os custos decrescentes, a modularidade, a rapidez de instalação, a descentralização da geração, a geração de empregos, a não agressão ao meio ambiente e a co-utilização das terras ocupadas por usinas eólicas com outras atividades como a pecuária e a agricultura, qualificam a energia do vento como a fonte energética do futuro.

O Estado do Rio de Janeiro possui áreas bastante propícias para o aproveitamento da energia dos ventos. Este potencial inesgotável poderá alavancar ainda mais o crescimento econômico e a auto-sustentabilidade energética fluminense, gerando energia, empregos, desenvolvimento e qualidade de vida para milhões de pessoas.

# 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] Amarante, O.A.C. do, Schultz, D.J., "Wind Energy Resource Map of the State of Paraná", Brazil. Dewi Magazin, Germany, n. 15, p. 70-75, Aug. 1999.

[2] Eldridge, F. R., "Wind Machines". Van Nostrand, 1980.

[3] Torrey, V., "Wind Catchers, American Windmills of yesterday and tomorrow". The Stephen Geene Press, 1976.

[4] "Wind Market Status", WindPower Monthly News Magazine, Vol. 18, No.3, pp 33-65, March 2002.

[5] Molly, J. P., "Technical Trends in Wind Turbine Development", DEWI Magazin, No. 20, Feb 2002.

[6] "The Windicator", WindPower Monthly News Magazine, Vol. 19, No.4, pp 78, April 2003.

[7] AWS Scientific, Inc., "Wind Resource Assessment Handbook". National Renewable Energy Laboratory. WindPower '96 Training Seminar Edition, Denver, CO, June 23th, 1996.

[8] Obermeier, J. L., Blittersdorf, D., "Quality, Precision and Accuracy of the Maximum #40 Anemometer", presented at the American Wind Energy Association National Conference "WindPower 96" in Denver, Colorado, 23-27 June 1996. Published at AWEA conference proceedings.

[9] Jensen, N.O., "A Note on Wind Generator Interaction". Riso National Laboratory, Report Riso-M-2411, Roskilde, Denmark, 1984.

[10] Frandsen, S., "On the Wind Speed Reduction in the Center of Large Clusters of Wind Turbines". Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, published at European Wind Energy Conference "EWEC 1991" proceedings, Amsterdam, The Netherlands, October 14-18, 1991.

[11] Troen, I., Mortensen, N. G., Petersen, E. L., "Wind Atlas Analysis and Application Program". Risoe National Laboratory. Denmark.

[12] Phillips, G.T. - "A Preliminary User's Guide for the NOABL Objective Analysis Code". DOE/ET/20280-T1, U.S. Department of Energy, July 1979.

[13] Markus, M., Bailey, B., "Survey of Wind Flow Models". National Renewable Energy Laboratory, TAT-5-15208-01, October 1996.

[14] Barnard, J. C., "An Evaluation of Three Models Designed for Siting Wind Turbines in Areas of Complex Terrain". Solar Energy, Vol. 46 No.5 pp 283-294, 1991.

[15] Brower, M., "WindMap™ Version 3.10". Brower & Company. 2001. http://www.browerco.com

[16] do Amarante, O.A.C., Rocha, N.A., Schultz, D., Bittencourt, R. e Sugai, M. "Estabilização Sazonal da Oferta de Energia Através da Complementaridade Entre os Regimes Hidrológico e Eólico". XV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Grupo de Planejamento de Sistemas Elétricos. Foz do Iguaçu, PR - 17-22 Out.1999.

[17] Rohatgi, J. S., Nelson, V., "Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power". Alternative Energy Institute - West Texas A&M University, 1994.

[18] do Amarante, O. A. C., "Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará". SEINFRA/CE. 2001.

[19] do Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., "Atlas do Potencial Eólico Brasileiro". MME /ELETROBRÁS/CEPEL. 2001.

[20] do Amarante, O. A. C., da Silva, F. J. L., "Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia". Camargo Schubert, COELBA/Iberdrola Empreendimentos do Brasil. 2001.

[21] do Amarante, O. A. C., da Silva, F. J. L., Custódio, R. S., Gravino, N., "Atlas Eólico do Rio Grande do Sul". SEMC/RS. Agosto 2002.

[22] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. http://www.aneel.gov.br.

[23] "Anuário Estatístico". CIDE - Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro.

[24] "BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2000" - Ano Base 1999. DNDE Secretaria de Energia, Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2000.

[25] "Censo Demográfico 2000". IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

[26] "Atlas das Unidades de Conservação da Natureza do Estado do Rio de Janeiro". São Paulo. Metalivros, 2001

[27] Milborrow, D., "Size Matters - Getting Bigger and Cheaper". WindPower Monthly News Magazine. January 2003. pp 35-38.

[28] IEA - International Energy Agency. http:\\www.iea.org.

[29] EWEA - European Wind Energy Association. http://www.ewea.org.

[30] AWEA - American Wind Energy Association. http://www.awea.org.

[31] Danish Wind Energy Industry Association. http://www.windpower.org.

[32] Stull, R. B., "An Introduction to Boundary Layer Meteorology". Atmospheric Sciences Library. Kluwer Academic Publishers, 1991.

[33] Brower, M., Bailey, B., Zack, J., "Micrositing Using the MesoMap System". American Wind Energy Association, 2002. http://www.truewind.com

[34] "U.S. Standard Atmosphere", National Oceanic and Atmospheric Administration and National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1962.

[35] "Energia Eólica", DEWI, Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven, 1998.

[36] Programa ELEMAG. Observatório Nacional-CNPq, Departamento de Geofísica, Rio de Janeiro, RJ.

[37] Legates, D.R., Willmott, C.J. 1992. "Monthly Average Surface Air Temperature and Precipitation". Digital Raster Data on a 30 minute Cartesian Orthonormal Geodetic (lat/long) 360x720grid. In: Global Ecosystems Database Version 2.0. Boulder, CO: NOAA National Geophysical Data Center. Forty-eight independent and four derived single attribute spatial layers. 47,846,439 bytes in 194 files. [first published in 1989].

[38] "Relatórios Anuais". SIESE - Sistema de Informações Empresariais do Setor de Energia Elétrica. ELETROBRÁS.

[39] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, http://www.inmet.gov.br.

# ANEXO I - METODOLOGIA

## I.1 PROCESSO DE MAPEAMENTO

O presente mapeamento do potencial eólico do Estado do Rio de Janeiro foi realizado a partir de uma rede de medições anemométricas e de um modelo numérico de simulação da camada-limite atmosférica, calculado sobre modelos digitais de terreno na resolução horizontal de 200m x 200m. O modelo numérico aplicado foi o MesoMap,[33] neste caso, constituído por modelamento de mesoescala (MASS) na resolução horizontal de 3.6km x 3.6km, e posterior interpolação para a resolução final por modelamento tridimensional de camada-limite (WindMap).[15]

### I.1.1 O Sistema MesoMAP

O MesoMap é um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, bases de dados meteorológicos e geográficos, redes de computadores e sistemas de armazenamento. O sistema foi desenvolvido nos Estados Unidos pela TrueWind Solutions com suporte do *NYSERDA (New York State Energy Research and Development Authority) e DoE (US Department of Energy)*. Além do projeto inicial de mapeamento eólico do estado de Nova York, o MesoMap tem sido utilizado em projetos similares nas Américas do Norte e Central, Europa e Ásia e foi utilizado para o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.[19]

O MesoMap tem sido continuamente aferido por medições anemométricas em variados regimes de vento e oferece notáveis vantagens sobre métodos tradicionais (e.g. WAsP). Primeiro, porque obtém representatividade para grandes áreas continentais sem a necessidade de dados anemométricos de superfície efetivamente medidos - fator importante para regiões onde medições consistentes e confiáveis são raras. Segundo, por modelar importantes fenômenos meteorológicos não considerados em modelos mais simplificados de escoamento de ventos (por exemplo, WAsP - Jackson-Hunt,[11] ou WindMap - NOABL).[12, 15] Estes fenômenos incluem, entre outros, ondas orográficas, ventos convectivos, brisas marinhas e lacustres e ventos térmicos descendentes de montanhas. Finalmente, o MesoMap simula diretamente os regimes de vento de longo prazo, eliminando a incerteza intrínseca de ajustes climatológicos baseados em correlações de registros de vento de curto e longo prazo, obtidos por medições em superfície.

O Modelo de Mesoescala: O núcleo do sistema MesoMap é o MASS *(Mesoscale Atmospheric Simulation System)*,[33] que é um modelo numérico de mesoescala similar aos modelos de previsão do tempo ETA e MM5, incorporando os princípios físicos fundamentais da dinâmica atmosférica, que incluem:

- princípios de conservação de massa, *momentum* e energia;
- fluxos de calor e mudanças de fase do vapor d'água;
- módulo de energia cinética turbulenta, que simula os efeitos viscosos e de estabilidade térmica sobre o gradiente vertical de vento.

Como é um modelo atmosférico dinâmico, o MASS exige grandes demandas computacionais, que requerem o uso de supercomputadores ou redes de estações de trabalho com múltiplos processadores em paralelo. Adicionalmente, o MASS também está acoplado a dois módulos de cálculo: o *ForeWind*, um modelo dinâmico de camada-limite viscosa, e o WindMap,[15] que é um modelo de simulação tridimensional de escoamento não-divergente (conservação de massa), com interface para dados geográficos de geoprocessamento (SIG) de alta resolução. Para áreas e casos específicos, um destes dois módulos é escolhido para aumentar a resolução espacial das simulações do MASS.

Dados de Entrada: Um amplo conjunto de dados meteorológicos e geográficos é utilizado como entrada para o MASS. Os principais dados geográficos de entrada são a topografia, uso do solo e índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). Os principais dados de entrada meteorológicos foram os provenientes de reanálises, radiossondagens e temperaturas sobre a terra e oceanos. Entre estes, tém maior importância as reanálises, que são constituídas de um banco de dados em malha geográfica global. No modelamento deste estudo foi utilizado o banco de dados de reanálises produzido pelo *US National Center for Atmospheric Research (NCAR)*. Estes dados contêm seqüências de parâmetros meteorológicos dos principais níveis de toda a atmosfera terrestre, em intervalos de 6 horas e resolução de 200km x 200km. Em conjunto com dados existentes de radiossondas e temperaturas da superfície terrestre, os dados de reanálises estabelecem as condições de contorno iniciais, bem como, condições de contorno laterais atualizadas para a progressão das simulações do MASS. Entretanto, o modelo determina por si só a evolução das condições meteorológicas dentro da região em estudo, com base nas interações entre os distintos elementos da atmosfera e entre a atmosfera e a superfície terrestre.

Como os dados de reanálises são estabelecidos em uma malha com resolução horizontal relativamente baixa, de 200km, o sistema MesoMap precisa ser rodado de forma sucessiva em áreas que são subdivididas em mosaicos de resolução gradualmente maior, onde cada malha utiliza como dados de entrada os parâmetros da respectiva região anterior, até que a resolução desejada seja atingida.

### I.1.2 O Modelo WindMap

A partir dos modelos digitais de terreno (relevo e rugosidade), dos dados das medições anemométricas e do resultado do modelamento de mesoescala MASS, as velocidades médias e direções de vento são calculadas para a resolução final pelo software WindMap.[15]

Desenvolvimento recente dos métodos baseados na equação da continuidade (conservação de massa ou escoamento não-divergente), originários do *NOABL (Numerical Objective Analysis of Boundary Layer)*,[12] o WindMap utiliza o método dos elementos finitos para calcular o campo de velocidade do escoamento em todo o domínio de cálculo, que constitui-se de uma malha tridimensional de pontos sobre o terreno. O grid (malha tridimensional de pontos de cálculo) é gerado utilizando-se um sistema de coordenadas conformes ao terreno e que permite um maior refinamento da malha próximo à superfície do mesmo.

Juntamente com os dados efetivamente medidos nas torres anemométricas, os sumários estatísticos das simulações MASS compõem as condições de contorno e dados de inicialização, constituindo-se de estatísticas por direção numa malha regular de 3.6km x 3.6km, para distintos níveis de altura sobre o terreno (10m, 25m, 50m, 75m, 100m, 200m e 500m). A partir de um campo inicial de velocidades de vento, a condição de continuidade é satisfeita, de forma iterativa, pela solução do sistema de equações diferenciais parciais, até que o valor da divergência do campo de velocidades esteja abaixo de um certo nível de tolerância. O modelamento de ventos pela formulação da equação da continuidade não resolve as equações fundamentais que determinam a influência da estratificação térmica da atmosfera no escoamento; entretanto, o WindMap contém ferramentas que reproduzem estes efeitos, considerando altura de camada-limite, perfil logarítmico de velocidade vertical e características de estabilidade térmica da atmosfera baseadas na *Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov*.[32] No modo de otimização, um algoritmo iterativo converge (em termos do mínimo erro quadrático médio) o valor da razão de estabilidade térmica vertical de atmosfera, para os valores correspondentes das condições de contorno (estações anemométricas e resultados do MASS). O WindMap permite ainda o uso de um Modelo de Correlação para separar áreas com regimes distintos de vento, por exemplo, áreas costeiras sujeitas às brisas marinhas.

O processo de cálculo é realizado por elementos finitos, em um domínio tridimensional, conforme Figura I.1. O terreno é representado por uma malha regular de m elementos no sentido N-S, n elementos no sentido L-O. No sentido vertical são definidos w elementos, e o espaçamento vertical entre nós da malha pode ter variação logarítmica ou geométrica, de forma a concentrar mais elementos na proximidade da superfície do solo, onde ocorrem os gradientes mais significativos.

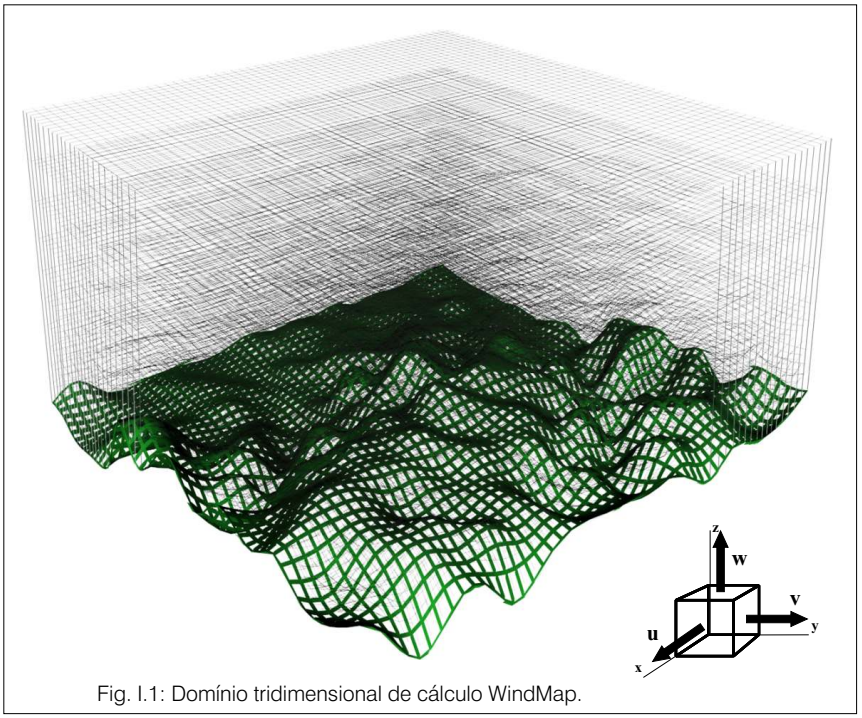


Fig. I.1: Domínio tridimensional de cálculo WindMap.

O resultado do cálculo é um campo de velocidades não-divergente, ou seja, que satisfaz a equação da continuidade, ou conservação de massa, conforme a equação diferencial

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Supondo-se uma condição inicial de campo de escoamento divergente definida localmente em um dado elemento pelas componentes $u_0$, $v_0$, $w_0$. As componentes ajustadas de velocidade não-divergente podem ser definidas como

$$u = u_o + \bar{u} \qquad v = v_o + \bar{v} \qquad w = w_o + \bar{w}$$

onde $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$, definem a correção necessária para eliminar a divergência local do escoamento, e são representadas respectivamente por

$$\bar{u} = \tau_h + \frac{\partial \phi}{\partial x} \qquad \bar{v} = \tau_h + \frac{\partial \phi}{\partial y} \qquad \bar{w} = \tau_v + \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

O potencial de velocidade de perturbação $\phi$ é resultante das influências do terreno no campo de escoamento, bem como de eventuais erros introduzidos nas condições de inicialização do modelo. Os coeficientes $\tau_h$ e $\tau_v$ modelam o desvio entre as condições de estabilidade térmica vertical *real e neutra* da atmosfera. Para

$$\tau_h = \tau_v = \text{constante}$$

as velocidades de perturbação adicionam uma correção irrotacional ao campo de escoamento, e assim, a vorticidade inicialmente presente no campo de escoamento é eliminada. A determinação do potencial de velocidade é realizada a partir da equação da continuidade, forçando o escoamento a ser não-divergente. Maiores detalhes sobre os algoritmos e métodos de solução adotados no modelo NOABL/WindMap são apresentados na Referência 12.

O perfil de velocidade vertical do vento pode ser aproximado pela Lei Logarítmica segundo a relação [32]

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)$$

onde *u(z)* é a velocidade do vento na altura *z*, $z_o$ é a rugosidade do terreno, $\kappa \cong 0.4$ é a constante de *Von Kármán* e $u_*$ é a *velocidade de atrito*. A expressão anterior leva em consideração apenas a influência da rugosidade no perfil de velocidade, negligenciando o efeito da estratificação térmica da atmosfera e, portanto, desvios significativos podem ocorrer em relação ao perfil de velocidade real da atmosfera.

A *Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov* descreve um perfil mais geral da velocidade vertical, levando em consideração os efeitos da rugosidade e da estabilidade térmica, expressando-se matematicamente por [32]

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa}\left[\ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \Psi\left(\frac{z}{L}\right)\right]$$

onde $\Psi$ é uma função empírica da estratificação térmica da atmosfera (Businger, 1973; Dyer, 1974) e *L* é o comprimento de estabilidade de *Obukhov*. O software *WindMap™* realiza, através da escolha de diferentes valores de *L*, a simulação das condições de atmosfera neutra, instável e estável. A referência [32] apresenta as funções de similaridade ($\Psi(\zeta), \zeta = (z/L)$) para as diferentes condições de estabilidade atmosférica.

No Anexo II são apresentadas algumas fórmulas úteis para o cálculo do perfil de velocidade vertical na camada-limite atmosférica.

Nos cálculos do presente mapeamento, os parâmetros de estabilidade térmica vertical da atmosfera foram estimados pelos resultados do modelo de mesoescala e dados anemométricos medidos.

### I.1.3 Resultados do Mapeamento

O modelamento de mesoescala no MASS foi realizado para todo o território do Estado do Rio de Janeiro, com resolução horizontal de 3.6 km, permitindo a simulação de mecanismos tais como brisas marinhas, descolamento de escoamento em relevos complexos, brisas montanha-vale, entre outros.

Os mapas de potencial eólico foram calculados a partir de simulações produzidas pelo MesoMap para 360 dias, extraídos aleatoriamente de um período de 15 anos, de forma a considerar cada mês e estação do ano de forma representativa. A interpolação para a resolução final foi realizada pelo WindMap, utilizando-se modelos digitais de terreno e rugosidade, desenvolvidos em resolução horizontal de 200m x 200m, a partir de cartas topográficas vetorizadas, imagens de satélite, modelos de vegetação e uso do solo e amostragens em campo.

Os principais resultados da simulação são as velocidades médias anuais e sazonais, calculadas a 50m, 75m e 100m de altura sobre o terreno, rosas-dos-ventos, regimes diurnos e parâmetros das distribuições estatísticas de vento. Estes resultados são apresentados em mapas temáticos para todo o território do Estado do Rio de Janeiro, conforme pode ser visto no Capítulo 4.

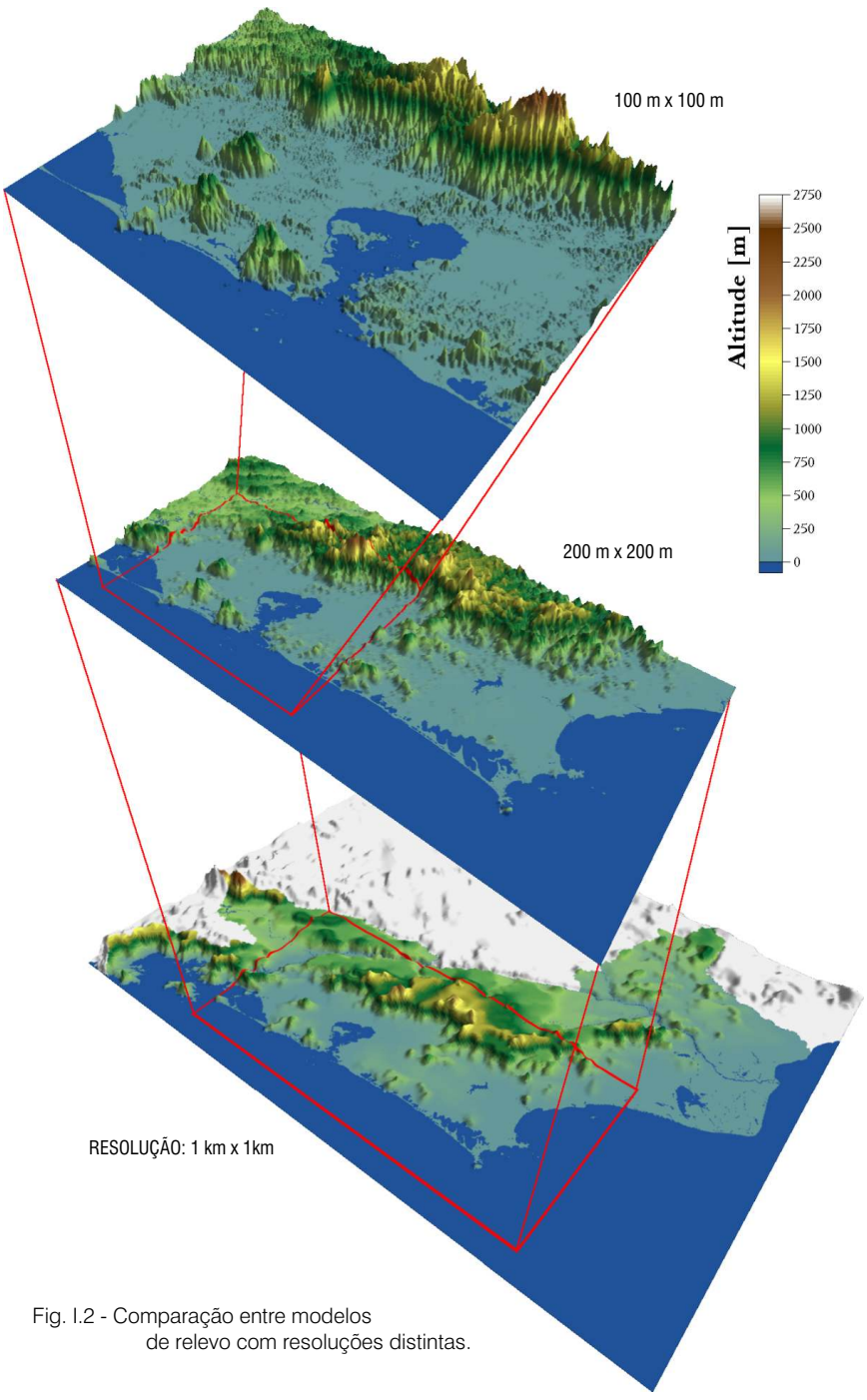



Fig. I.2 - Comparação entre modelos de relevo com resoluções distintas.

No presente mapeamento, os resultados apresentam as variáveis médias obtidas com uma malha de 200m x 200m. Apesar da relativa alta resolução, desvios significativos em torno das médias podem ocorrer, devido às características locais de relevo, rugosidade (subescala de relevo e rugosidade) e eventuais obstáculos, uma vez que o vento é fortemente influenciado por estas condições locais.

Como exemplo, na Figura I.2 é apresentada uma comparação entre modelos de relevo do Estado do Rio de Janeiro com resoluções distintas. O modelo com resolução horizontal de 1km x 1km corresponde à base de dados globais de relevo da *United States Geological Survey (USGS)* conhecida como GTOPO30. Os modelos em resolução de 100m e 200m (utilizado no presente mapeamento) foram desenvolvidos a partir de Cartas IBGE 1 : 50 000 e apresentam um maior detalhamento da topografia fluminense.

## I.1.4 Efeitos de Subescala

Como todo método numérico de simulação, o método não é sensível às variáveis cujas dimensões características (escalas espaciais ou temporais) sejam inferiores ao tamanho da malha de cálculo utilizada (resolução dos modelos de relevo e rugosidade, por exemplo), ou seja, os *efeitos de subgrade* ou *subescala*, não podem ser adequadamente resolvidos, gerando discrepâncias em relação ao valor esperado real da variável em análise.

Filtragem dos Efeitos de Subescala: Ao utilizar-se dados de anemometria na composição do modelo atmosférico (que introduz as condições de contorno e iniciais no modelo numérico), deve-se observar que um anemômetro mede as condições locais de vento, e estas são afetadas pelas condições de relevo, rugosidade e obstáculos, que podem ter grandes variações na escala de metros, e assim, introduzir erros pelo efeito de subescala. Para avaliar e filtrar essas influências de relevo e rugosidade na subescala, o presente Atlas utilizou metodologia desenvolvida pela Camargo-Schubert a partir do software WindMap. Os pontos centrais desta metodologia aplicados ao presente mapeamento são:

(a) filtragem dos efeitos de subescala através da integração de modelos de terreno em alta resolução (50m x 50m ou 100m x 100m), numa área de 10km x 10km no entorno de cada estação, gerando parâmetros médios no modelo atmosférico que sejam compatíveis com o modelo final, na resolução de 200m x 200m. O modelo de alta resolução é resolvido pelo WindMap e integrado através de recursos de geoprocessamento, obtendo-se valores médios locais das variáveis de interesse;
(b) Na solução WindMap sobre o modelo de alta resolução, também são avaliados - de forma iterativa, para cada estação - os parâmetros de estabilidade térmica vertical da atmosfera e a altura da camada-limite, que complementam o modelo de escoamento atmosférico.

## I.2 Medições Anemométricas

O presente mapeamento contou com uma rede qualificada de 5 torres anemométricas, abrangendo um período de até 22 meses de medições. Os dados anemométricos foram cedidos pelas empresas SIIF Énergies do Brasil, Gamesa Energia Brasil e SeaWest do Brasil. As torres foram instaladas em áreas de baixa rugosidade e devidamente afastadas de obstáculos. Foram utilizadas torres de 40 e 61 metros de altura, com registro de velocidade e direção do vento em duas alturas. Os anemômetros foram previamente calibrados em túnel de vento. Foram instaladas 3 torres na região dos lagos e 2 torres no litoral norte fluminense.

Fig. I.3: Torre de monitoramento anemométrico.

Os mapas de velocidades médias do Capítulo 4 apresentam a posição de instalação das torres anemométricas no Estado.

A Figura I.3 mostra uma das torres anemométricas instaladas no Estado (SIIF Énergies do Brasil).

Tratamento e Validação dos dados: Os dados anemométricas foram auditados utilizando rotinas e algoritmos de validação e verificação, de modo a excluirem-se possíveis falhas (e.g. atrito em anemômetros) ou incoerências nos registros. Após os testes de validação, os registros considerados suspeitos ou ausentes foram analisados caso a caso; no caso de redundância de sensores, os valores rejeitados foram extrapolados por análises da correlação serial e/ou da distribuição estatística dos registros correspondentes do outro sensor. Após a análise, os dados foram agrupados e consolidados no modelo atmosférico utilizado no mapeamento do Estado do Rio de Janeiro.

Representatividade Climatológica: O modelamento MesoMap utilizado para este Atlas amostrou dados meteorológicos de reanálise de 15 anos - abrangência que pode ser considerada razoável em relação à sua representatividade em relação à vida útil de usinas eólicas. Por outro lado, os dados anemométricos considerados são relativamente recentes (a primeira estação anemométrica foi instalada em Junho/2001) e cobriram um período pouco superior a um ciclo climatológico mínimo de 12 meses (apenas uma estação abrangeu mais de 1 ano e meio de medições). Assim, tornou-se necessária uma avaliação da representatividade do período medido e a eventual necessidade de ajustes climatológicos. Tal avaliação requer dados consistentes, representativos do longo prazo e com a maior abrangência possível - idealmente da ordem de décadas. Para ajustes climatológicos, tais dados também devem possuir um período de simultaneidade com os dados de curto prazo, permitindo a avaliação das correlações entre as séries medidas.

Entre os registros de longo prazo disponíveis, sobressaíram os dados de medições indiretas de ventos de superfície sobre o oceano (fonte: NASA, NOAA). Tais medições têm sido possíveis desde 1987, através de

sensoreamento remoto a partir de satélites. Os ventos são inferidos por medições de altura e deslocamento das ondas, utilizando algoritmos que tém sido calibrados por medições diretas realizadas em bóias meteorológicas. Tais dados também existem no período simultâneo às medições de referência do presente Atlas, e foram utilizados para ajustes climatológicos. Por situarem-se no litoral, onde a influência oceânica é fortemente atuante no regime de ventos, as séries mensais das 5 estações anemométricas foram ajustadas. Os respectivos coeficientes de correlação das séries mensais de velocidade de vento no ciclo climatológico de Janeiro/2002 a Dezembro/2002, situaram-se entre 0,80 e 0,91 , o que induz a uma aceitável consistência nos ajustes climatológicos. A Figura I.4 mostra a abrangência temporal dos registros anemométricos considerados.

## I.3 Modelos

Os regimes de vento são fortemente influenciados pelas características locais de topografia e rugosidade do terreno. Portanto, a acurácia dos resultados é afetada diretamente pela qualidade dos modelos digitais empregados; além disso, os modelos devem ser georreferenciados, de modo a possibilitar o sincronismo das variáveis de terreno e atmosféricas, realizando-se também, amostragens em campo e comparações com modelos já existentes.

A seguir são apresentados os modelos digitais do Estado do Rio de Janeiro e os principais detalhes na sua elaboração. Aos mapas estão superpostos os principais níveis de informação cartográfica, tais como: principais cidades, estradas, lagoas e rios, sistema elétrico, áreas com restrições ambientais, etc. A base cartográfica foi cedida pelo CIDE (Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro).

### I.3.1 Modelo de Relevo

O Modelo Digital de Relevo foi elaborado a partir de Cartas IBGE vetorizadas, em escala 1:50 000, abrangendo toda a área do Estado, em resolução horizontal de 200m x 200m.

A seguir é apresentado o Modelo Digital de Relevo do Estado do Rio de Janeiro. Como mapa auxiliar, foi desenvolvido também o Modelo de Relevo Sombreado, onde notam-se as principais características do relevo fluminense.

### I.3.2 Modelo de Rugosidade

O Modelo Digital de Rugosidade do Estado do Rio de Janeiro foi elaborado em resolução horizontal de 100m x 100m a partir de: interpretação do mosaico de imagens LANDSAT5, canais 3, 4 e 5, em resolução de 30m; aferições por comparação com o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE) e com o Modelo de Uso do Solo desenvolvido pela USGS, Universidade de Nebraska e o *Joint Research Centre* da Comissão Européia; e aferições por amostragens em campo das áreas mais representativas.

Os modelos foram georreferenciados na Projeção Cônica Conforme de Lambert.

Nos mapas a seguir são apresentados o Mosaico LANDSAT e o Modelo de Rugosidade do Estado do Rio de Janeiro.

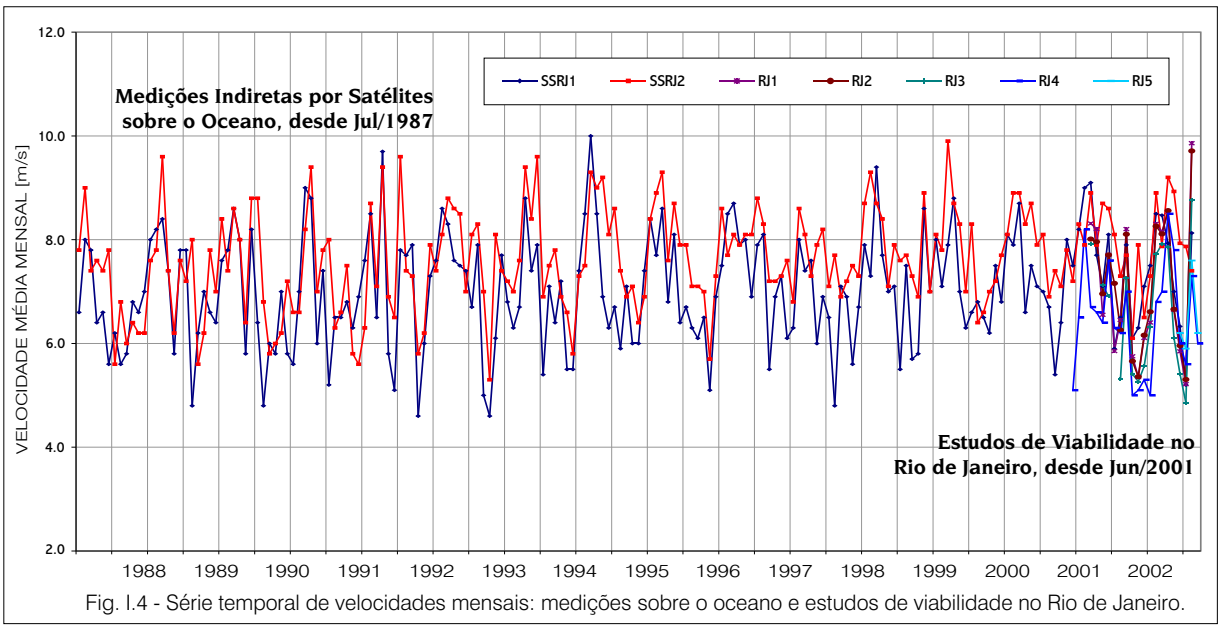



Fig. I.4 - Série temporal de velocidades mensais: medições sobre o oceano e estudos de viabilidade no Rio de Janeiro.

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

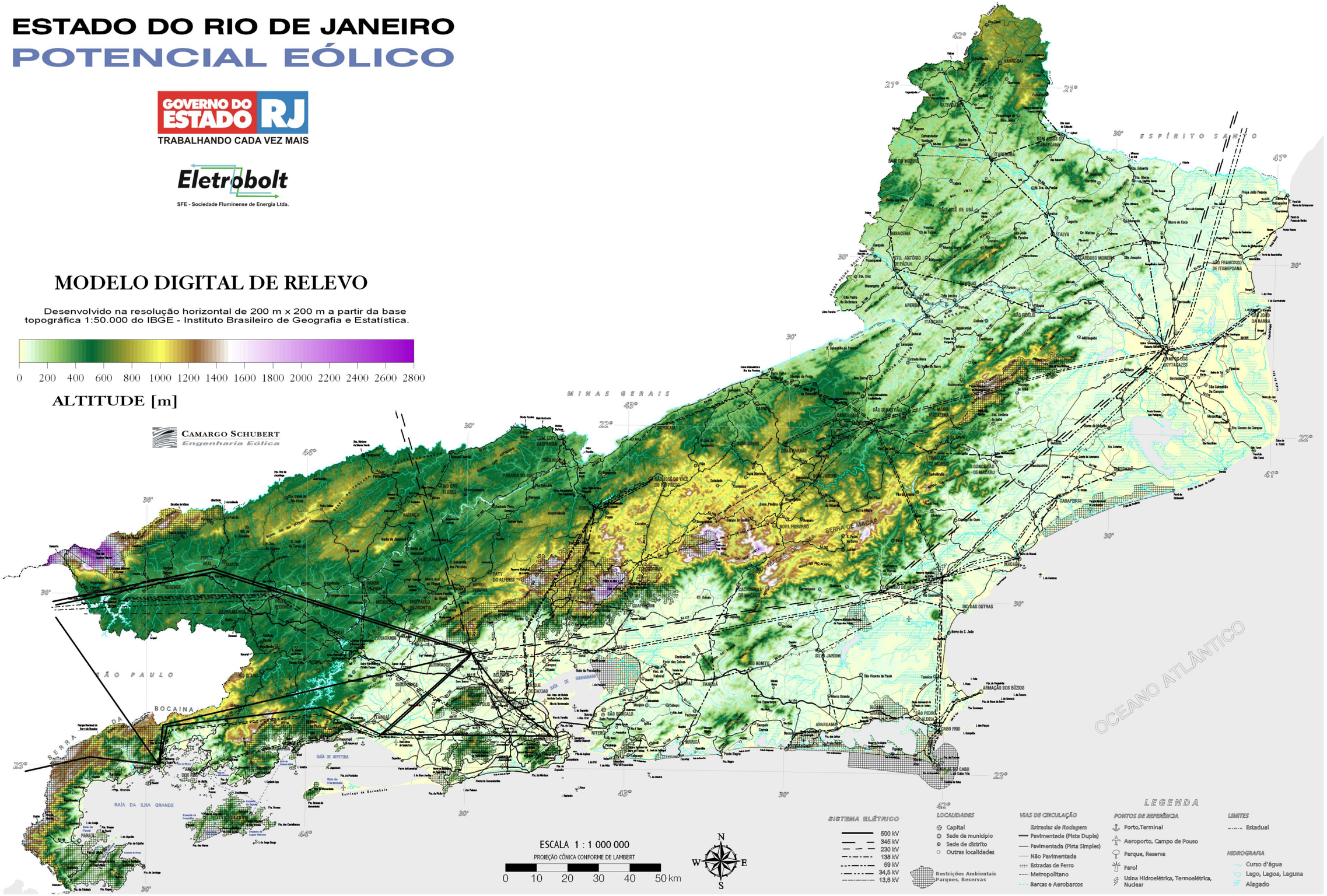
## MODELO DIGITAL DE RELEVO

Desenvolvido na resolução horizontal de 200 m x 200 m a partir da base topográfica 1:50.000 do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600 2800

ALTITUDE [m]

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica


MINAS GERAIS
ESPÍRITO SANTO
SÃO PAULO
OCEANO ATLÂNTICO
BAÍA DA ILHA GRANDE
BAÍA DE SEPETIBA
BAÍA DE GUANABARA
SERRA DA BOCAINA
SERRA DE MACAÉ
SERRA DOS ÓRGÃOS
SERRA DA TINGUÁ
SERRA DA PEDRA BRANCA
SERRA DO MAR
SERRA DA MANTIQUEIRA
SERRA DO IMBÉ
SERRA DO DESENGANO
SERRA DO CALEMBE
SERRA DO GRAMA
SERRA DO CAPIVARI
SERRA DO CAPIM MACIO
SERRA DO CAMPO GRANDE
SERRA DO CAMPO DAS FLORES
SERRA DO CAMPO DAS ANTAS
SERRA DO CAMPO DA BOA VISTA
SERRA DO CAMPO DA BOA ESPERANÇA
SERRA DO CAMPO DA BOA ESPERANÇA
SERRA DO CAMPO DA BOA ESPERANÇ

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

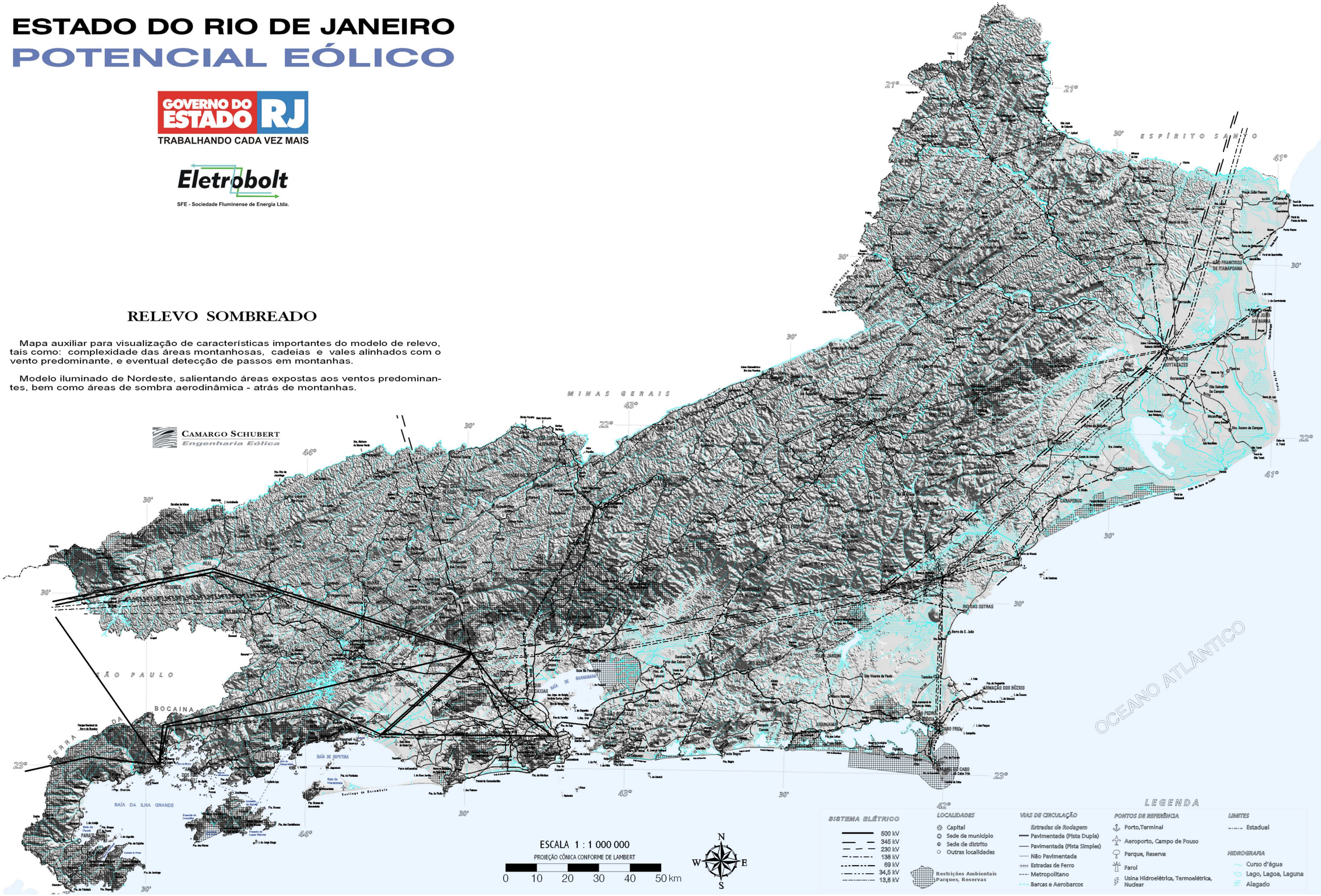
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## RELEVO SOMBREADO

Mapa auxiliar para visualização de características importantes do modelo de relevo, tais como: complexidade das áreas montanhosas, cadeias e vales alinhados com o vento predominante, e eventual detecção de passos em montanhas.

Modelo iluminado de Nordeste, salientando áreas expostas aos ventos predominantes, bem como áreas de sombra aerodinâmica - atrás de montanhas.




RELEVO SOMBREADO

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

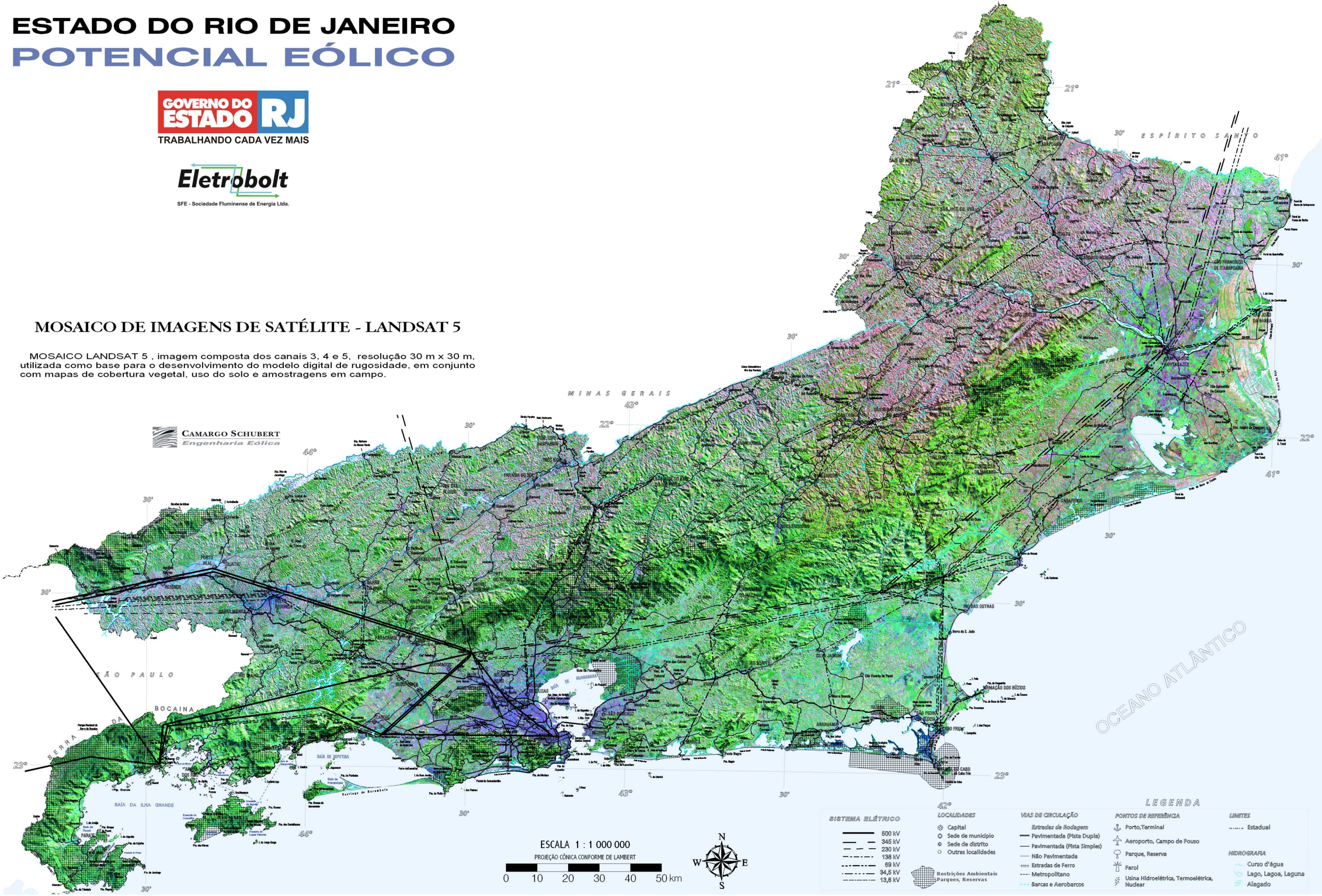
GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

## MOSAICO DE IMAGENS DE SATÉLITE - LANDSAT 5

MOSAICO LANDSAT 5 , imagem composta dos canais 3, 4 e 5, resolução 30 m x 30 m, utilizada como base para o desenvolvimento do modelo digital de rugosidade, em conjunto com mapas de cobertura vegetal, uso do solo e amostragens em campo.

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica




MOSAICO LANDSAT 5

# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# POTENCIAL EÓLICO

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

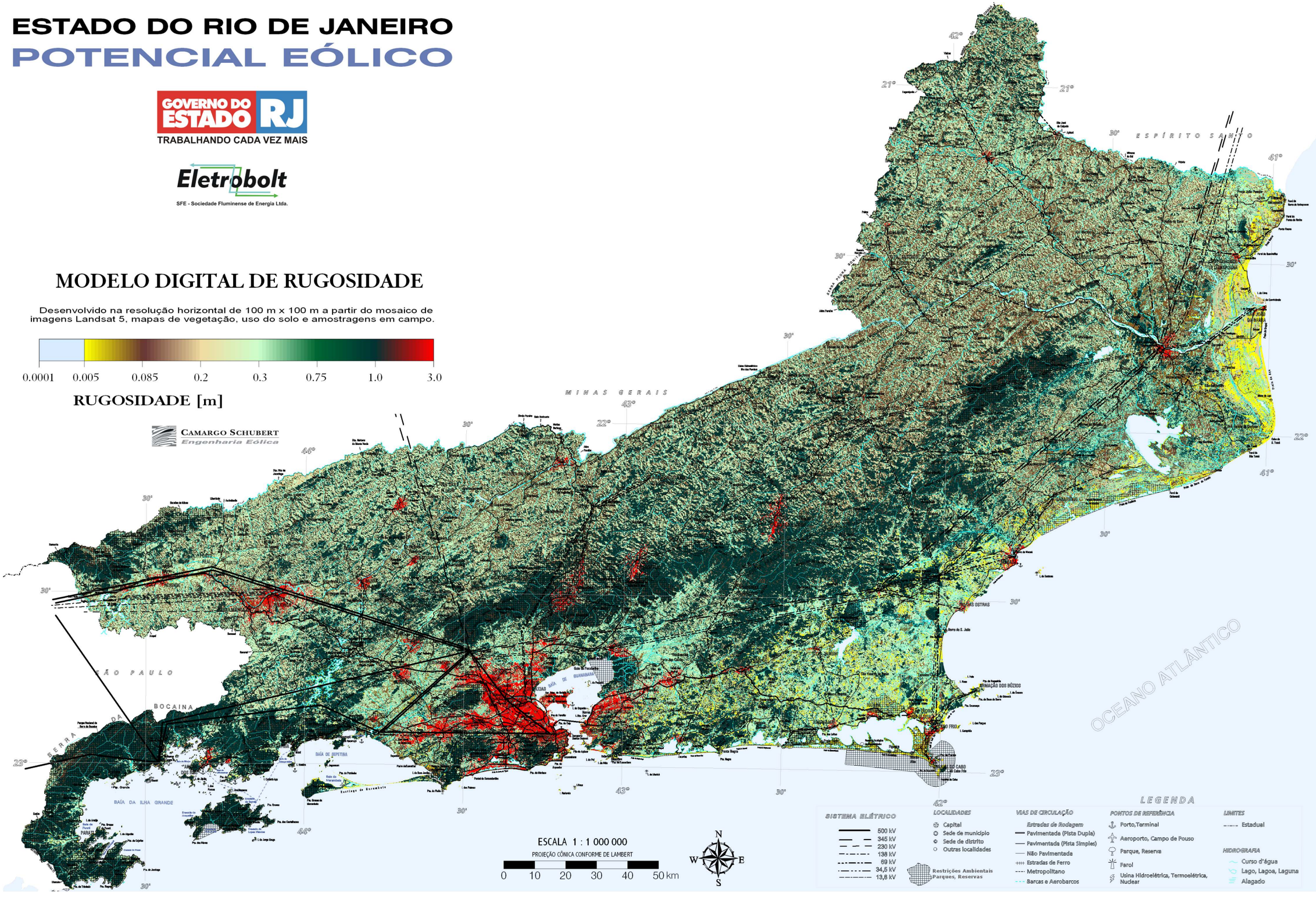
## MODELO DIGITAL DE RUGOSIDADE

Desenvolvido na resolução horizontal de 100 m x 100 m a partir do mosaico de imagens Landsat 5, mapas de vegetação, uso do solo e amostragens em campo.

0.0001 0.005 0.085 0.2 0.3 0.75 1.0 3.0

RUGOSIDADE [m]

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica




MODELO DIGITAL DE RUGOSIDADE

# ANEXO II - FÓRMULAS E MAPAS ÚTEIS

## II.1 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A Distribuição Estatística de Weibull caracteriza-se por dois parâmetros: um de escala (C, em m/s) e outro de forma (k, adimensional). A freqüência de ocorrência de uma velocidade u é representada matematicamente por [17]

$$f(u) = \frac{k}{C}\left(\frac{u}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{C}\right)^{k}}$$

Na Figura II.1 é apresentada a distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. No caso do fator de forma ser igual a 2, deriva-se a Distribuição de Rayleigh, caracterizada apenas pelo fator de escala (C, em m/s), que representa, neste caso, a velocidade média do vento [17]

$$f(u) = \frac{2}{C}\left(\frac{u}{C}\right) e^{-\left(\frac{u}{C}\right)^{2}}$$

Por ser mais geral, a Distribuição de Weibull apresenta melhor aderência às estatísticas de velocidade do vento, uma vez que o fator de forma pode assumir valores bastante superiores a 2. [18]

A função densidade de probabilidade cumulativa, F(u), associada à probabilidade da velocidade do vento ser maior que u, expressa-se por

$$F(u) = \int_{u}^{\infty} f(u)du = e^{-\left(\frac{u}{C}\right)^{k}}$$

O valor médio ou valor esperado da variável aleatória (valor médio da velocidade do vento) é dado por

$$\overline{u} = \int_{0}^{\infty} uf(u)du = C\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$$

onde a Função Gama ($\Gamma$) é definida por

$$\Gamma(z) = \int_{0}^{\infty} t^{z-1}e^{-t}dt$$

A Tabela II.1 apresenta a Função Gama para diversos valores de k.

O Fluxo ou Densidade de Potência Eólica é definido como

$$\overline{E} = \frac{1}{2}\rho\overline{u^3} \qquad (W/m^2)$$

que, expressando-se em termos da distribuição de Weibull, resulta em

$$\overline{E} = \frac{1}{2}\rho C^3\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right) \qquad (W/m^2)$$

onde $\rho$ é a densidade do ar. [11]

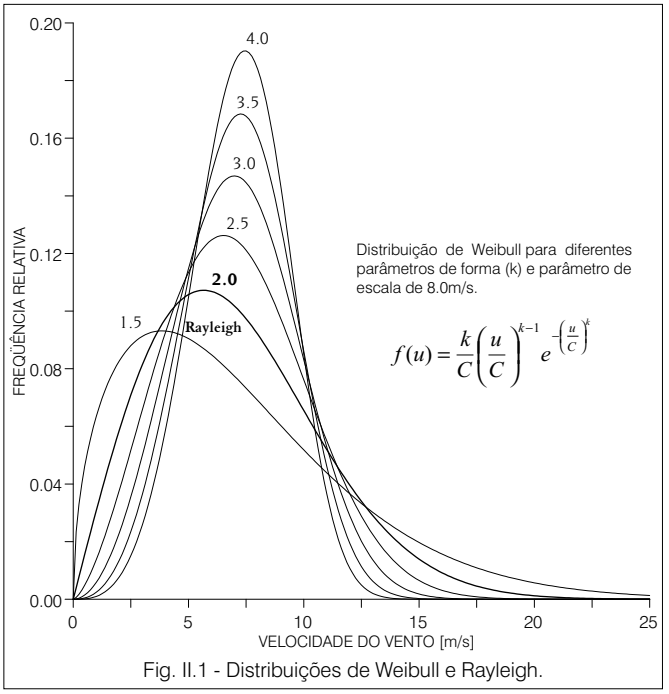



Fig. II.1 - Distribuições de Weibull e Rayleigh.

A Tabela II.2 apresenta a correspondência entre o fluxo de potência eólica e a velocidade média do vento, para diferentes fatores de forma de Weibull.

Tab. II.1 - Função Gama para diferentes valores de k.

| k | $\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$ | k | $\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$ |
|---|---|---|---|
| **1.6** | 0.896574 | **2.5** | 0.887264 |
| **1.7** | 0.892245 | **2.6** | 0.888210 |
| **1.8** | 0.889287 | **2.7** | 0.889283 |
| **1.9** | 0.887363 | **2.8** | 0.890451 |
| **2.0** | 0.886227 | **2.9** | 0.891690 |
| **2.1** | 0.885694 | **3.0** | 0.892980 |
| **2.2** | 0.885625 | **3.5** | 0.899747 |
| **2.3** | 0.885915 | **4.0** | 0.906402 |
| **2.4** | 0.886482 | **5.0** | 0.918169 |

Tab. II.2 - Variação do fluxo de potência eólica com a velocidade média do vento e o fator de forma de Weibull (k).

| FLUXO DE POTÊNCIA EÓLICA [W/m²] | VELOCIDADE DO VENTO [m/s] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Weibull k** | 1.75 | 2.00 | 2.25 | 2.50 | 3.00 | 4.00 |
| **0** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| **100** | 4.2 | 4.4 | 4.6 | 4.7 | 4.9 | 5.1 |
| **150** | 4.8 | 5.1 | 5.2 | 5.4 | 5.6 | 5.9 |
| **200** | 5.3 | 5.6 | 5.8 | 5.9 | 6.2 | 6.4 |
| **250** | 5.7 | 6.0 | 6.2 | 6.4 | 6.6 | 6.9 |
| **300** | 6.1 | 6.4 | 6.6 | 6.8 | 7.1 | 7.4 |
| **350** | 6.4 | 6.7 | 6.9 | 7.1 | 7.4 | 7.7 |
| **400** | 6.7 | 7.0 | 7.3 | 7.5 | 7.8 | 8.1 |
| **450** | 6.9 | 7.3 | 7.5 | 7.8 | 8.1 | 8.4 |
| **500** | 7.2 | 7.5 | 7.8 | 8.0 | 8.4 | 8.7 |
| **600** | 7.6 | 8.0 | 8.3 | 8.5 | 8.9 | 9.3 |
| **700** | 8.0 | 8.4 | 8.7 | 9.0 | 9.3 | 9.8 |
| **800** | 8.4 | 8.8 | 9.1 | 9.4 | 9.8 | 10.2 |
| **900** | 8.7 | 9.2 | 9.5 | 9.8 | 10.2 | 10.6 |
| **1000** | 9.0 | 9.5 | 9.8 | 10.1 | 10.5 | 11.0 |

Nível do Mar, 15 °C ($\rho$= 1.225 kg/m³)

## II.2 Lei Logarítmica e Rugosidade

Em condições neutras de estratificação térmica vertical da atmosfera, o perfil de velocidade vertical do vento na camada-limite pode ser aproximado pela *Lei Logarítmica* segundo a relação

$$u(h) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{z_o}\right)$$

onde *u(h)* é a velocidade do vento na altura *h*, $z_o$ é a *rugosidade* do terreno, $\kappa \cong 0.4$ é a constante de *Von Kármán* e $u_*$ é a *velocidade de atrito*.

Escrevendo-se a Lei Logarítmica para representar a velocidade do vento em duas alturas $h_1$ e $h_2$, e dividindo uma expressão pela outra, pode-se relacionar as velocidades do vento em duas alturas

$$\frac{u(h_2)}{u(h_1)} = \frac{\ln(h_2/z_o)}{\ln(h_1/z_o)}$$

Explicitando-se a *rugosidade* nesta expressão, tem-se

$$z_o = \exp\left(\frac{u(h_2)\ln(h_1) - u(h_1)\ln(h_2)}{u(h_2) - u(h_1)}\right)$$

A velocidade vertical do vento na camada-limite também pode ser expressa em termos da *Lei de Potência* segundo a relação

$$u(h_2) = u(h_1)\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha}$$

onde *u(h)* é a velocidade do vento na altura *h* e $\alpha$ é o *expoente de camada-limite*.

Desta relação, pode-se explicitar o *expoente de camada-limite* em função das velocidades de vento em duas alturas, resultando em

$$\alpha = \ln\left(\frac{u(h_2)}{u(h_1)}\right) \Big/ \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

## II.3 Densidade do Ar

A potência gerada por uma turbina eólica é função direta da densidade do ar que impulsiona o rotor. As curvas de potência fornecidas pelos fabricantes são usualmente dadas para condições padrão da atmosfera ( 15 °C, nível do mar, densidade do ar de 1.225 kg/m$^3$). Portanto, o desempenho das máquinas nas diversas condições de operação, deve ser corrigido para o efeito da variação da densidade com a altitude e a temperatura locais. No Capítulo 4 foi apresentado o mapa de densidade média anual para todo o Estado do Rio de Janeiro, considerando um perfil vertical de temperatura segundo a Atmosfera Padrão ISA + 9 °C,[34] que corresponde à temperatura média anual medida na cidade do Rio de Janeiro (24 °C),[39] calculada sobre o modelo de relevo na resolução de 200m x 200m.

Uma expressão para o cálculo da densidade do ar ($\rho$, em kg/m$^3$) a partir da temperatura do ar ($T$, em °C) e altitude ($z$, em metros) é dada por

$$\rho = \frac{352.98 \times \left[1 - \frac{z}{45271}\right]^{5.2624}}{(273.15 + T)}$$

## II.4 Produção Anual de Energia (PAE) e Fator de Capacidade

A Produção Anual de Energia (PAE) de uma turbina eólica pode ser calculada pela integração das curvas de potência (P(u), em kW) e da freqüência de ocorrência das velocidades de vento (f(u)) [35] (Figura II.2)

$$PAE = 8.76 \times \int_u P(u) f(u)\, du \quad \text{(MWh)}$$

$$PAE \cong 8.76 \times \sum_{i=1}^{N} P(u_i) f(u_i) \Delta u_i \quad \text{(MWh)}$$

O *fator de capacidade* é definido como a razão entre a energia efetivamente gerada e a energia teórica que seria gerada considerando-se a potência nominal ($P_n$) do aerogerador

$$FC = \left(\frac{PAE}{8.76 \times P_n}\right)$$

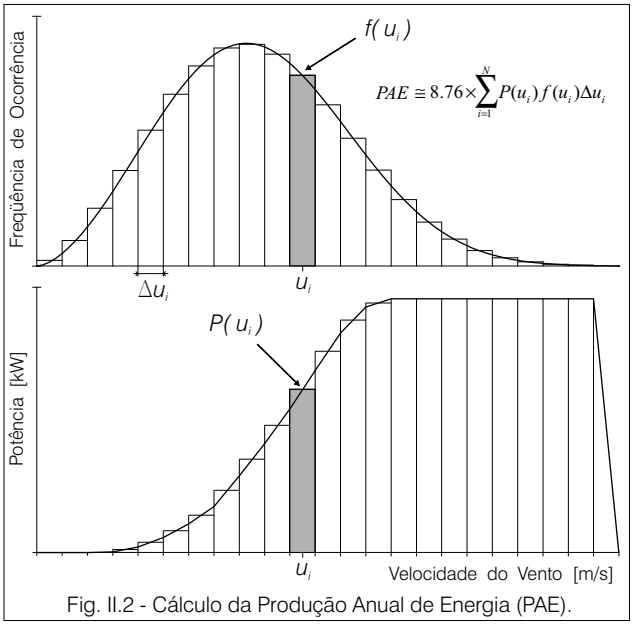
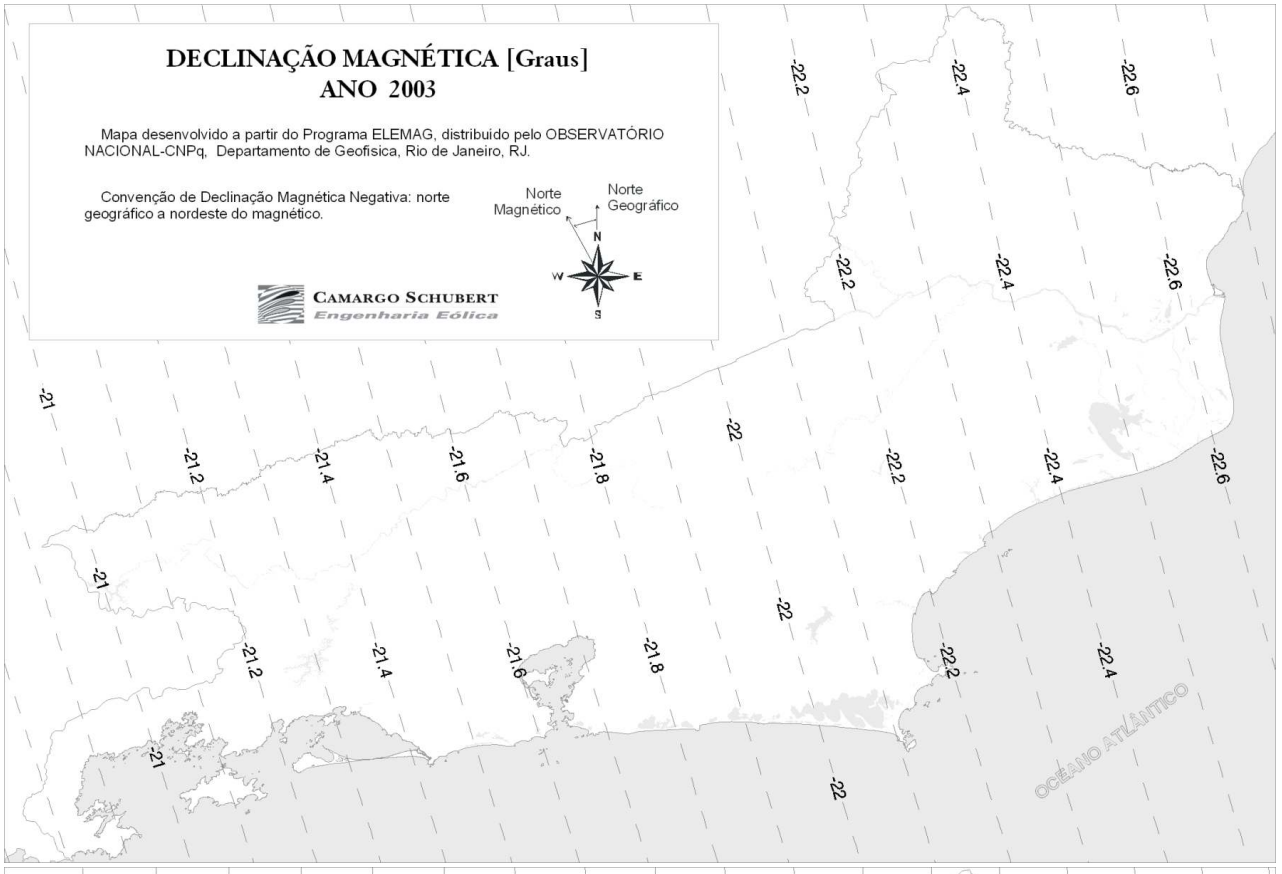
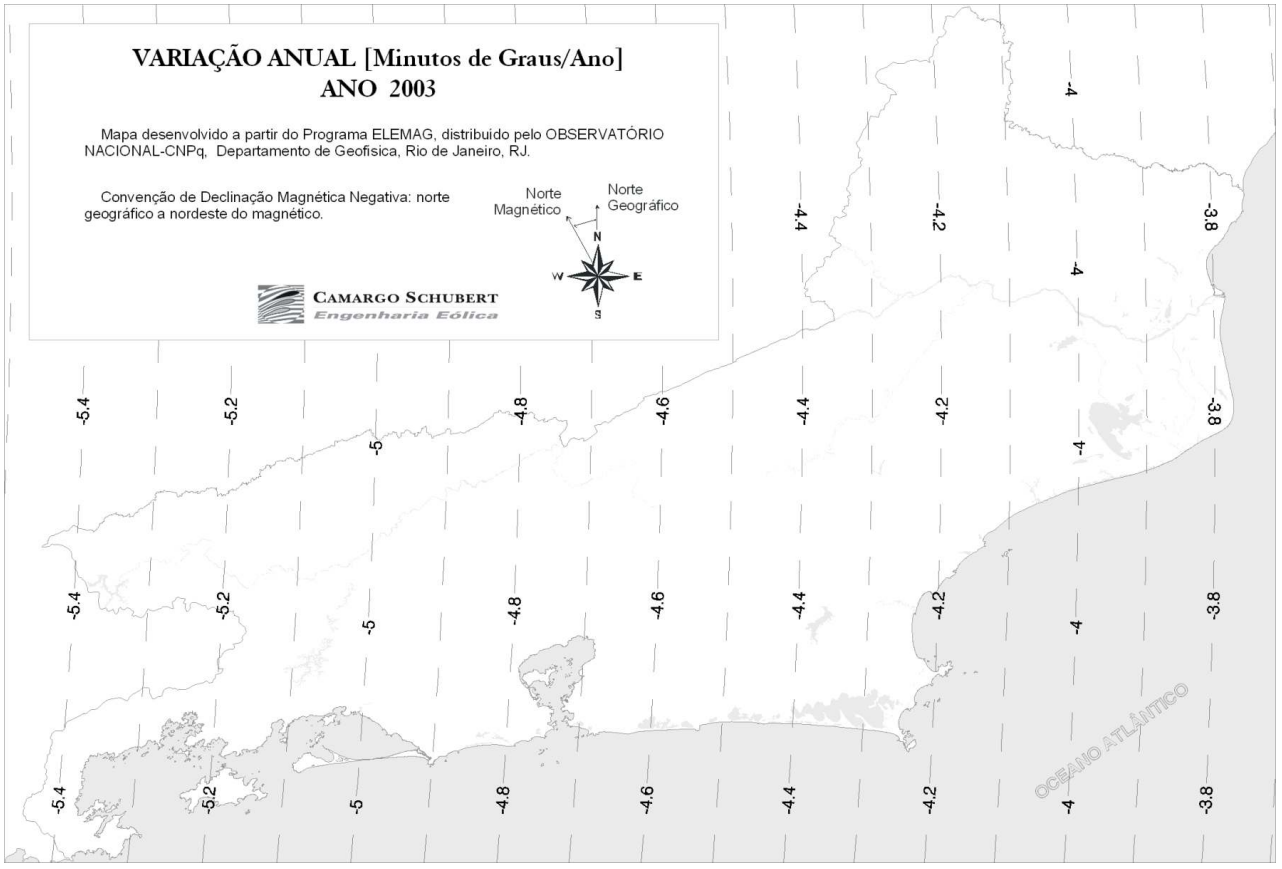



Fig. II.2 - Cálculo da Produção Anual de Energia (PAE).

## II.5 Declinação Magnética

Como informação de auxílio à instalação de sensores de direção em futuras torres anemométricas a serem instaladas no Estado do Rio de Janeiro, foram desenvolvidos mapas de declinação magnética e variação magnética anual, para o ano de 2003.[36]



GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

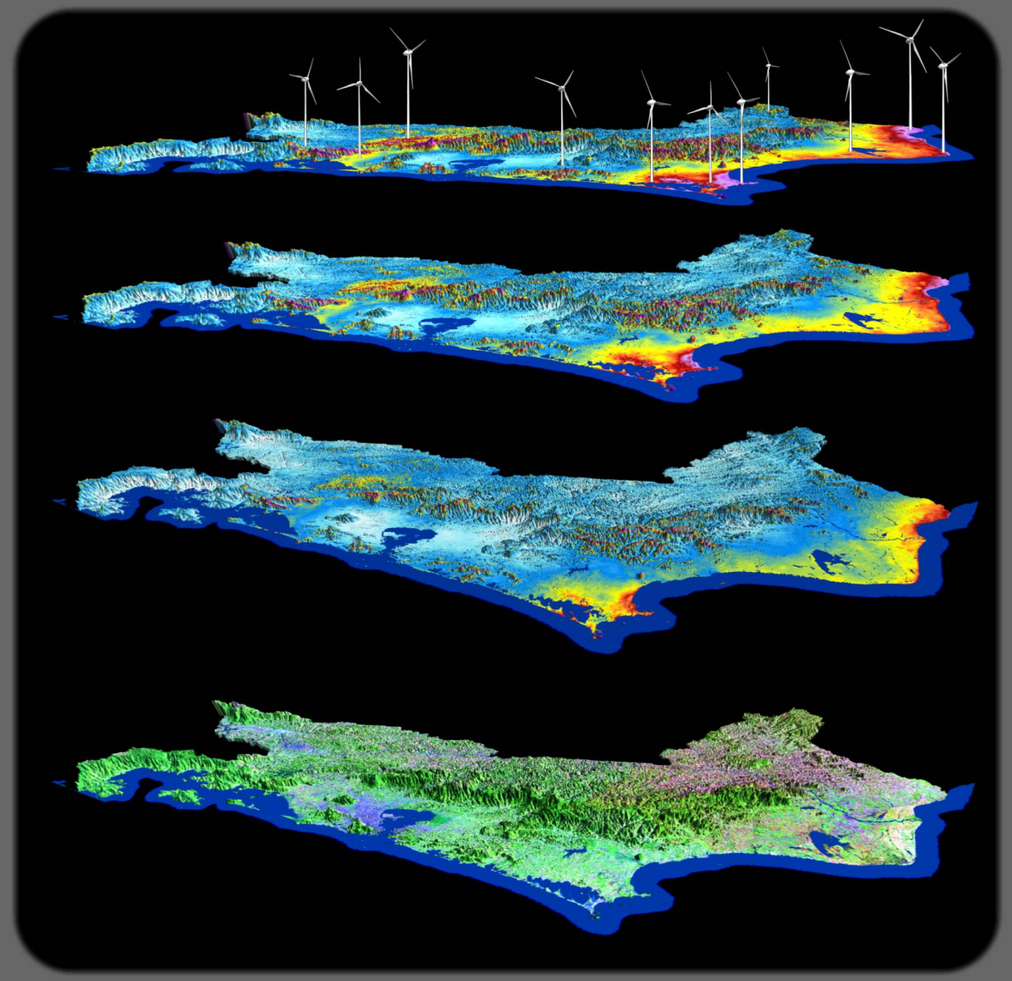
ESTADO DO RIO DE JANEIRO
SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA,
DA INDÚSTRIA NAVAL E DO PETRÓLEO

Eletrobolt
SFE - Sociedade Fluminense de Energia Ltda.

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

ESTADO do RIO DE JANEIRO Atlas Eólico

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS



# ESTADO DO RIO DE JANEIRO
# Atlas Eólico

GOVERNO DO ESTADO RJ
TRABALHANDO CADA VEZ MAIS

ESTADO DO RIO DE JANEIRO
SECRETARIA DE ESTADO DE ENERGIA,
DA INDÚSTRIA NAVAL E DO PETRÓLEO