



Atlas Eólico

 *Espírito Santo*

ASPE

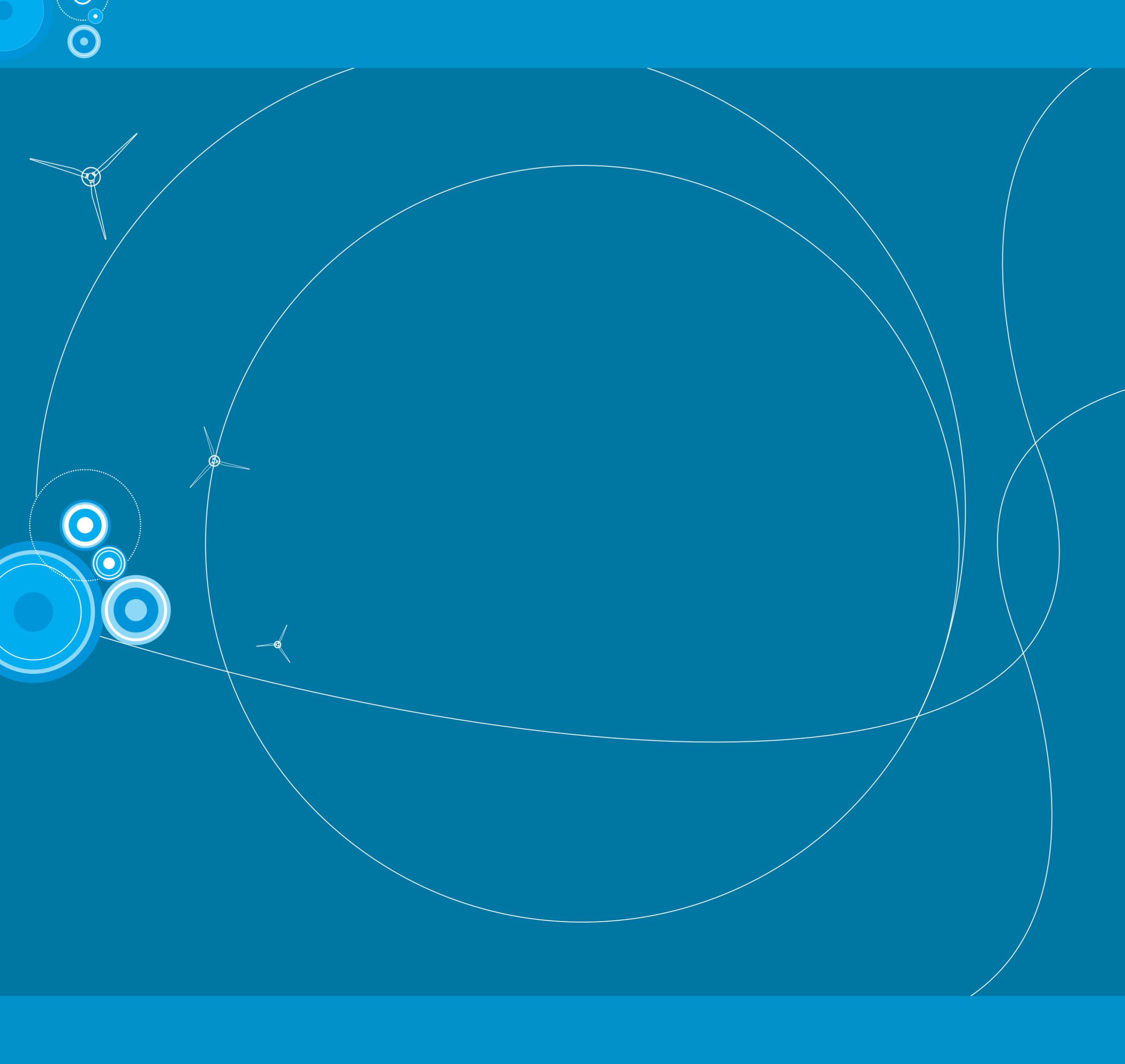
Agência de Serviços Públicos de Energia
do Estado do Espírito Santo

Secretaria
de Desenvolvimento

UM NOVO

ESPÍRITO SANTO

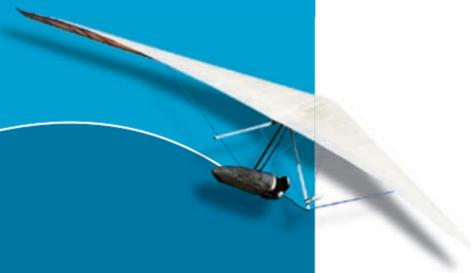
Governo do Estado





Atlas Eólico

Espírito Santo



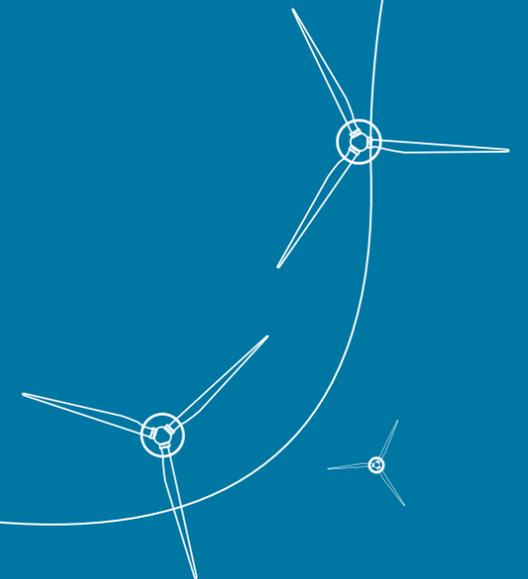
Secretaria
de Desenvolvimento

UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia
do Estado do Espírito Santo

Vitória
2009



Dados internacionais de catalogação na publicação
Bibliotecária responsável: Mara Rejane Vicente Teixeira

Amarante, Odilon A. Camargo do.
Atlas eólico : Espírito Santo / Odilon A. Camargo do Amarante,
Fabiano de Jesus Lima da Silva, Paulo Emiliano Piá de Andrade.
– Vitória, ES : ASPE, 2009.
100p.; 9fls. dobradas: il., mapas : 33 x 35 cm.

Inclui bibliografia.

1. Energia eólica – Espírito Santo (Estado) – Mapas. 2. Ventos – Espírito Santo (Estado) – Medição – Mapas. I. Silva, Fabiano de Jesus Lima da. II. Andrade, Paulo Emiliano Piá de. III. Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo. IV. Título.

CDD (22ª ed.)
551.5185098152

Equipe Técnica de Elaboração

» CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA EÓLICA:
Odilon A. Camargo do Amarante
Fabiano de Jesus Lima da Silva
Paulo Emiliano Piá de Andrade
Emerson Parecy

» DADOS ANEMOMÉTRICOS UTILIZADOS COM AUTORIZAÇÃO DA
ESCELSA - Espírito Santo Centrais Elétricas S/A

» FOTOGRAFIAS
Zig Koch

» PROJETO GRÁFICO
du.ppg.br

» IMPRESSÃO E ACABAMENTO
Gráfica Santo Antônio - GSA

IMPRESSO NO BRASIL

Realização

» ESTADO DO ESPÍRITO SANTO
Paulo Hartung – Governador

» SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO
Guilherme Dias – Secretário

» AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA
DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO
Maria Paula de Souza Martins – Diretora Geral
Ayrton de Souza Porto Filho – Diretor Técnico
João Luiz Lima – Diretor Administrativo e Financeiro
Wellington Ataíde G. Oliveira – Gerente de Gás Natural

A energia do vento

A sustentabilidade é um desafio posto ao mundo contemporâneo. O planeta – infelizmente, pela via das crises e tragédias – vem tomando consciência de que o crescimento não pode se dar a qualquer custo. O desenvolvimento tem de se constituir em bases sociais e ambientalmente responsáveis, caso contrário, a vida se tornará cada vez mais difícil.

A busca por energias renováveis é um tema dessa agenda urgente e desafiadora. E dentre as fontes privilegiadas para esse tipo de energia está o vento. A energia eólica é promissora e estudos apontam que o território nacional possui boas condições para instalação de parques produtores.

Os países que mais fazem uso dessa energia são Alemanha, Estados Unidos, Espanha, Índia, China, Dinamarca, Itália, França, Reino Unido e Portugal. No Brasil, o impulso dessa tecnologia aconteceu por meio de um programa federal, o Proinfa, que possibilitou a implantação de algumas usinas no litoral nordestino e no Sul brasileiro. Há as usinas de Muricipe (Fortaleza), Prainha (Ceará), Osório (Rio Grande do Sul) e Rio do Fogo (Rio Grande do Norte). A primeira foi instalada em Fernando de Noronha (Pernambuco).

Este Atlas, que temos a satisfação de apresentar, integra o esforço de nosso Governo em promover um desenvolvimento socialmente inclusivo, ambientalmente responsável e geograficamente desconcentrado e, nessa direção, visa a dar subsídios aos futuros investidores interessados em construir parques eólicos em municípios capixabas.

Um dado importante: este Atlas contém o primeiro estudo sobre o potencial eólico em mar territorial brasileiro (*offshore*). Essa tecnologia ainda não foi utilizada no Brasil, mas já é aplicada em outros países.

Com este diagnóstico de nossos potenciais eólicos, queremos inserir o Espírito Santo no mapa da produção de energia renovável, também avançando por campos ainda intocados no Brasil, como é o caso da plataforma continental. Registre-se que o potencial eólico no mar é cinco vezes superior à capacidade de geração de energia em terra.

Dentre os locais considerados promissores no Espírito Santo, conforme o estudo contratado pela Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado (ASPE), ligada à Secretaria de Estado de Desenvolvimento (SEDES), estão Linhares, Presidente Kennedy e Marataízes.

O levantamento conclui que o potencial de geração eólica do Estado é promissor (1,79 GW a 75 metros de altura para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,5 m/s) e poderá ser aproveitado gradativamente nos limites de inserção do sistema elétrico regional. O uso da energia eólica pode alavancar o crescimento econômico e a autossustentabilidade energética do Espírito Santo, em função do seu potencial para duplicar a nossa capacidade atual de geração elétrica.

Nos últimos anos, o Espírito Santo vem diversificando a sua matriz energética, com a presença de hidrelétricas, pequenas

centrais hidrelétricas (PCHs), petróleo e gás natural. Citamos, por exemplo, os nove novos projetos de termelétricas vencedores dos leilões de energia nova da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os investimentos superam a casa dos R\$ 4 bilhões e irão triplicar a geração de energia no Espírito Santo.

Investimentos da Petrobras visam a acelerar a produção de petróleo e gás natural do País. Em terras capixabas, alguns exemplos são a expansão da Unidade de Tratamento de Gás de Cacimbas (UTGC), a chegada de novas plataformas no mar capixaba, e a construção de gasodutos e portos especializados, dentre outros.

O Governo aguarda com expectativa a realização de um leilão de energia eólica no País, o que deve acontecer ainda em 2009. E como existem poucas medições de ventos no Brasil, a partir desta publicação o Espírito Santo já está saindo na frente.

A energia dos ventos é considerada uma fonte de energia renovável, amplamente disponível, com baixo impacto ambiental e limpa, por não emitir resíduos, como gás carbônico. O objetivo do Atlas é dar um passo decisivo para agregar mais uma fonte de energia à matriz energética capixaba. Nesse caso, uma fonte de energia sustentável, exatamente como o processo de desenvolvimento socioeconômico que implementamos a partir de 2003. Que bons ventos nos tragam mais uma fonte de energia – sustentável e renovável.

Paulo Hartung
Governador do Estado do Espírito Santo



Apresentação

A indústria da geração de energia elétrica a partir da força dos ventos é a que mais tem se expandido nas últimas décadas, entre aquelas aptas à escala de gigawatts. Muitos países vêm investindo intensamente nesta opção, estendendo suas fazendas eólicas desde sua porção terrestre ao seu mar territorial, num esforço conjunto da comunidade global rumo ao crescimento sustentável.

Além das vantagens decorrentes da característica renovável da energia eólica e de seu baixíssimo impacto ambiental, há ainda aquelas relacionadas tanto à possibilidade de implantação relativamente rápida como a de coexistência com outras atividades de uso do solo, como a agropecuária.

Adicionalmente, a energia eólica, por não ser vinculada a combustíveis fósseis, é invulnerável a flutuações de preços de *commodities*, o que a torna um recurso agregador de segurança energética.

O Brasil, cujo potencial de expansão hidráulica caminha para o esgotamento, necessita diversificar sua matriz energética, preferencialmente com outras fontes renováveis de energia.

Neste contexto, a energia eólica se apresenta, em conjunto com a bioenergia, como a mais promissora forma de ampliação do parque gerador de energia elétrica brasileiro.

O Espírito Santo, que é uma Unidade da Federação de dimensões relativamente pequenas, importa 67% da energia que consome, além de ter 60% da sua capacidade de geração oriunda de fonte térmica, diferentemente do restante do Brasil.

A Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo – ASPE apresenta este Atlas Eólico como contribuição para a ampliação e diversificação da matriz energética capixaba, fornecendo os fundamentos para uma

adequada política de uso da energia dos ventos e de seu consequente desenvolvimento.

A publicação contém informações detalhadas sobre os regimes de vento no território e na plataforma continental capixaba, obtidas a partir da mais rigorosa metodologia, usando técnicas modernas e tendo como base medições de alta qualidade, realizadas entre os anos de 2001 e 2003.

Essas informações permitem identificar os locais com potencial para aproveitamento dessa fonte de energia sustentável, tornando possível o desenvolvimento de estudos de viabilidade para projetos de fazendas eólicas em nosso território.

Visando facilitar a identificação dos locais mais promissores para receberem potenciais investimentos eólicos, o Atlas apresenta uma série de fotografias aéreas, realizadas durante um voo que percorreu nosso litoral exclusivamente com este propósito.

O potencial eólico estimado neste trabalho foi calculado considerando-se torres de 50 m, 75 m e 100 m de altura e ventos superiores a 7 m/s, podendo duplicar a capacidade atual de geração elétrica estadual.

De forma inédita, este Atlas apresenta uma estimativa do potencial eólico sobre o mar (*offshore*) ao longo da costa capixaba, que possui uma vasta porção de águas rasas, cujo potencial para aproveitamento eólico é cinco vezes superior ao de solo firme (*onshore*). A implantação de parques eólicos *offshore* exigirá uma tecnologia ainda não utilizada no Brasil, mas já existente em outros países.

O Atlas também apresenta informações agregadas relevantes sobre o Espírito Santo, abrangendo caracterização

geográfica, demografia, infraestrutura básica, consumo de eletricidade, climatologia, unidades de conservação da natureza, terras indígenas e centros consumidores.

Além disso, a publicação contém as principais questões que envolvem a tecnologia empregada na geração eólica bem como a metodologia utilizada para a elaboração deste estudo, buscando fornecer um diagnóstico completo sobre o assunto e se configurar como a referência mais atualizada para avaliações complementares, planejamento e implantação de plantas eólicas no Espírito Santo.

O lançamento do Atlas ocorre num momento em que a geração eólica dá sinais de crescimento em larga escala no país, com a existência de um número sem precedentes de projetos em estudo, em implantação e em operação.

A perspectiva de realização de um leilão de energia específico para a fonte eólica ainda para o ano de 2009 reforça a importância da divulgação deste trabalho realizado pelo Governo do Estado do Espírito Santo.

Nossos agradecimentos especiais às Centrais Elétricas do Espírito Santo – ESCELSA, que se sensibilizou com nossa iniciativa de elaboração deste Atlas e, ao disponibilizar os dados das medições de vento necessários para a validação dos resultados do mapeamento, tornou possível abreviar o tempo de sua realização.

Vitória, março de 2009.

Maria Paula de Souza Martins
Diretora Geral da Agência de Serviços Públicos
de Energia do Estado do Espírito Santo

O Estado do Espírito Santo

1.

.1	<i>Caracterização Geográfica</i>	12
.2	<i>Demografia e Consumo de Eletricidade</i>	13
.3	<i>Infraestrutura</i>	14
.4	<i>Climatologia</i>	19
.5	<i>Regimes de Vento</i>	22
.6	<i>Unidades de Conservação da Natureza</i>	24
.7	<i>Terras Indígenas</i>	24

Energia Eólica e Tecnologia

2.

.1	<i>A Atmosfera em Movimento</i>	28
.2	<i>Tecnologia</i>	29
.3	<i>Empreendimentos Eólicos</i>	32

Metodologia

3.

.1	<i>O Processo de Mapeamento</i>	36
.2	<i>Medições Anemométricas</i>	39
.3	<i>Modelos de Terreno</i>	41



Mapas Eólicos do Espírito Santo

4.

.1	<i>Rosa-dos-Ventos Anual, Frequências x Direção</i>	47
.2	<i>Rosa-dos-Ventos Anual, Velocidades Normalizadas x Direção</i>	49
.3	<i>Rosa-dos-Ventos Anual, Fluxo de Potência Eólica x Direção</i>	51
.4	<i>Densidade Média Anual do Ar</i>	53
.5	<i>Fator de Forma de Weibull Anual</i>	55
.6	<i>Potencial Eólico Anual a 50 m de Altura</i>	57
.7	<i>Potencial Eólico Anual a 75 m de Altura</i>	59
.8	<i>Potencial Eólico Anual a 100 m de Altura</i>	61
.9	<i>Potencial Eólico Sazonal a 50 m de Altura</i>	62
.10	<i>Potencial Eólico Sazonal a 75 m de Altura</i>	64
.11	<i>Potencial Eólico Sazonal a 100 m de Altura</i>	66

Análises e Diagnósticos

5.

.1	<i>O Potencial Eólico do Espírito Santo</i>	70
.2	<i>Áreas Mais Promissoras</i>	72
.3	<i>Potencial Eólico Sobre o Mar (Offshore)</i>	82

Referências

84

Fórmulas e Mapas Úteis

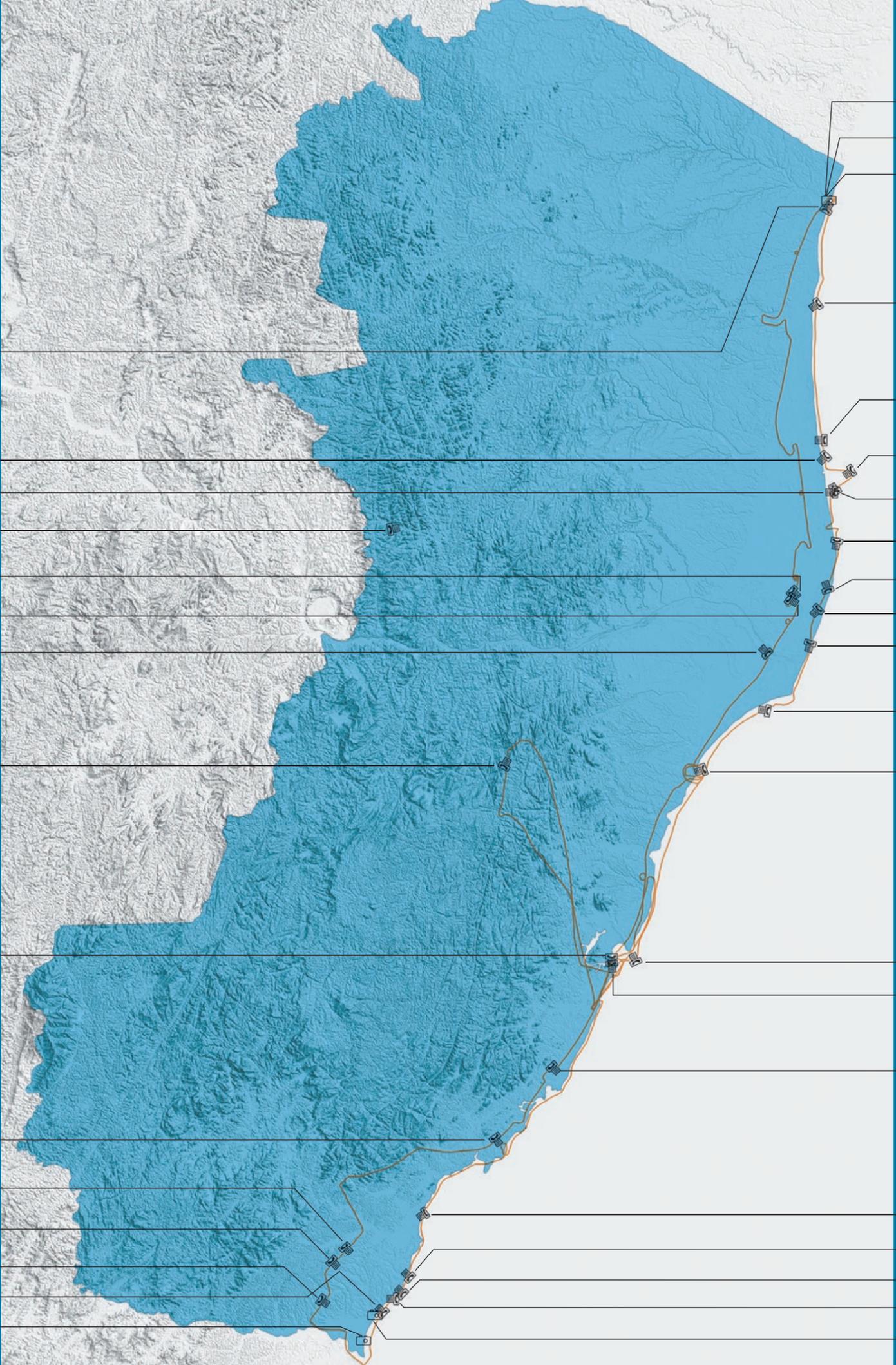
a.

.1	<i>Distribuição de Weibull</i>	88
.2	<i>Lei Logarítmica e Rugosidade</i>	89
.3	<i>Densidade do Ar</i>	90
.4	<i>Produção Anual de Energia (PAE) e Fator de Capacidade</i>	90
.5	<i>Declinação Magnética</i>	91



Lista de Fotografias no Estado do Espírito Santo

Posição da câmera 
 Posição aproximada da câmera 
 Rota do sobrevoo realizado nos dias 28 e 29 de janeiro de 2009 



Parque Estadual de Itaúnas, p. 25 **Figura 1.16**
 Sul do município de São Mateus, próximo da divisa com Linhares, p. 76 **Figura 5.7**
 Divisa entre os municípios de Linhares e São Mateus, p. 77 **Figura 5.8**
 Pancas, p. 44 **Capítulo 4**
 Município de Linhares, p. 52 **Figura 4.4**
 Linha de Transmissão Cacimbas-Linhares, p. 16 **Figura 1.7**
 Rio Doce, p. 16 **Figura 1.6**
 Santa Teresa, p. 81 **Figura 5.13**
 Vitória, p. 14 **Figura 1.4**
 Porto de Ubu, p. 16 **Figura 1.8**
 Parte dos municípios de Marataízes e Presidente Kennedy, p. 60 **Figura 4.8**
 Município de Presidente Kennedy **Página 8**
 Interior dos municípios de Presidente Kennedy e Marataízes, p. 58 **Figura 4.7**
 Proximidades do povoado de Marobá, p. 79 **Figura 5.11**
 Torre Praia das Neves, p. 40 **Figura 3.6**

Capítulo 1 Dunas de Itaúnas, p. 10
Capítulo 5 Dunas de Itaúnas, p. 68
Apêndice Dunas de Itaúnas, p. 86
Figura 1.16 Área de Proteção Ambiental de Conceição da Barra, p. 25
Figura 4.3 Sul do município de São Mateus, nas proximidades do povoado de Barra Nova, p. 50
Figura 5.15 Plataforma de Produção de Gás Natural de Peroá, p. 83
Página 4 Foz do Rio Ipiranga
Figura 5.6 Área pouco povoada no leste do município de Linhares, p. 75
Figura 4.2 Interior do município de Linhares, p. 48
Figura 1.11 Unidade de Processamento de Gás Natural de Cacimbas, em Linhares, p. 18
Figura 5.3 Área próxima à Subestação de Cacimbas, no município de Linhares, p. 73
Figura 4.1 Reserva Biológica de Comboios, p. 46
Figura 1.9 Porto de Barra do Riacho, p. 16
Figura 1.10 Portos de Praia Mole e Tubarão, p. 16
Capítulo 3 Convento da Penha, p. 34
Figura 1.16 Área de Proteção Ambiental de Setiba, p. 25
Figura 1.16 Área de Proteção Ambiental Guanandy, p. 25
Figura 5.12 Proximidades da cidade de Marataízes, p. 80
Figura 4.6 Região centro-leste do município de Marataízes, p. 56
Figura 4.5 Município de Marataízes, p. 54
Figura 3.5 Praia de Marobá, p. 39



ZIG KOCH

1

0 Estado do

○ **Espírito Santo**

- ① **1.1**
Caracterização Geográfica
- ② **1.2**
*Demografia e
Consumo de Eletricidade*
- ③ **1.3**
Infraestrutura
- ④ **1.4**
Climatologia
- ⑤ **1.5**
Regimes de Vento
- ⑥ **1.6**
*Unidades de
Conservação da Natureza*
- ⑦ **1.7**
Terras Indígenas

1.1 Caracterização Geográfica

Localizado na região sudeste do Brasil (Figura 1.1), o Estado do Espírito Santo está situado entre os paralelos 17°53'29"S e 21°18'03"S e os meridianos 39°41'18"W e 41°52'45"W^[1], ocupando uma área territorial de 46.077 km², o que representa 0,54% do território brasileiro^[2]. Seus limites são formados pelo Oceano Atlântico ao leste, e os estados da Bahia ao norte, Minas Gerais a oeste e Rio de Janeiro ao sul.

O Espírito Santo pode ser dividido geograficamente em duas zonas principais: a zona dos tabuleiros e a região serrana. A região dos tabuleiros, com altitudes em torno de 50 m, compreende a faixa da baixada litorânea, alargada ao norte da capital Vitória. É caracterizada pela floresta de tabuleiros, uma vegetação densa, com árvores de altura superior a 30 m e espaçadas ([3], *apud* [1]). Densamente povoado em torno da capital, o litoral capixaba é marcado por belas

praias, pela planície costeira do delta do Rio Doce, pelas dunas móveis de Itaúnas e pela Ilha de Vitória.

A região serrana é formada por maciços montanhosos cortados por rios de vales profundos. Sobre ela, a cobertura original de floresta atlântica de altitude foi intensamente explorada, dando lugar em grande parte a uma capoeira alta e rica em imbaúbas ([3], *apud* [1]). Os principais elementos geográficos da região serrana capixaba são a Serra do Castelo e a Serra do Caparaó, que abriga o terceiro ponto mais alto do Brasil, o Pico da Bandeira, com altitude de 2.892 m^[4].

A Figura 1.2 apresenta uma síntese das características geográficas do Estado do Espírito Santo, através do mosaico do satélite LANSAT 5 sobreposto ao relevo, com a escala vertical exagerada em 10 vezes para melhor visualização.

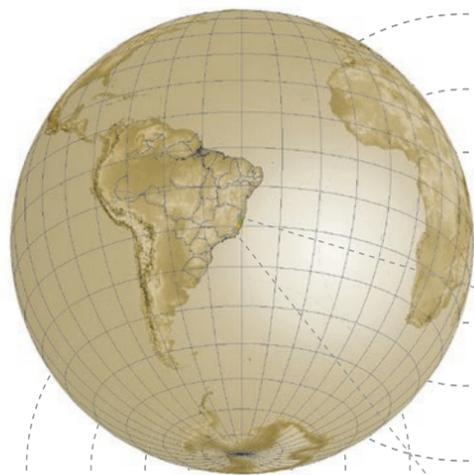


Figura 1.1

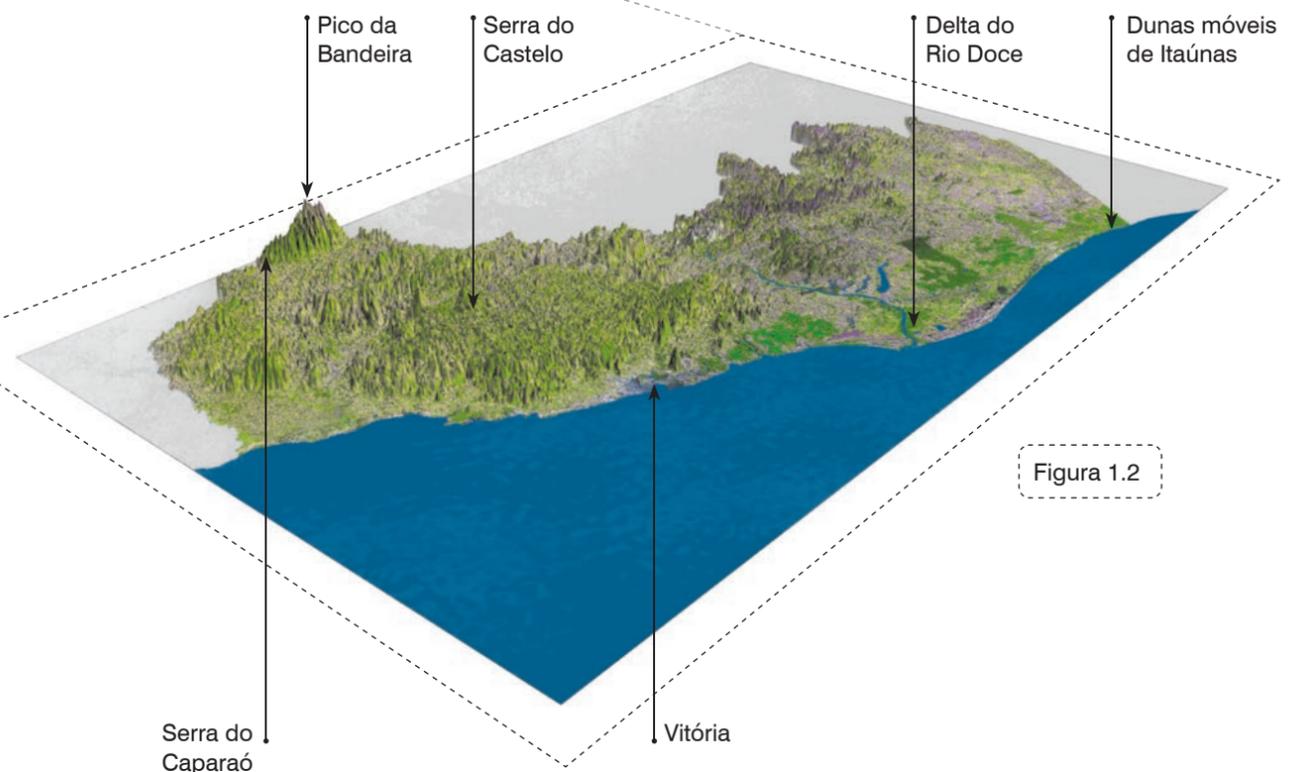


Figura 1.2

1.2 Demografia e Consumo de Eletricidade

Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, a população do Espírito Santo em 2007 era de 3.351.669 habitantes, tendo crescido a uma taxa de 1,13% a.a. desde o Censo 2000. Nesta época, 79,5% da população era urbana e 20,5%, rural. No setor agropecuário estava 24,5% da população ocupada do Estado, que era de 1.309.287 habitantes; na indústria, 19,1% e no setor de serviços, 56,4%^{[5],[6]}. Em 2006, o PIB do Estado foi de R\$ 52,8 bilhões, resultante de um crescimento real médio entre 2002 e 2006 de 4,8% a.a. – mais que a média nacional – e representando um PIB anual *per capita* de R\$ 15.065,00^[7].

Cerca de 60,4% da renda do Estado é originada em apenas quatro dos municípios da Região Metropolitana de Vitória^[8] (Cariacica, Vitória, Vila Velha e Serra), que concentram 43,4% da população (Figura 1.3 e Tabela 1.1) e abrigam duas importantes bases industriais na produção de aço e pelletização do minério de ferro. Além dessa região, destacam-se industrialmente os polos de Cachoeiro de Itapemirim, Linhares e Colatina, que se sobressaem nos setores de mármore, confecções e celulose, respectivamente^[9].

Entre 2004 e 2007, o consumo de eletricidade no Espírito Santo cresceu a uma taxa composta de 5,8% a.a., chegando a 8.451 GWh em 2007^[10], como se pode observar no Gráfico 1.2. O Gráfico 1.1 mostra que a redução no consumo da classe industrial foi compensada com incremento dos consumidores livres, responsáveis em 2007 por 41,9% do consumo do Estado.

O Espírito Santo conecta-se com o Subsistema Sudeste/Centro-Oeste, o qual terá entre 2008 e 2012 o maior acréscimo de consumo anual do país em números absolutos, segundo dados do Operador Nacional do Sistema – ONS^[11]. Como demonstra o Gráfico 1.3, o consumo se elevará de 236.614 GWh em 2008 para 288.141 GWh em 2012 (uma variação bruta de 51.527 GWh), o que acarretará um aumento na carga de energia no Subsistema de 32.302 MW_{médios} em 2008 para 39.159 MW_{médios} em 2012, representando um crescimento médio de 4,9% a.a. na carga durante este período^[11].

POPULAÇÃO

(milhares de habitantes)

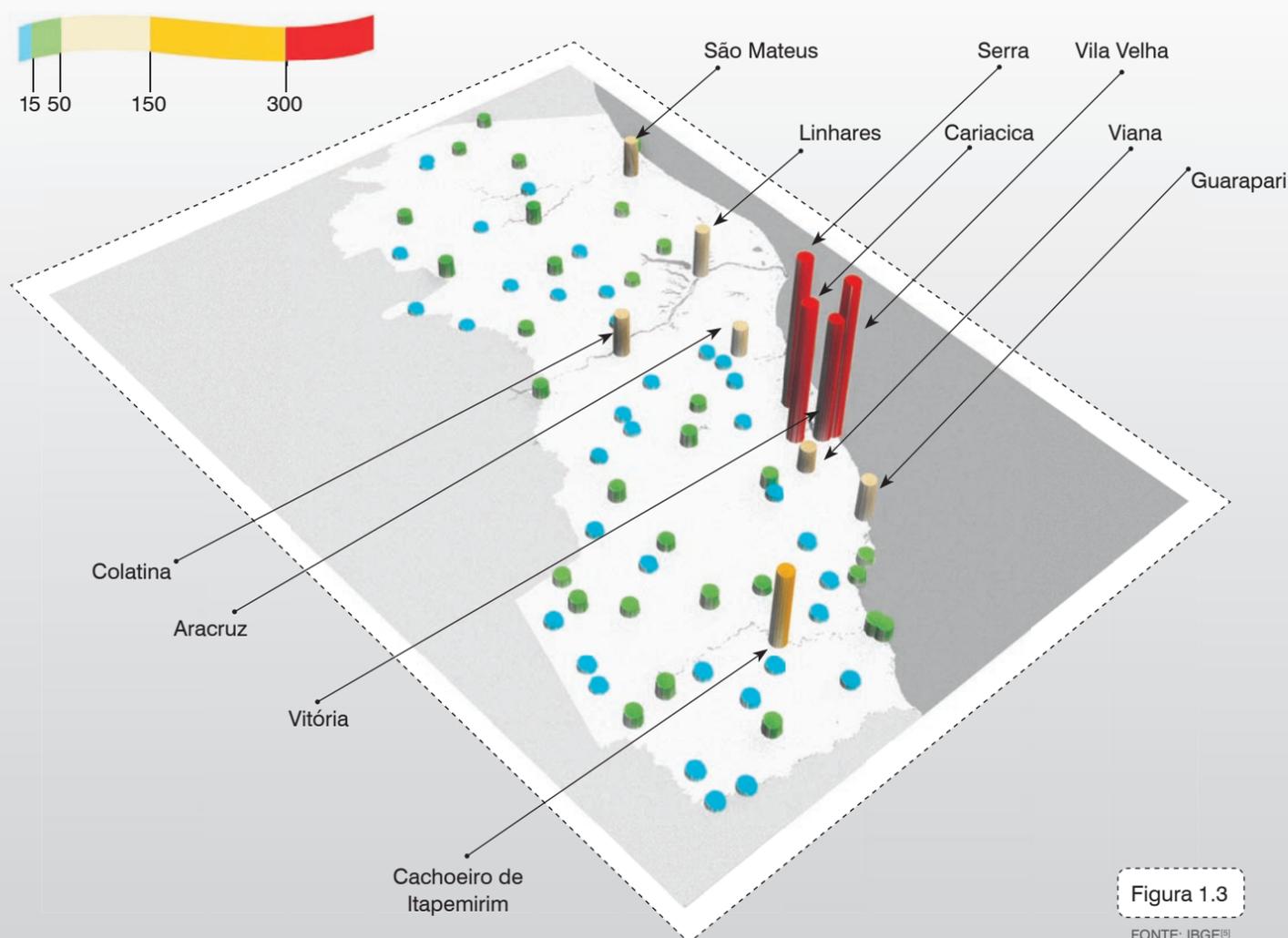


Figura 1.3

FONTE: IBGE^[8]

ESPÍRITO SANTO: PRINCIPAIS MUNICÍPIOS

Tabela 1.1

FONTE: IBGE^[8], IJSN^[8]

Município	População 2007	Produto Interno Bruto 2006 a preços correntes (1000 R\$)
Vila Velha	398.068	4.019.549
Serra	385.370	9.132.400
Cariacica	356.536	2.429.194
Vitória	314.042	16.290.882
Cachoeiro de Itapemirim	195.288	2.018.374
Linhares	124.564	1.706.747
Colatina	106.637	1.212.714
Guarapari	98.073	687.868
São Mateus	96.390	1.144.039
Aracruz	73.358	2.671.581
Viana	57.539	592.968

CONSUMO POR SETOR

Consumo de Energia Elétrica por Setor no Espírito Santo – 2007

FONTE: SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESPÍRITO SANTO^[10]

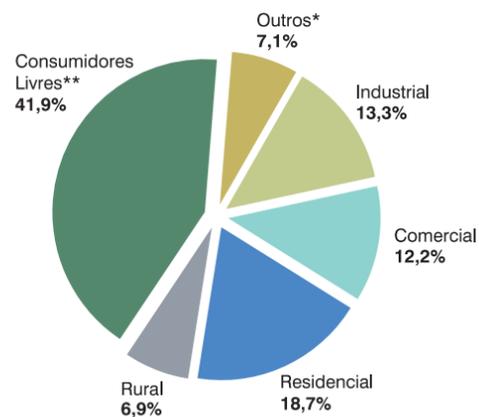


Gráfico 1.1



Figura 1.4 – A região metropolitana de Vitória é o maior polo industrial do Estado.

EVOLUÇÃO DO CONSUMO

Evolução do Consumo de Energia Elétrica por Setor no Espírito Santo (GWh/ano)

FONTE: SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESPÍRITO SANTO^[10]

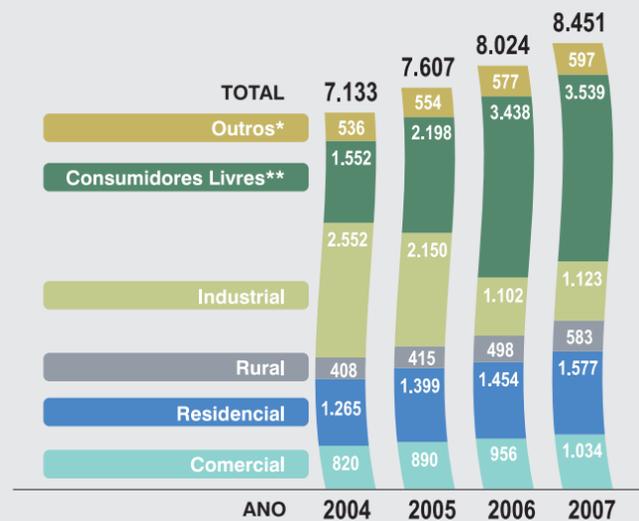


Gráfico 1.2

PROJEÇÃO DO CONSUMO

Projeção do Consumo de Energia Elétrica na Rede do Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (TWh/ano)

FONTE: ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA^[11]

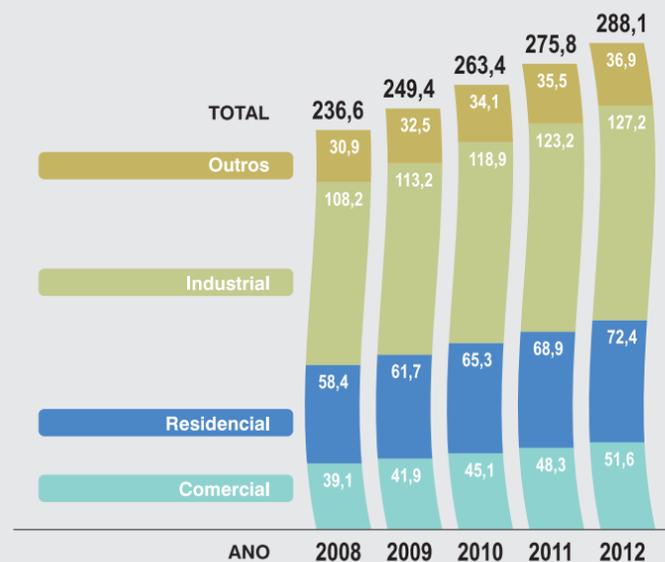


Gráfico 1.3

* A Categoria "Outros" engloba as seguintes classes de consumo: Serviço Público, Poder Público, Iluminação Pública e Consumo Próprio.

** A categoria "Consumidores Livres" refere-se à energia que transita no sistema da ESCELSA dos consumidores que compram energia de outros fornecedores.

*** As usinas em divisas com outros estados foram consideradas com metade da potência.

1.3 Infraestrutura

PORTOS:

O complexo portuário capixaba agrupa seis portos, com oito terminais e quatro Estações Aduaneiras Interiores (EADIS), constituindo-se no primeiro em movimentação do país, e o segundo em arrecadação cambial. Por ele passa em torno de 10% do PIB Brasileiro^[12]. Em 2007, os portos do Espírito Santo movimentaram 1,5 milhão de toneladas, o que representou 20,5% da movimentação de cargas do país^[13].

RODOVIAS:

Há no Estado mais de 30.000 km de rodovias^[14], dos quais quase 4.000 km já estão pavimentados^[15].

FERROVIAS:

As duas ferrovias que cortam o território capixaba são a Estrada de Ferro Vitória-Minas – EFVM e a Ferrovia Centro-Atlântica – FCA. Destaca-se a EFVM, uma das mais eficientes da América Latina, por sua capacidade para transportar 120 milhões de toneladas por ano, principalmente minério de ferro, carvão mineral, aço, ferro-gusa e calcário^{[12],[10]}.

RIOS:

As principais bacias hidrográficas capixabas são as dos rios Itaúnas, São Mateus, Doce, Riacho, Seis Magos, Santa Maria da Vitória, Jucu, Guarapari, Benevente, Rio Novo, Itapemirim e Itabapoana^[16]. O Rio Doce é navegável em todo o território do Espírito Santo, até a foz do rio Santo Antônio, em Minas Gerais^[17]. O relevo acidentado confere um apreciável potencial hidrelétrico ao Estado, existindo hoje 565 MW*** entre empreendimentos hidrelétricos em operação, em construção e em fase de projeto^[18].

SISTEMA ELÉTRICO:

A capacidade de geração do Espírito Santo é de 1.167 MW, instalados em 31 empreendimentos em operação, cuja energia produzida tem natureza e destino como ilustrados nos Gráficos 1.4 e 1.5, e nas Tabelas 1.2 e 1.3. Destaca-se a alta participação da fonte térmica na matriz energética. Atualmente o Estado importa 67% da energia que consome, o que é possível graças a um anel de transmissão que o conecta ao Sistema Interligado^[19]. A Figura 1.5 mostra a situação do Espírito Santo no Sistema Elétrico Interligado Nacional, com a localização das principais usinas e linhas de transmissão, segundo dados disponibilizados pela ANEEL^{[18],[20]}.

O mapa da p. 17 ilustra a infraestrutura básica do Estado, contendo sistema elétrico, malha viária, rios, cidades, portos e aeroportos. Alguns elementos pertencentes a essa infraestrutura são ilustrados nas figuras 1.6 a 1.11.

USINAS HIDRELÉTRICAS (UHE, PCH e CGH)

USINA	TIPO	DESTINO	RIO	SITUAÇÃO	MW
Aimorés*	UHE	PIE	Doce	OPE	165,0
Mascarenhas*	UHE	SP	Doce	OPE	90,3
Suíça	UHE	SP	Santa Maria	OPE	30,1
Rosal*	UHE	SP	Itabapoana	OPE	27,5
São Simão	PCH	PIE	Itapemirim	OPE	27,0
Muniz Freire	UHE	APE	Pardo	OPE	25,0
São João	PCH	PIE	Castelo	OPE	25,0
São Joaquim	PCH	PIE	Benevente	OPE	21,0
Rio Bonito	UHE	SP	Santa Maria	OPE	16,8
Calheiros*	PCH	PIE	Itabapoana	OPE	9,5
Fruteiras	PCH	SP	Fruteiras	OPE	8,7
Jucu	PCH	SP	Jucu	OPE	4,8
Viçosa (Bicame)	PCH	PIE	Castelo	OPE	4,0
Franca Amaral*	PCH	SP	Itabapoana	OPE	2,3
Fumaça IV*	PCH	PIE	Preto	OPE	2,3
Alegre	PCH	SP	Ribeirão Alegre	OPE	2,1
Cachoeira da Onça	CGH	REG	São José	OPE	0,9
Tabocas	CGH	REG	Tabocas	OPE	0,5
Santa Maria	CGH	REG	Santa Maria	OPE	0,4
Cachoeira do Oito	CGH	REG	Pancas	OPE	0,2
São Pedro	PCH	PIE	Jucu	CON	30,0
Santa Fé	PCH	PIE	Itapemirim	CON	29,0
Pirapetinga*	PCH	PIE	Itabapoana	CON	7,9
Pedra do Garrafão*	PCH	PIE	Itabapoana	CON	8,3
Marechal Floriano	PCH	PIE	Jucu	OUT	26,1
TOTAL EM OPERAÇÃO:					463,3

Tabela 1.2 FONTE: ANEEL^[18]

USINAS TERMELÉTRICAS

USINA	DESTINO	COMBUSTÍVEL	SITUAÇÃO	MW	
CST	APE	Gás Siderúrgico	OPE	278,2	
Aracruz	APE-COM	Licor Negro	OPE	210,4	
Sol	APE	Efluente Gasoso	OPE	196,5	
Ceisa (Ex-Disa)	PIE	Bagaço de Cana de Açúcar	OPE	5,5	
Alcon	PIE	Bagaço de Cana de Açúcar	OPE	1,6	
Lasa	REG	Bagaço de Cana de Açúcar	OPE	3,2	
Paineiras	REG	Bagaço de Cana de Açúcar	OPE	3,2	
Vitória Apart Hospital	REG	Gás Natural	OPE	2,1	
Shopping Praia da Costa	REG	Óleo Diesel	OPE	1,8	
Fibrasa Embalagens	REG	Óleo Diesel	OPE	1,1	
Wal Mart Sams Vitória	REG	Óleo Diesel	OPE	0,6	
Viana	PIE	Óleo Combustível	CON	174,6	
Linhares	PIE	Gás Natural	OUT	204,0	
Cogeradora Biancogrês	REG	Gás Natural	OUT	4,9	
Praia da Costa	REG	Gás Natural	OUT	3,6	
João Neiva	REG	Gás de Alto Forno	OUT	3,0	
Aeroporto de Vitória	REG	Óleo Diesel	OUT	0,4	
TOTAL EM OPERAÇÃO:					704,3

Tabela 1.3 FONTE: ANEEL^[18]

SIGLAS UTILIZADAS

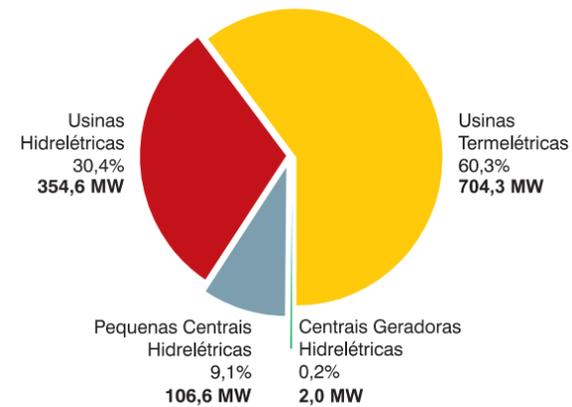
APE	Autoprodução de Energia
APE-COM	Autoprodução de Energia c/ Comercialização de Excedente
PIE	Produção Independente de Energia
REG**	Registro
SP	Serviço Público
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Térmica
OPE	Operação
CON	Construção
OUT	Outorgada entre 1998 e 2004

* As usinas em divisas com outros estados foram consideradas com metade da potência.
 ** Registro refere-se a empreendimentos de potência inferior a 1 MW (hidráulicos) ou 5 MW (outras fontes), que dispensam ato de outorga, sendo necessário apenas o registro na ANEEL. A destinação da energia dos registros é de responsabilidade de seu detentor. A denominação também se refere a empreendimentos com essas características, mas que já haviam recebido a outorga antes da vigência da legislação atual, iniciada a partir de 2008.

CAPACIDADE INSTALADA EM OPERAÇÃO* NO ESPÍRITO SANTO EM 2008

FONTE: ANEEL^[18]

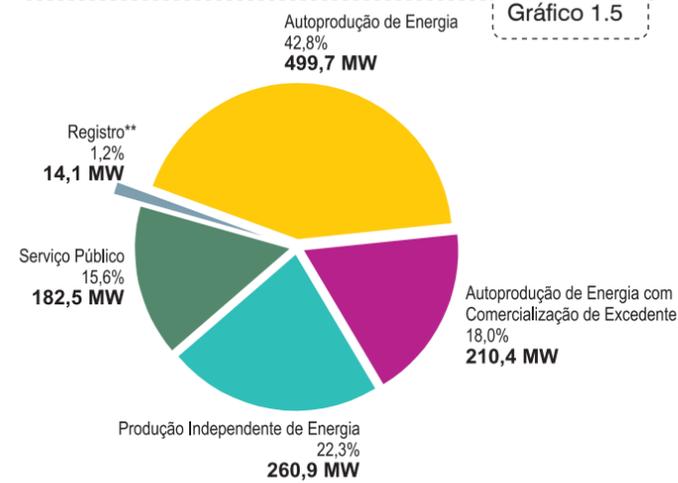
Gráfico 1.4



DESTINO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA* NO ESPÍRITO SANTO EM 2008

(em relação à potência instalada em operação) FONTE: ANEEL^[18]

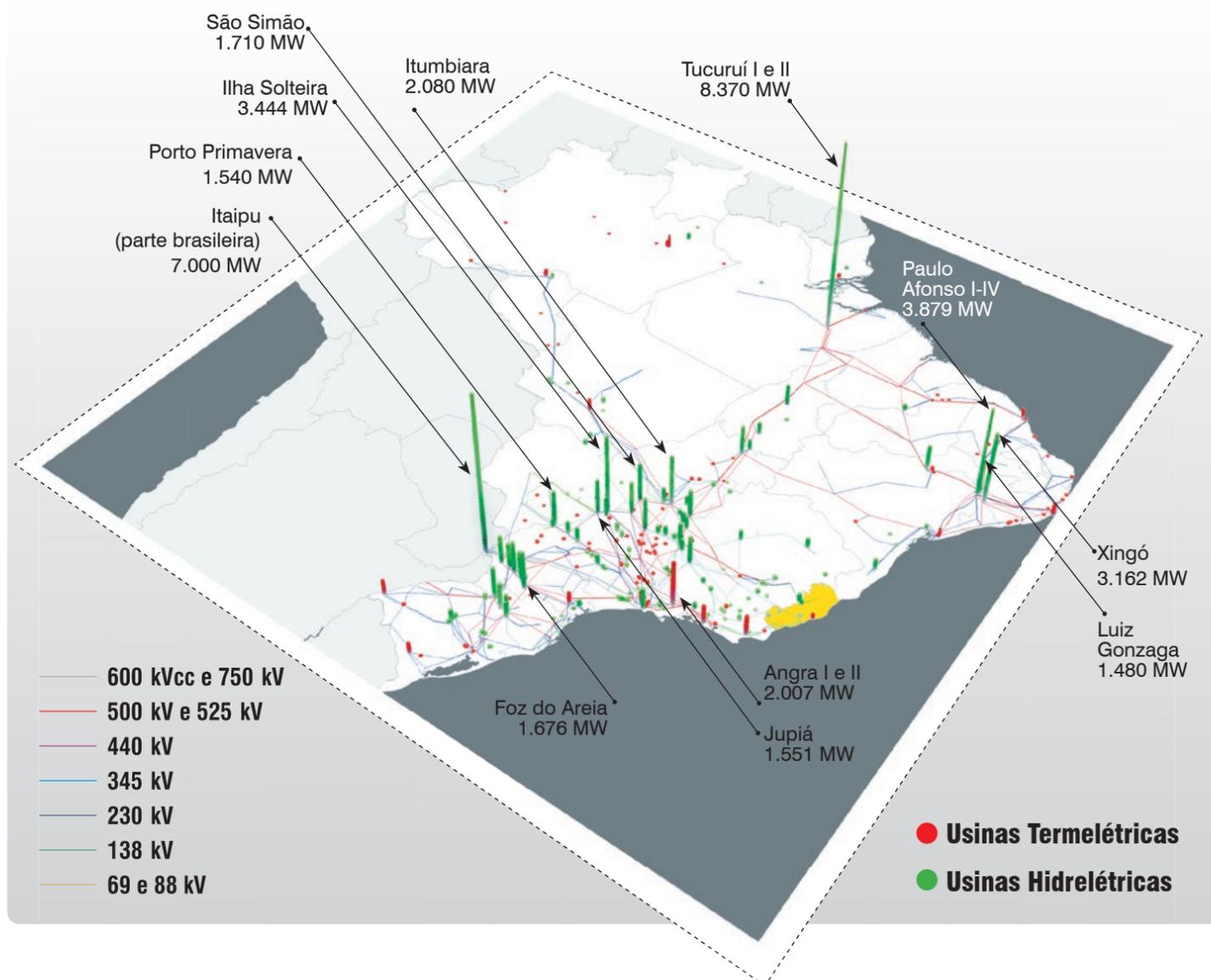
Gráfico 1.5



SITUAÇÃO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

FONTE: ANEEL^{[9],[20]}

Figura 1.5



1 O Estado do Espírito Santo



Figura 1.6
O Rio Doce é o rio com o maior potencial hidrelétrico do Estado (na sua porção oeste), além de constituir-se uma hidrovia.



Figura 1.7
Linha de Transmissão Cacimbas-Linhares.

Figura 1.8
Porto de Ubu, que serve à SAMARCO Mineração, destacando-se a subestação própria.



Figura 1.9
Porto de Barra do Riacho, próximo à Aracruz Celulose, que também tem subestação própria.

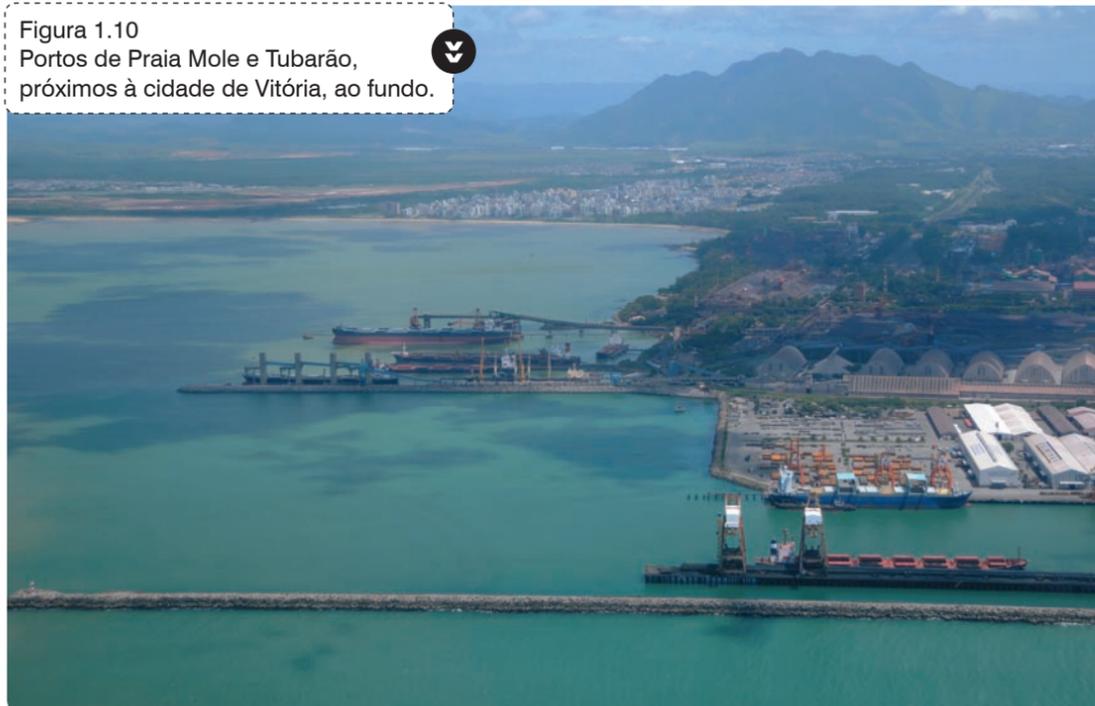


Figura 1.10
Portos de Praia Mole e Tubarão, próximos à cidade de Vitória, ao fundo.

Atlas Eólico

Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento
UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE
Agência de Serviços Públicos de Energia
do Estado do Espírito Santo

- Torres Anemométricas
- Subestações Existentes
- Subestações Planejadas
- Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
- Usinas Térmicas
- LT Planejadas
- LT 345 kV
- LT 230 kV
- LT 138 kV
- LT 69 kV
- LT 34,5 kV
- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- Povoados e Vilas
- Áreas Urbanas
- Lagoas e Mar
- Rios
- Limites Municipais
- Limites Estaduais
- Portos
- Ancoradouros
- Campos de Pouso
- Aeroportos
- Unidades de Conservação de Proteção Integral
- Unidades de Conservação de Uso Sustentável
- Unidades de Conservação não categorizadas pelo SNUC
- Terras Indígenas

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

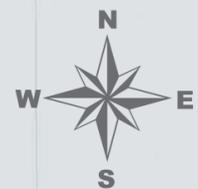


INFRAESTRUTURA

– Sistema Elétrico e Malha Viária –

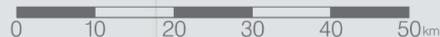
E UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

federais e estaduais



ESCALA 1 : 800 000

Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S – Datum SAD'69



Fontes: ANEEL^[20], ESCELSA^[21], DER-ES^[22], ASPE^[23], além de imagens de satélite de alta resolução do Google Earth e registros feitos por GPS pela Camargo-Schubert em viagens de campo e sobrevoos.



INFRAESTRUTURA
 – Sistema Elétrico e Malha Viária –
E UNIDADES DE CONSERVAÇÃO
 federais e estaduais

Figura 1.11
 Unidade de Processamento de Gás Natural de Cacimbas, em Linhares; possuindo subestação própria, a unidade está estrategicamente situada em uma área com significativo potencial eólico.

1.4 Climatologia

O Estado do Espírito Santo possui clima tropical quente na maior parte de seu território, sendo quente superúmido no litoral norte e área de Vitória, passando a mesotérmico brando na região serrana^[24].

PLUVIOSIDADE:

No Espírito Santo, a estação seca acontece no outono/inverno, sendo, no litoral, atenuada por precipitações relativamente abundantes neste período, causadas por frentes frias provenientes do sul do continente^[25]. Isso é facilmente observado nos mapas da Figura 1.12, elaborados por meio da interpola-

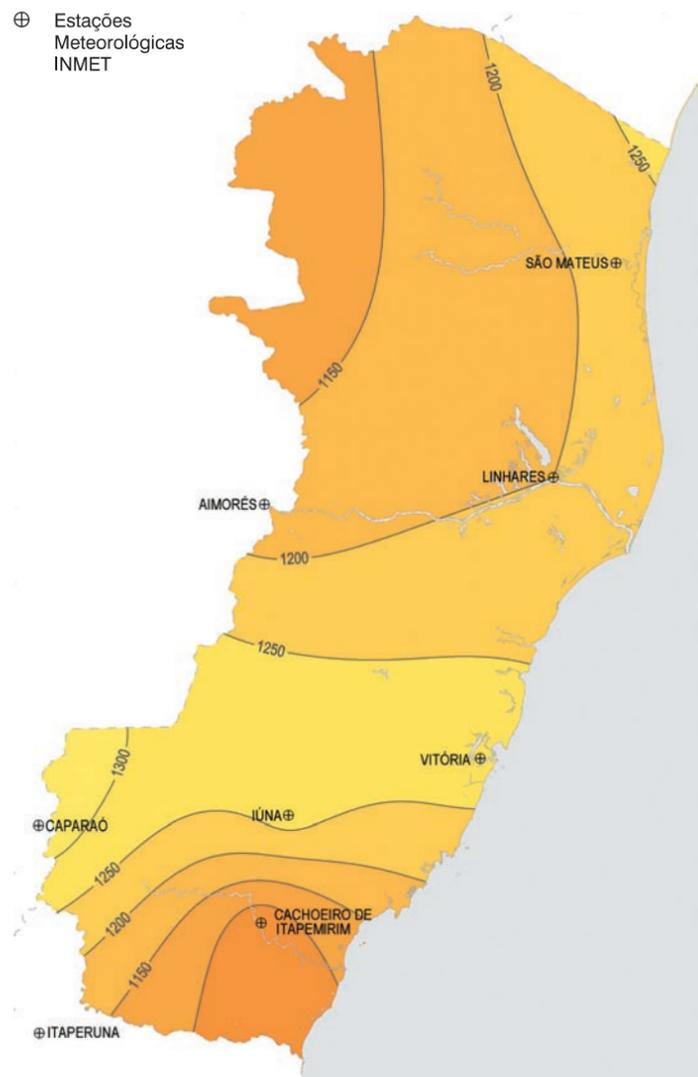
ção das médias históricas de precipitação de 11 estações do INMET^[26] (cinco dentro dos limites do Estado e as demais nas suas proximidades). É perceptível também um aumento das chuvas na região das serras capixabas, notadamente no verão, o que é uma tendência característica do Sudeste brasileiro: maiores precipitações e temperaturas médias mais baixas nas áreas de maior altitude^[27].

TEMPERATURAS:

Como se pode observar nos mapas da Figura 1.13, elaborados a partir de médias climatológicas de estações do Ins-

tituto Nacional de Meteorologia – INMET^[26] ajustadas para a altitude^[28], o relevo complexo é decisivo para o clima no Espírito Santo, que apresenta as temperaturas mais baixas a oeste e as temperaturas máximas nas planícies costeiras. Na maior parte do território, as temperaturas médias são superiores a 18°C durante todos os meses do ano. Excetuam-se as partes mais elevadas da região serrana onde o clima é mesotérmico mediano, com temperaturas atingindo médias inferiores a 10°C nos meses mais frios. A amplitude térmica entre os meses mais quentes e frios do ano fica em torno de 5°C a 6°C na região litorânea, aumentando-se em direção ao interior^[24], ^[25].

⊕ Estações Meteorológicas INMET

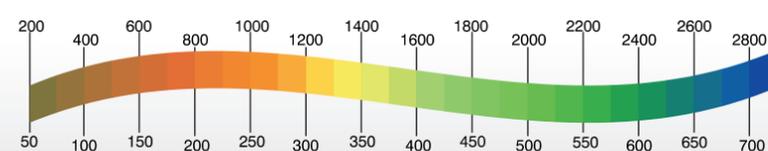


PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL

Mapas desenvolvidos a partir da interpolação de dados climatológicos não homogêneos coletados em 11 estações do INMET^[26] entre 1946 e 1990.

Figura 1.12

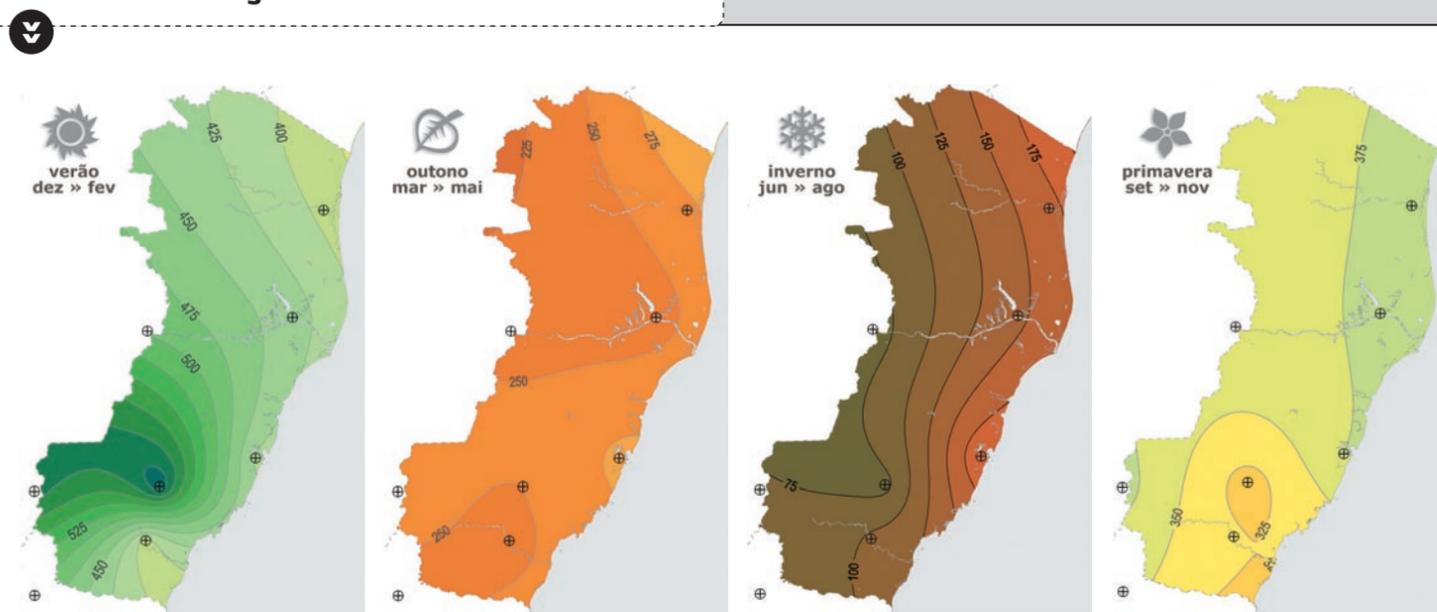
precipitação média (mm)



« Anual

« Sazonal

PRECIPITAÇÃO MÉDIA SAZONAL



Atlas Eólico

● Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento

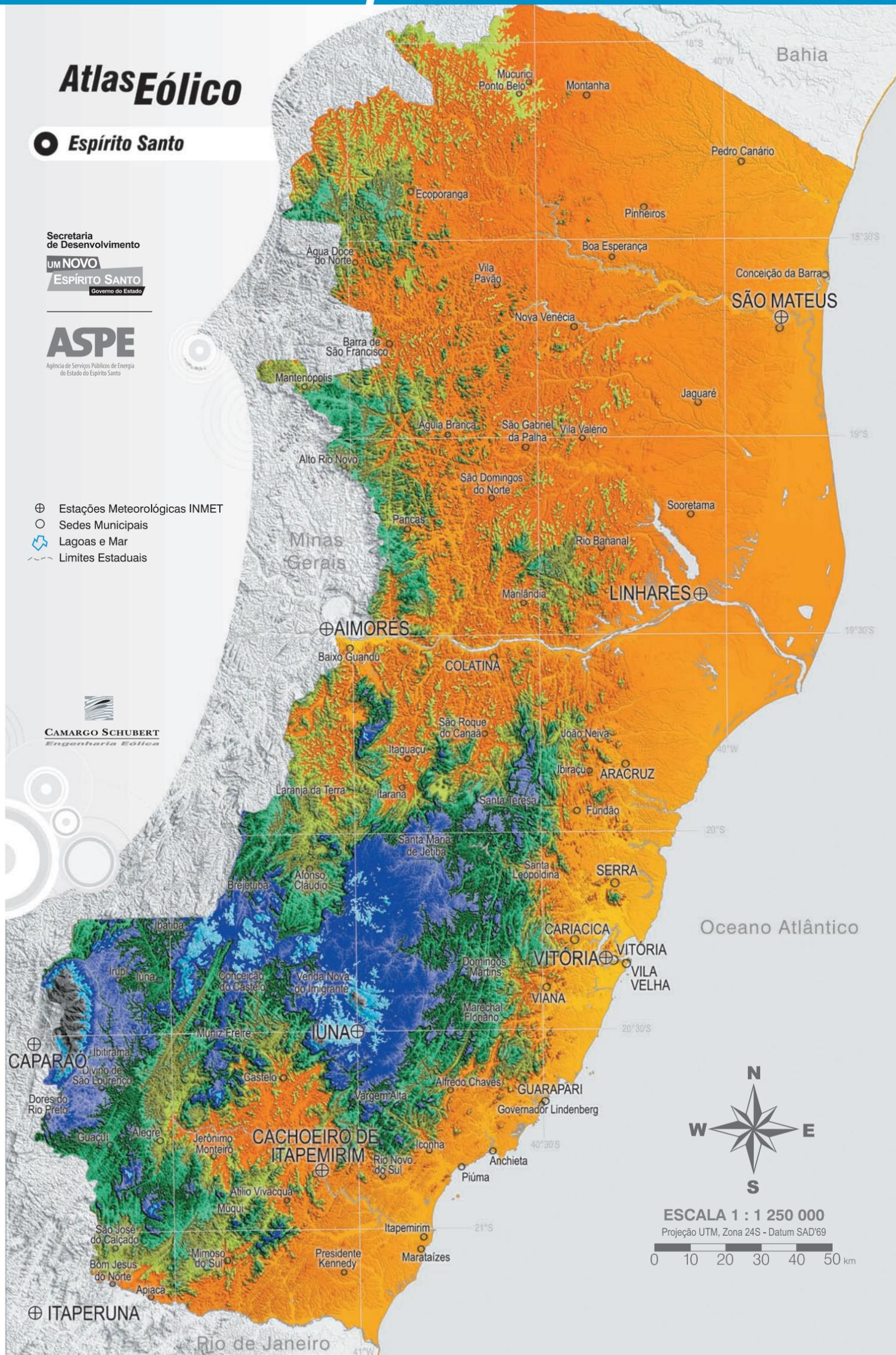
UM NOVO
ESPIRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- ⊕ Estações Meteorológicas INMET
- Sedes Municipais
- 🌊 Lagoas e Mar
- Limites Estaduais

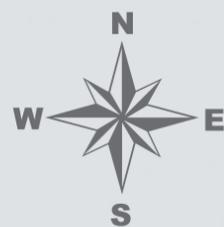
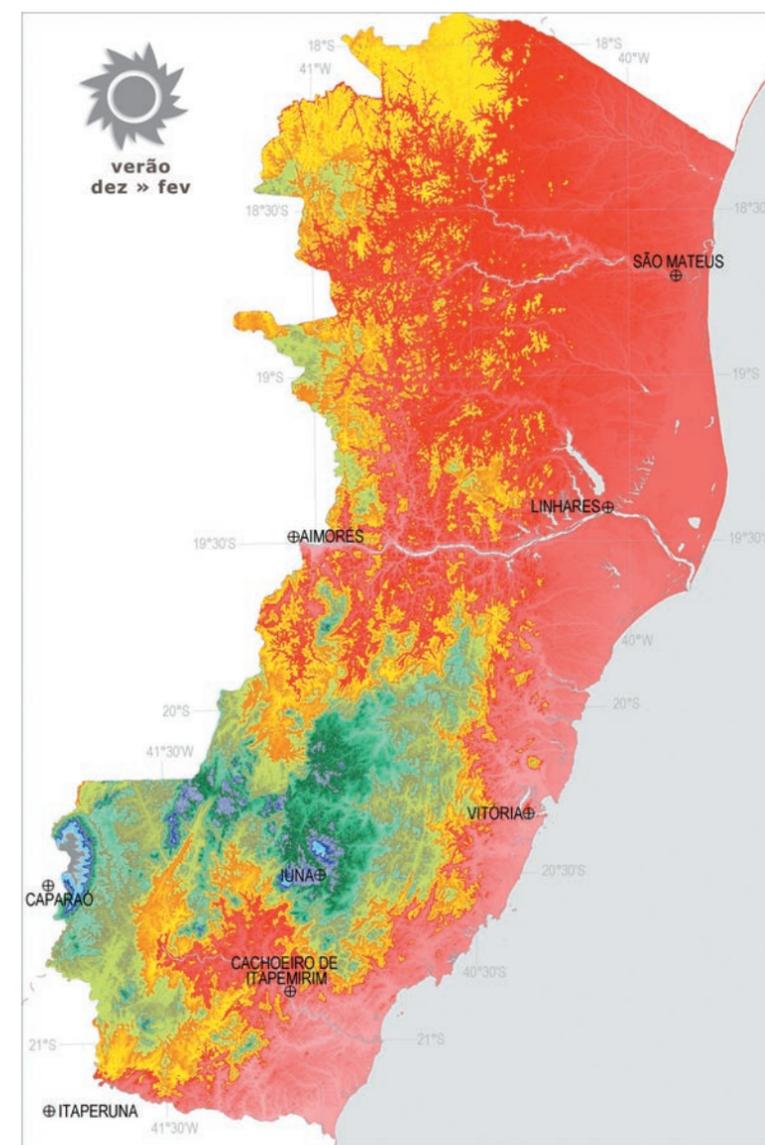
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



▶ TEMPERATURAS MÉDIAS ANUAIS

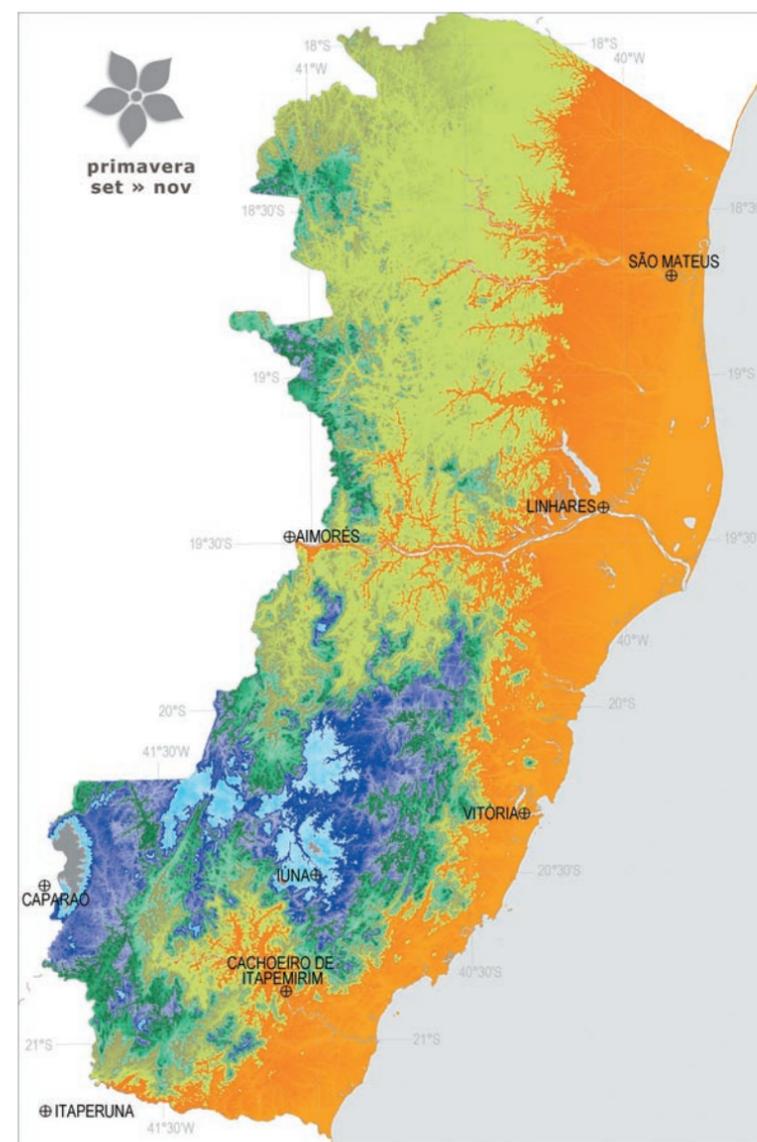
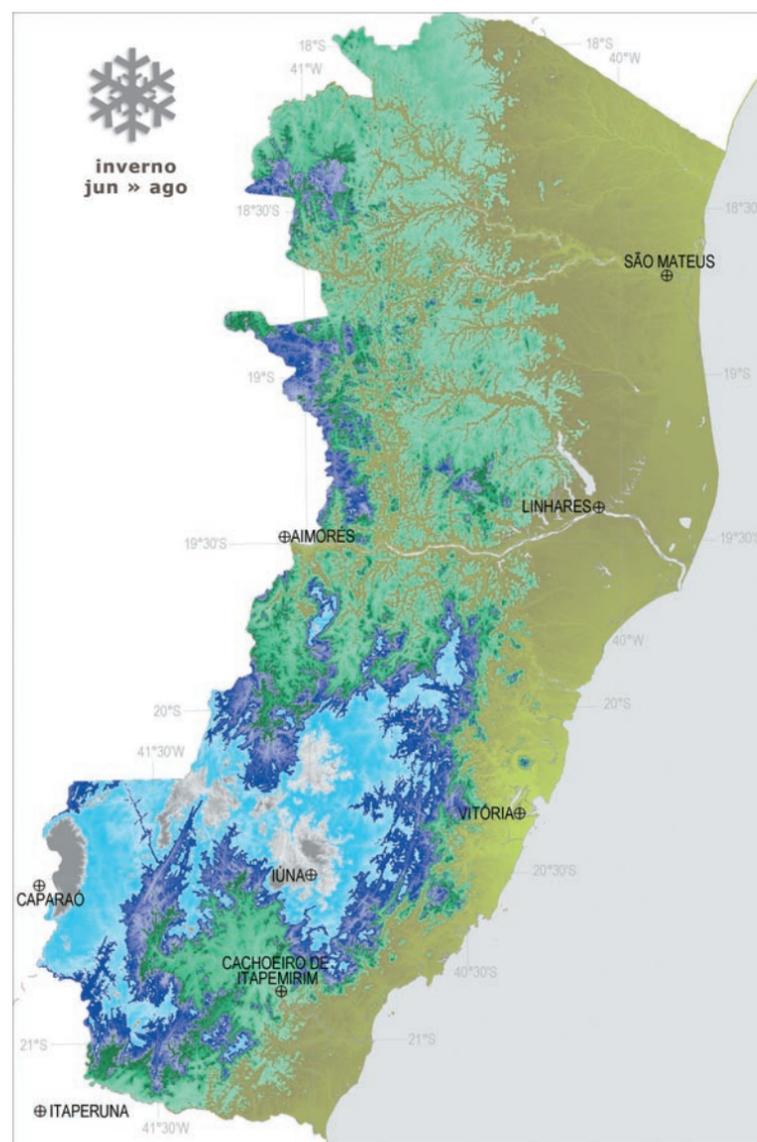
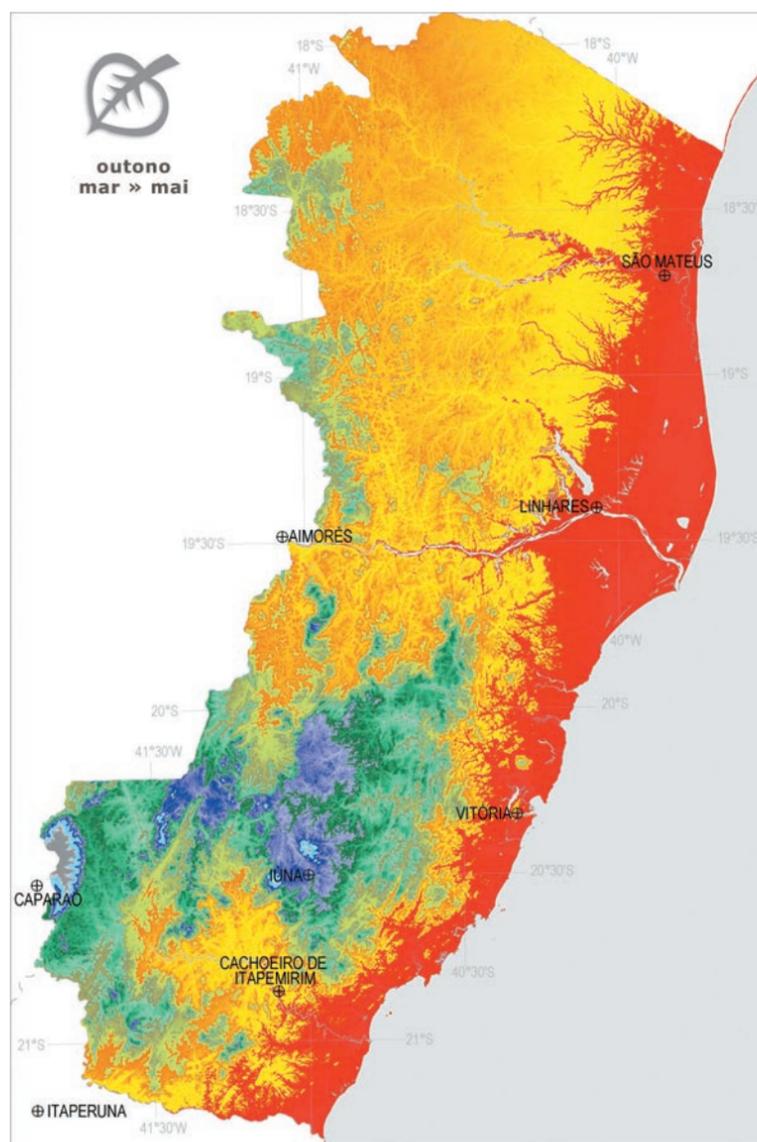
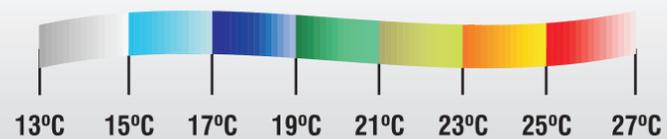
Mapas desenvolvidos a partir de dados climatológicos não homogêneos coletados em 11 estações do INMET^[26] entre 1946 e 1990, ajustados para altitude conforme equações de atmosfera padrão ISA^[28].

Figura 1.13



ESCALA 1 : 1 250 000
Projeção UTM, Zona 24S - Datum SAD'69
0 10 20 30 40 50 km

Temperatura média (°C)



**TEMPERATURAS
MÉDIAS SAZONAIS**

1.5 Regimes de Vento

A distribuição geral dos ventos sobre o Brasil, que afeta o Espírito Santo, é controlada pelas grandes escalas atmosféricas: a escala sinótica e a circulação geral planetária^[29]. Este perfil geral apresenta variações significativas na mesoescala e na microescala, devido à diversidade das características do terreno, tais como geometria e altitude, ocorrência de obstáculos, cobertura vegetal, albedo e grandes extensões de massas de água. Estes fatores atuantes nas escalas menores podem resultar em regimes de vento locais bastante distintos.

O Espírito Santo está situado numa zona de predomínio da influência do centro de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (Figura 1.14), resultando em acentuada ocorrência de ventos de quadrante leste e nordeste. Sobreposto a este mecanismo, agem as intermitentes incursões de massas polares – as frentes frias – resultando em uma marcante sazonalidade. Estes mecanismos são as principais influências na escala sinótica da dinâmica atmosférica, as quais se combinam com os mecanismos de mesoescala, tais como as brisas marinhas, terrestres e lacustres, ventos montanha-vale, jatos noturnos e outros.

As regiões com ventos médios anuais mais intensos no Espírito Santo situam-se nos litorais sul e centro-norte. Como se pode observar na Figura 1.15, a influência da mesoescala é também mais pronunciada ao longo dessa região, atuando através das brisas marinhas e terrestres, criando um ciclo diurno característico com acentuada variação da velocidade do vento ao longo do dia. O litoral sul do Estado apresenta as maiores variações das médias diurnas anuais: no início da manhã, as velocidades atingem um mínimo; com o nascer do sol, o aquecimento do continente acentua a influência das brisas marinhas, que atingem um máximo no período que se estende do meio 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.

No litoral norte do Estado o regime é semelhante, mas a amplitude de velocidades é menor, como se observa no Gráfico 1.6. O gráfico ilustra a diferença entre os regimes de vento medidos nas estações anemométricas de Praia das Neves, ao sul, e Urussuquara, ao norte.



Figura 1.14 – Grandes escalas atmosféricas atuantes nos regimes de vento brasileiro e capixaba.

Na região serrana, os ventos anuais mais intensos são geralmente encontrados nas maiores elevações, onde o efeito de compressão do escoamento atmosférico é mais acentuado. Também ocorrem os efeitos de brisas montanha-vale, acelerações orográficas, eventuais canalizações do escoamento entre passos de montanhas e outros fenômenos decorrentes da topografia e da complexidade do terreno, resultando em um regime diurno em que o vento é normalmente mais intenso no período que vai do final da manhã ao meio da tarde.

No Espírito Santo, as velocidades médias do vento sobre o Estado apresentam uma notável sazonalidade, em geral com 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).

É importante observar, entretanto, que os resultados da campanha de medição não necessariamente correspondem aos apresentados nos Mapas Sazonais do Capítulo 4, os quais foram elaborados com base no modelamento *MesoMap*. O *MesoMap* reflete as variações médias sazonais de longo prazo, que tendem a ser menos acentuadas.

VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA ANUAL

a 48 m de altura [m/s]

● Praia das Neves
● Urussuquara

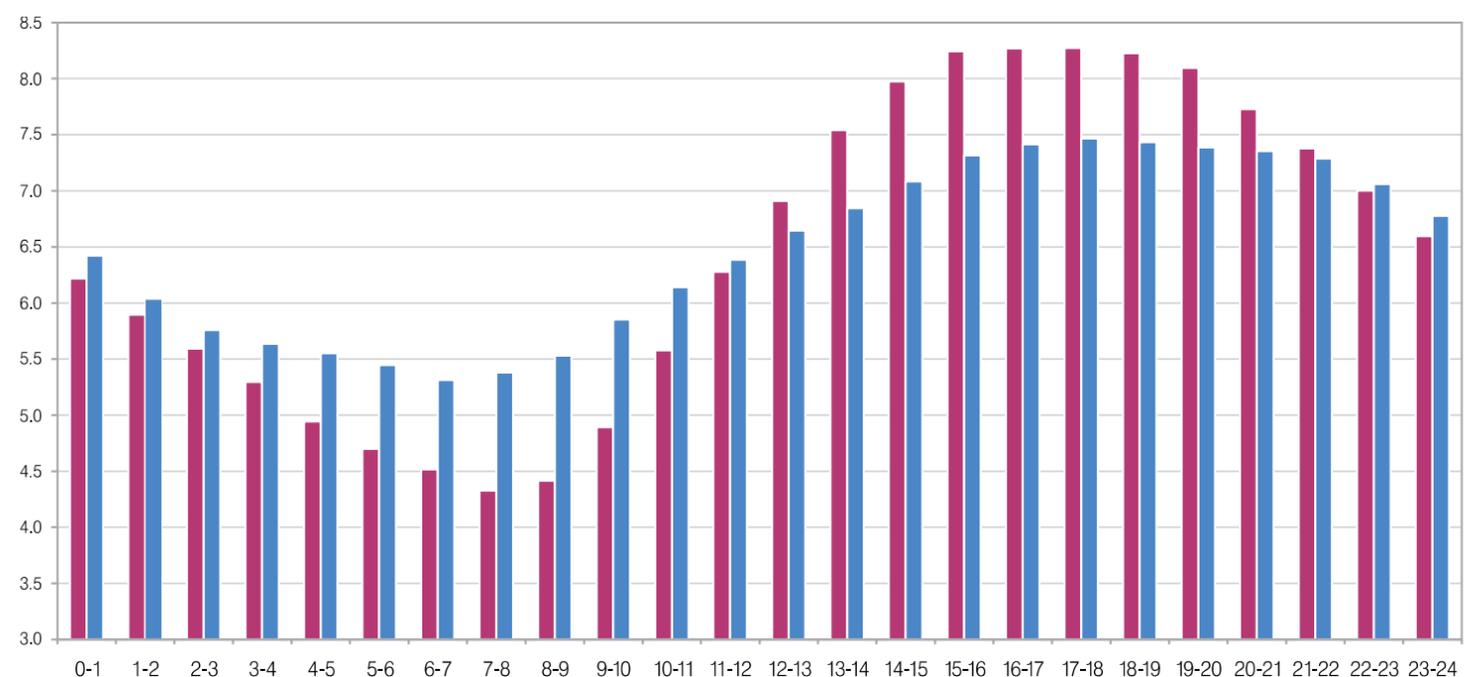


Gráfico 1.6 – Regime diurno anual medido nas estações de Praia das Neves e Urussuquara.

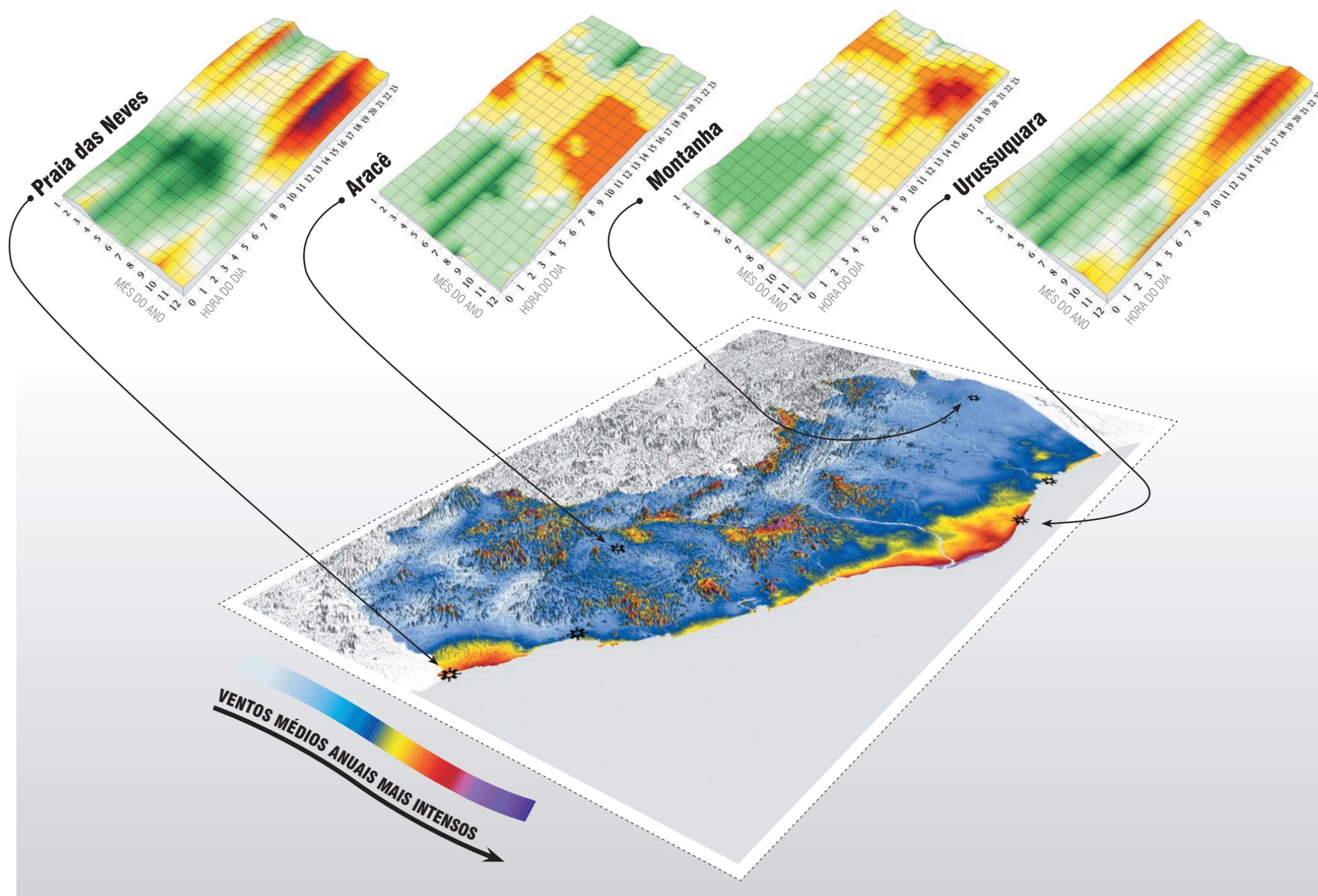
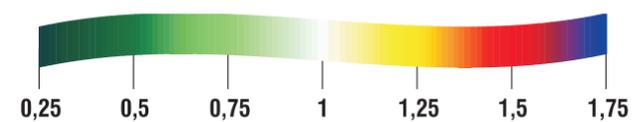
REGIMES DIURNOS E SAZONAIS

Médias horárias normalizadas das velocidades do vento em locais da campanha de medições da ESCELSA, ilustrando os regimes diurnos e sazonais de vento no Estado do Espírito Santo.

Figura 1.15

Velocidade Normalizada

Média Horária / Média Anual



1.6 Unidades de Conservação da Natureza

O Estado do Espírito Santo é inteiramente ocupado pelo Bioma da Mata Atlântica^[30], que é considerado um dos mais importantes do mundo em termos de biodiversidade, estando também entre os mais ameaçados do planeta ([31], *apud* [1]). Segundo o Instituto de Pesquisas da Mata Atlântica – IPEMA, 87% do Estado era originalmente coberto por florestas naturais, valor reduzido a apenas 7% em 2002^[32]. Apesar da intensa exploração, o Espírito Santo ainda abriga uma significativa parcela dessa diversidade, com destaque para a região serrana e a região norte (Rio Doce), onde há altos índices de concentração de espécies endêmicas ([33], *apud* [1]).

Iniciativas em criar áreas protegidas do desmatamento dentro do Estado iniciaram-se na década de 1940, com a criação da Reserva Florestal Barra Seca (1941) e do Parque “Refúgio e Criação de Animais Silvestres Sooretama” (1943). Diversas outras ações se sucederam no decorrer do século, resultando em um sistema de unidades de preservação federais, estaduais e municipais que hoje totaliza 79 áreas, ocupando aproximadamente 1.400 km², ou 3,03% do território capixaba*.

As Unidades de Conservação – UC’s são hoje regulamentadas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC^[34] e classificadas em diferentes categorias de manejo, de acordo com importância e objetivos distintos, e atendendo a um princípio de complementaridade dentro do sistema de unidades de conservação ([35], *apud* [27]). De acordo com as limitações de uso, as categorias são agrupadas em Unidades de Uso Sustentável – UUS e Unidades de Proteção Integral – UPI. As UPI’s são as mais restritivas e nelas são permitidos apenas o “uso indireto dos seus recursos naturais”^[34]. Já as UUS’s permitem a utilização parcial dos seus recursos naturais, admitindo inclusive a presença de moradores.

A seguir, são listadas na Tabela 1.4 as UPI’s e UUS’s federais, estaduais e municipais do Espírito Santo com extensão superior a 300 ha, com base em informações fornecidas pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IEMA, complementadas por dados obtidos nas fontes [1] e [23]. O mapa de Infraestrutura e Unidades de Conservação da p. 17 apresenta a localização das UC’s federais e estaduais do Estado, exceto as Reservas Particulares do Patrimônio Natural, indicando ainda algumas das UC’s municipais. A Figura 1.16 ilustra o aspecto de algumas dessas Unidades de Conservação.

*Para a determinação destes resultados, foram utilizados dados fornecidos pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IEMA, complementados com informações obtidas nas referências [1] e [23].

**18.200 ha no Espírito Santo e 13.653 em Minas Gerais^[1].

UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

do Estado do Espírito Santo com extensão superior a 300 ha

UNIDADES DE PROTEÇÃO INTEGRAL		
Nome	Área (ha)	Esfera
RB de Sooretama	24.250	Federal
PN do Caparaó ^[1]	18.200**	Federal
MN dos Pontões Capixabas	17.393	Federal
RB Augusto Ruschi	3.598	Federal
PE de Itaúnas	3.481	Estadual
RB de Duas Bocas	2.910	Estadual
RB Córrego do Veado	2.392	Federal
RB Córrego Grande	1.504	Federal
PE Paulo César Vinha	1.500	Estadual
PE de Pedra Azul	1.240	Estadual
EEM Ilha do Lameirão	892	Municipal
MN O Frade e a Freira	861	Estadual
RB de Comboios	823	Federal
PE de Mata das Flores	800	Estadual
EE Papagaio	772	Municipal
PE de Forno Grande	730 ^[1]	Estadual
PM Dom Luiz Gonzaga Fernandes	639	Municipal
PNM de Santa Teresa	578	Municipal
PNM do Aricanga	516	Municipal
PNM do Monte Mochuara	436	Municipal
PNM Jacarenema	346	Municipal

UNIDADES DE USO SUSTENTÁVEL		
Nome	Área (ha)	Esfera
APA de Setiba	12.900	Estadual
APA de Conceição da Barra	7.728	Estadual
APA de Guanandy	5.396	Estadual
APA de Goiapaba-Açu	3.740	Estadual
FN do Rio Preto	2.831	Federal
APA Lagoa Grande	2.725	Municipal
APA da Pedra do Elefante	2.561	Estadual
APA do Mestre Álvaro ^[1]	2.461	Estadual
RPPN Recanto das Antas	2.202	Estadual
FN de Goytacazes	1.333	Federal
APA da Lagoa Jacuném	1.153	Municipal
APA do Maciço Central	1.100	Municipal
RDS Concha D’Ostra	953 ^[23]	Estadual
RDS de Cariacica	741	Municipal
ARIE Morro da Vargem	573	Estadual
RPPN Fazenda Cafundó	517	Federal
FN de Pacotuba	451	Federal
APA de Praia Mole	400 ^[1]	Estadual
RPPN Restinga de Aracruz	296	Estadual
APA do Morro do Vilante	~300	Municipal

NÃO CATEGORIZADAS PELO SNUC		
Nome	Área (ha)	Esfera
RE dos Manguezais Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim	1.500~ 2.500	Municipal
REM das Ilhas Oceânicas de Martin Vaz	928	Municipal
EB Santa Lúcia	~450	Federal

FORNTE: DADOS FORNECIDOS PELO IEMA, COMPLEMENTADOS PELAS FONTES [1] E [23], ONDE INDICADO.

Tabela 1.4

1.7 Terras Indígenas

O Espírito Santo abriga três áreas declaradas de posse de comunidades indígenas no município de Aracruz, ao norte de Vitória, regulamentadas pela Fundação Nacional do Índio – FUNAI. Pertencentes aos povos Comboios, Tupiniquins e Caieiras Velhas, e objeto de disputas jurídicas com indústrias locais, essas áreas estão relacionadas na Tabela 1.5 e também são apresentadas no mapa de Infraestrutura e Unidades de Conservação, p. 17.

TERRAS INDÍGENAS	
Nome	Órg. Resp.
TI Caieiras Velhas II	FUNAI
TI Comboios	FUNAI
TI Tupiniquins	FUNAI

FORNTE: ANEEL^[28]

Tabela 1.5

SIGLAS UTILIZADAS

CATEGORIAS	
APA	Área de Proteção Ambiental
ARIE	Área de Relevante Interesse Ecológico
EB	Estação Biológica
EE	Estação Ecológica
EEM	Estação Ecológica Municipal
FN	Floresta Nacional
MN	Monumento Natural
PE	Parque Estadual
PM	Parque Municipal
PN	Parque Nacional
PNM	Parque Natural Municipal
RB	Reserva Biológica
RDS	Reserva de Desenvolvimento Sustentável
RE	Reserva Ecológica
REM	Reserva Ecológica Municipal
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
TI	Terra Indígena

OUTRAS	
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
FUNAI	Fundação Nacional do Índio



Figura 1.16
Alguns locais no Estado do Espírito Santo
com razoável potencial eólico,
mas situados em áreas protegidas
com níveis de restrição diversos.

Área de Proteção Ambiental de Conceição da Barra



Área de Proteção Ambiental Guanandý



Área de Proteção Ambiental de Setiba



Próximo à costa, insere-se nesta APA
o Parque Estadual Paulo César Vinha.



ZIG KOCH



2

Energia Eólica e Tecnologia

○ **Espírito Santo**

- ① **2.1**
A Atmosfera em Movimento
- ② **2.2**
Tecnologia
- ③ **2.3**
Empreendimentos Eólicos

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).

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 do vento apresentam tendências sazonais e diurnas bem definidas, dentro de seu caráter estocástico.

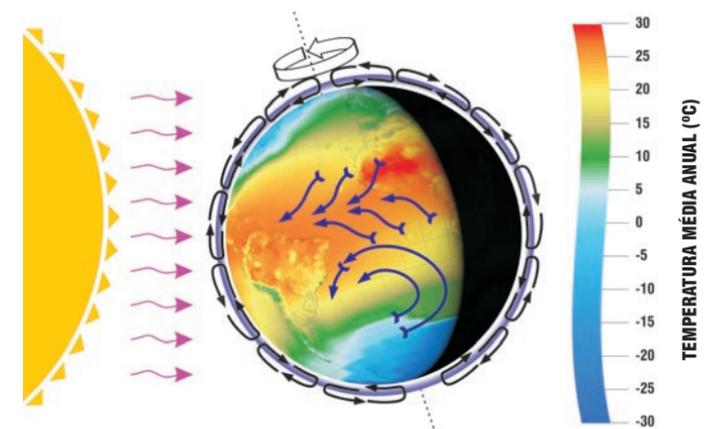


Figura 2.1 – Circulação atmosférica.

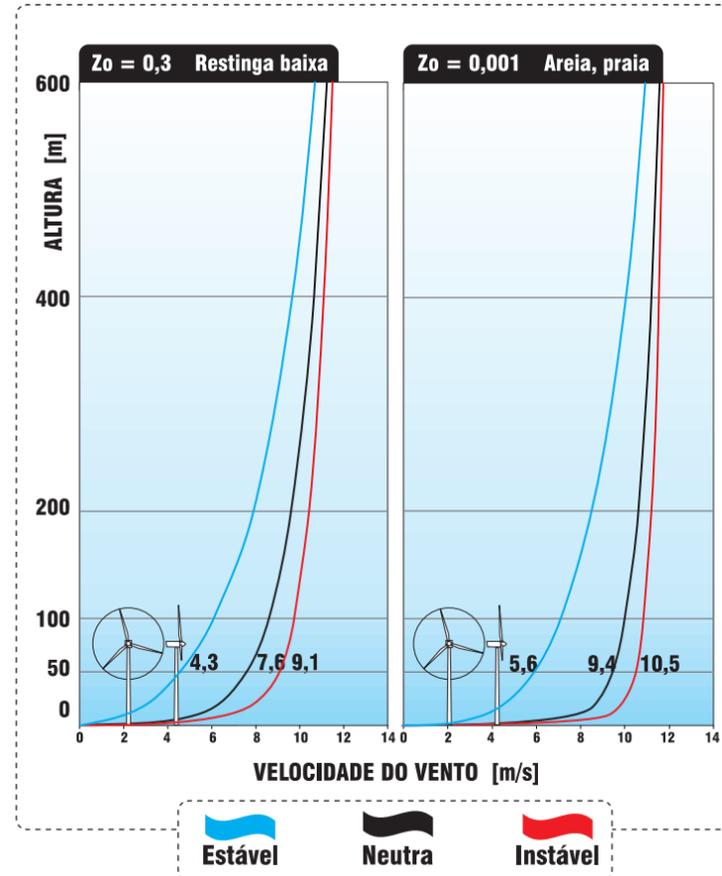


Figura 2.2 – Vento x Altura: efeitos da rugosidade e estabilidade térmica vertical da atmosfera.

O vento pode variar bastante no intervalo de horas ou dias, porém, em termos estatísticos, tenderá a 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 de décadas, em geral, as velocidades médias anuais apresentam variações inferiores a 10% da média de longo prazo^[36]. Os regimes anuais e sazonais são predominantemente controlados pelas grandes escalas atmosféricas: a escala sinótica e a circulação geral planetária^[29].

Em alturas de até 100 m, 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 2.2, são ilustradas as velocidades na camada-limite atmosférica em dois locais planos e contíguos, com cobertura de restinga e areia, 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 instavelmente estratificada).

2.2 Tecnologia

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

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

onde: ρ é densidade do ar (1,225 kg/m³ no nível do mar e a 15°C); A_r é a área varrida pelo rotor ($\pi D^2/4$, sendo D o diâmetro do rotor); C_p é o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor (valor máximo teórico = 0,593; na prática atinge valores máximos entre 0,45 e 0,50, e é variável com o vento, a rotação e os parâmetros de controle da turbina); η é a eficiência do conjunto gerador-transmissões mecânicas e elétricas (aproximadamente 0,93 a 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). 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, as condições de operação da turbina, a rugosidade e a complexidade do terreno e a estabilidade térmica da atmosfera.

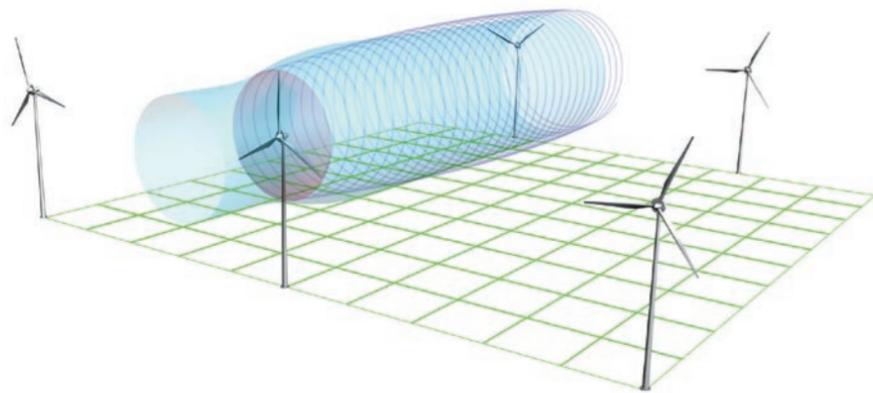


Figura 2.3 – Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas em uma usina eólica.

A tecnologia que possibilita o aproveitamento da força dos ventos para a realização de trabalho já foi amplamente utilizada pela humanidade através dos séculos. Suas primeiras aplicações eram em trabalhos mecânicos, como moagem de grãos, bombeamento de água na Pérsia (Século VII), Europa

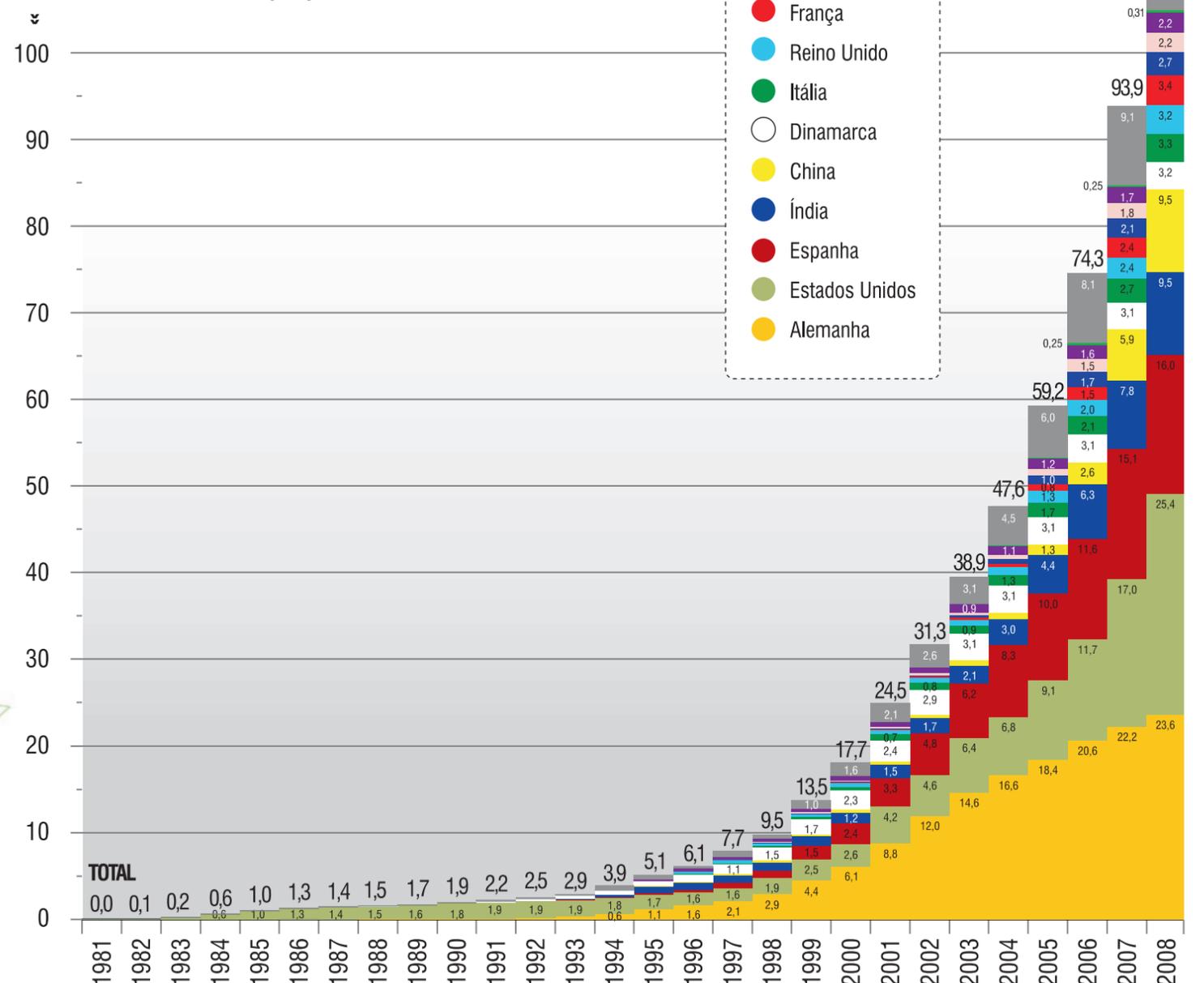
(séculos XIII-XIX) e Estados Unidos (desde 1864). O uso da força do vento para a geração elétrica adquiriu escala na década de 1980, e vem se expandindo no mundo a taxas sempre crescentes, conforme apresentado no Gráfico 2.1^[37].

EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE EÓLICA INSTALADA MUNDIAL

FONTE: THE WIND POWER MONTHLY^[37]

Gráfico 2.1

CAPACIDADE INSTALADA (GW)



» PRODUÇÃO INDUSTRIAL: INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO

A rapidez e a alta taxa de expansão da geração eólicoelétrica se devem ao seu aspecto de energia limpa e à escala industrial envolvida no ciclo de efetivação das usinas.



Figura 2.4

O acentuado crescimento do mercado mundial de geração eólica de energia elétrica deve-se em grande parte ao ciclo de sua efetivação, que envolve escala industrial em todas as principais etapas, conforme apresentado na Figura 2.4. Os geradores eólicos encontram-se em franco desenvolvimento tecnológico, tendo como principal tendência o aumento progressivo nas dimensões e capacidades das turbinas. Na Figura 2.5 são ilustradas as dimensões de turbinas disponíveis atualmente no mercado mundial, comparando-as, para melhor visualização, com as de um Boeing 747 – Jumbo. Observa-se que as relações entre potência, diâmetro e altura do rotor podem variar consideravelmente entre os diferentes tipos de turbinas. É ainda importante mencionar que as turbinas eólicas com capacidade de até 3.000 kW já podem ser consideradas como tecnologicamente consolidadas, pela quantidade de máquinas já em operação no mundo. As maiores turbinas ilustradas na figura, em sua maioria, estão disponíveis no mercado e com diversas unidades instaladas; no entanto, ainda podem ser consideradas como em etapa de consolidação tecnológica.

Um aerogerador moderno de grande porte é constituído, basicamente, por um rotor de três pás esbeltas conectado por um eixo a um sistema de geração alojado em uma nacela. A localização e características dos principais componentes e sistemas encontrados na nacela, ilustrados na

Figura 2.7, podem variar significativamente entre os diversos modelos de turbinas atualmente em fabricação. A nacela conecta-se à torre de sustentação por um sistema de controle de azimute (yaw); geralmente em formato tubular, a torre, por sua vez, apoia-se em fundações projetadas especificamente para os sítios a que se destinam.

Os rotores das turbinas eólicas são fabricados de materiais compostos, com tecnologia e requisitos de peso, rigidez e aerodinâmica típicos de estruturas aeronáuticas. A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro D . 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 ^[38]:

$$rpm = \frac{895}{D} + 6,9 \quad (D \text{ em metros})$$

À medida que a tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas, a rotação se reduz: os diâmetros dos rotores no mercado atual variam entre 40 e 126 m, resultando em rotações da ordem de 30 rpm e 15 rpm, respectivamente. As baixas rotações tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em voo, além de adequar as máquinas aos requisitos de ruído, mesmo quando instaladas a distâncias da

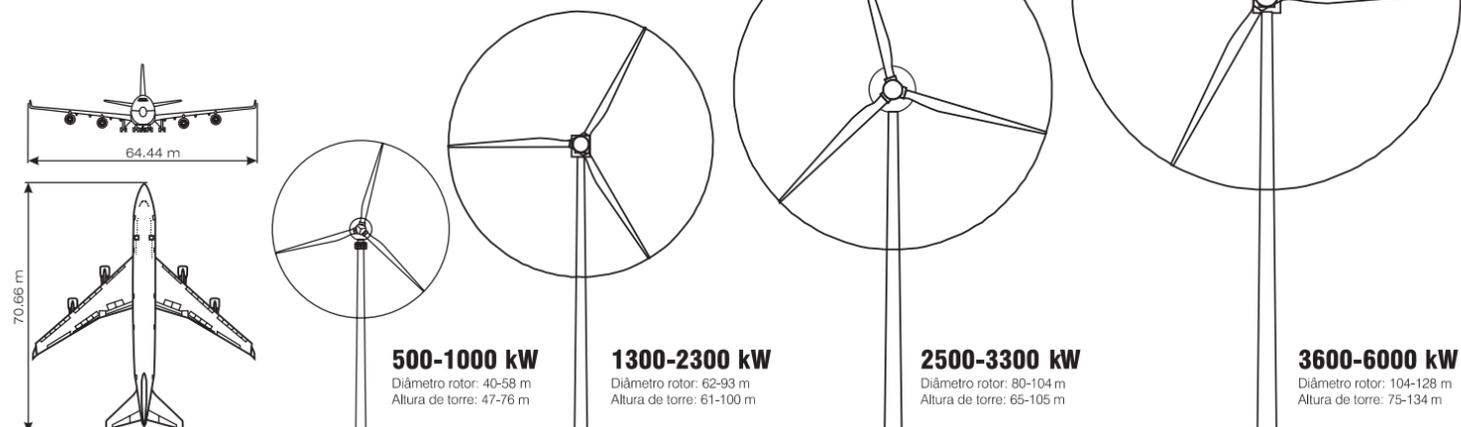


Figura 2.5 – Dimensões típicas das turbinas eólicas disponíveis no mercado atual, comparadas às da aeronave Boeing 747.

ordem de 300 metros de áreas residenciais. Estes aspectos contribuem para que a tecnologia eólicoelétrica 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 nacela – mancais, gerador, sistemas) pode ser estimado de forma aproximada pela fórmula^[38]:

$$\text{Peso}(\text{rotor} + \text{nacela}) = \frac{D^2}{57,8} \quad (\text{toneladas})$$

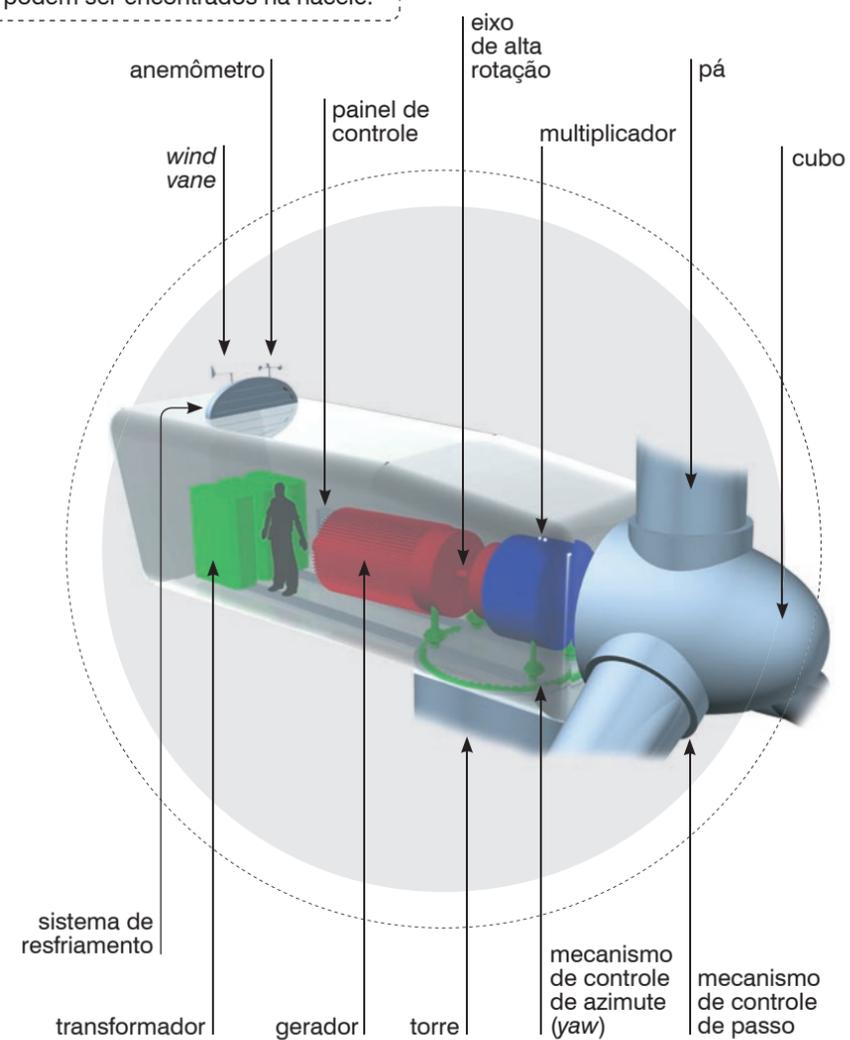
Por essa aproximação, o peso do conjunto no topo da torre é da ordem de 30 t para máquinas de 40 m de diâmetro, e será da ordem de 170 t para turbinas de 100 m de diâmetro. Dessas ordens de grandeza e da análise da expansão do mercado eólico, pode-se concluir que a geração eólicoelétrica constitui um segmento importante no consumo de aço e resinas para materiais compostos, com geração de empregos em todo o ciclo produtivo. O Brasil já participa desse mercado industrial, com as exportações de pás da WOBLEN Windpower (Sorocaba, SP e Pecém, CE), da TECSIS Sistemas Avançados (Sorocaba, SP), e também com a produção de aerogeradores da IMPSA Wind (Suape, PE).



Figura 2.6 – Transporte rodoviário de uma pá de rotor eólico de diâmetro superior a 100 m.



Figura 2.7 – Acima: detalhes da nacela, mostrando cubo, rotor e interior; abaixo: esquema com os principais elementos que podem ser encontrados na nacela.



2.3 Empreendimentos Eólicos

Uma usina eólicoelétrica (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 a 3,0 m/s; abaixo destes valores o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente 12,0 a 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, superiores a 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; nesse caso, a rotação das pás é reduzida – por passo ou estol – e a unidade geradora é desconectada da rede elétrica. Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, através de atuadores rápidos, *softwares* e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. É comum o uso da telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos e manutenção.

O aproveitamento da energia eólica requer extensões de área adequada, com velocidades médias anuais de vento que viabilizem a instalação de usinas. Como a produção de energia é bastante dependente das velocidades de vento, a avaliação da viabilidade técnica e econômica de empreendimentos eólicos requer uma predição confiável da energia gerada na usina. Para tanto, a determinação do recurso eólico normalmente requer uma rede anemométrica qualificada (equipamentos com alta confiabilidade, durabilidade e adequadamente dispostos em torres de medições altas, 50 a 70 m, com anemômetros previamente calibrados em túnel de vento e um sistema eficiente de coleta de dados e verificação de falhas)^{[39],[40]}, operando por um período mínimo de um ano. Para a extrapolação dos dados para toda extensão da área, são necessários modelos numéricos específicos, representativos da topografia e rugosidade. Complementarmente deve-se realizar, sempre que possível, estudos de representatividade climatológica dos

dados medidos, através de estudos de correlação e ajustes a partir de dados de 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 (tipicamente 20 anos). É recomendável que as medições anemométricas sejam mantidas por todo o período de operação da usina, possibilitando um acompanhamento contínuo do desempenho das turbinas e melhorando as estimativas de longo prazo.

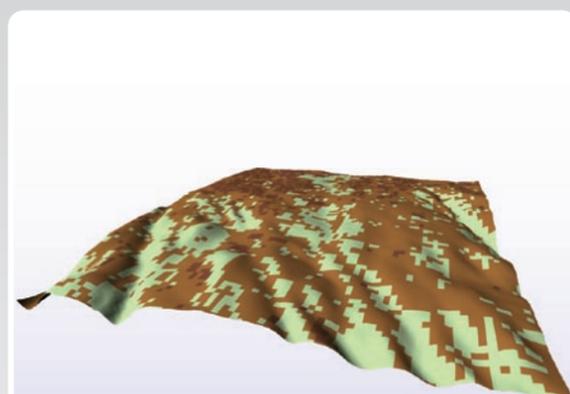
Usualmente, o cálculo da produção energética e a localização das turbinas (*micrositing*) dentro de uma usina eólica levam em consideração a curva de potência das máquinas certificada por órgãos homologadores independentes (DEWI, WINDTEST KWK GmbH, Risoe ou outros), a influência da altitude e da temperatura na densidade local do ar, o fator de disponibilidade esperado e a avaliação das perdas energéticas por interferência aerodinâmica entre rotores^{[41],[42]}. O cálculo do campo de velocidades em toda a área da usina é normalmente realizado por modelos numéricos de simulação de camada-limite^{[43] a [47]}, que extrapolam os dados anemométricos efetivamente medidos, utilizando-se modelos detalhados de relevo e rugosidade, avaliando-se ainda a influência da estabilidade térmica vertical da atmosfera. O processo de otimização envolve o compromisso entre a maximização da energia gerada, o aproveitamento dos fatores condicionantes do terreno e da infraestrutura e o atendimento aos critérios de segurança.

A Figura 2.8 ilustra o processo de otimização e *micrositing* de usinas eólicas.

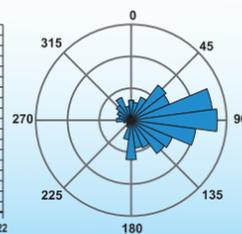
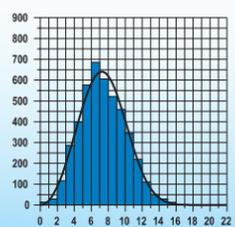
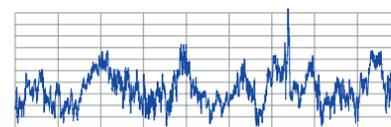


» PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO E *MICROSITING* DE USINAS EÓLICAS

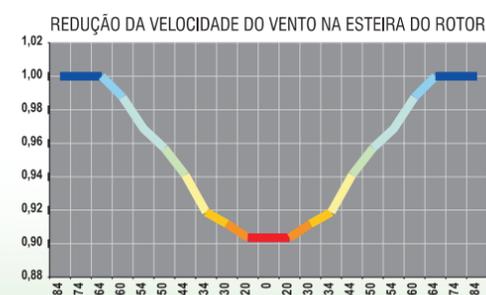
Figura 2.8



MODELOS DIGITAIS: RELEVO E RUGOSIDADE

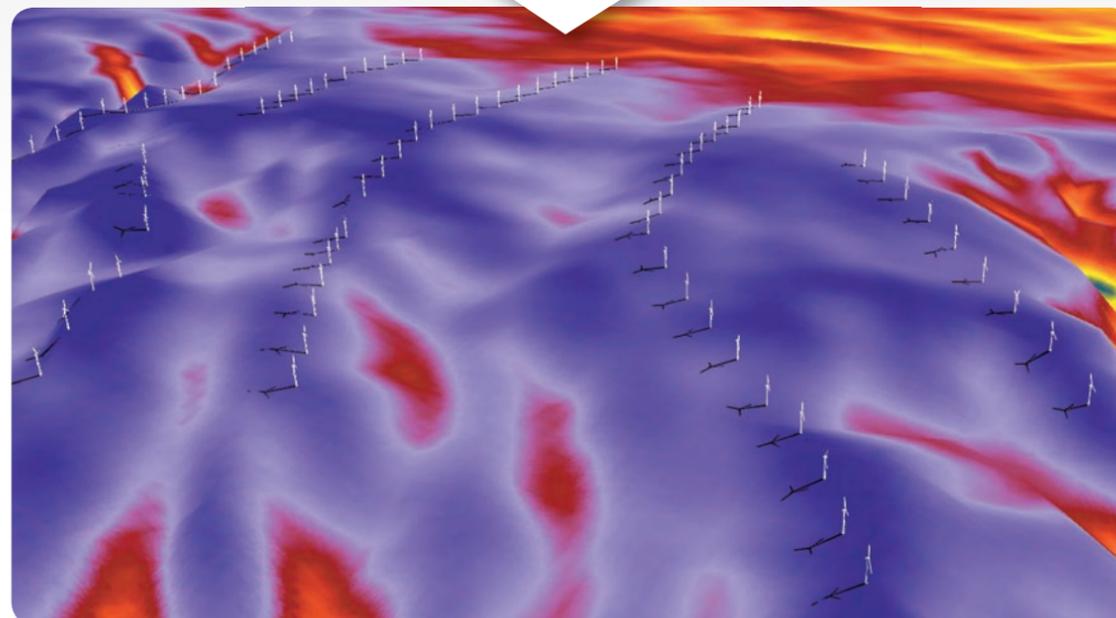


DADOS ANEMOMÉTRICOS



MODELOS DE INTERFERÊNCIA AERODINÂMICA

MODELOS NUMÉRICOS DE CAMADA-LIMITE



- OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA
- MICROSITING*
- ESTIMATIVA DE GERAÇÃO
- ANÁLISE DE VIABILIDADE

ZIG KOCH



3

Metodologia

○ **Espírito Santo**

- ① **3.1**
O Processo de Mapeamento
- ② **3.2**
Medições Anemométricas
- ③ **3.3**
Modelos de Terreno

3.1

O Processo de Mapeamento

O mapeamento do potencial eólico do Estado do Espírito Santo 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 200 m x 200 m. O modelo numérico aplicado foi o *MesoMap*^[48], neste caso constituído por modelamento de mesoescala (*MASS*) na resolução horizontal de 3,6 km x 3,6 km, e posterior interpolação para a resolução final por modelamento tridimensional de camada-limite (*WindMap*)^[47].

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 da *New York State Energy Research and Development Authority – NYSEDA* e *US Department of Energy – DoE*. 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^[52].

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 (e.g., *WAsP – Jackson-Hunt*^[43] ou *WindMap – NOABL*^{[44],[47]}). Esses fenômenos incluem, entre outros, ondas orográficas, ventos convectivos, brisas marinhas e lacustres e ventos térmicos descendentes de montanhas. Finalmente, porque 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 núcleo do sistema *MesoMap* é o *Mesoscale Atmospheric Simulation System – MASS*^[48], 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.

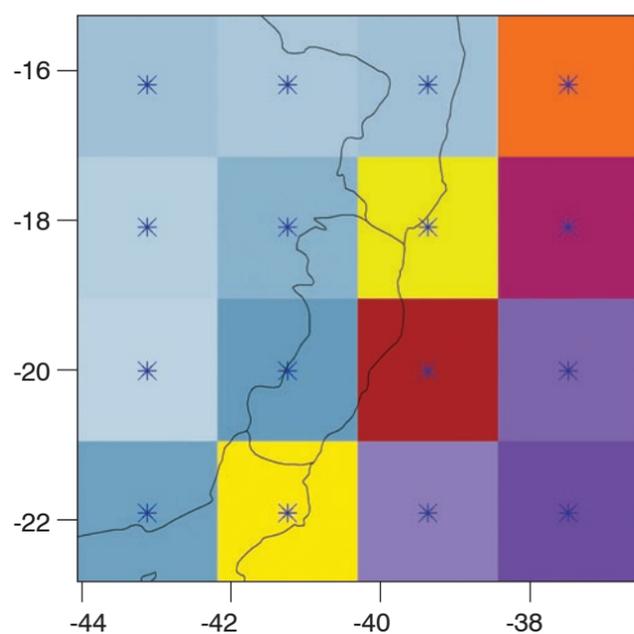
Como é um modelo atmosférico dinâmico, o *MASS* exige grandes demandas computacionais, que requerem o uso de supercomputadores ou redes de estações de trabalho com múltiplos processadores em paralelo. Adicionalmente, o *MASS* também está acoplado a dois módulos de cálculo: o *ForeWind*, um modelo dinâmico de camada-limite viscosa, e o *WindMap*^[47], 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*.

Um amplo conjunto de dados meteorológicos e geográficos é utilizado como entrada para o *MASS*. Os principais dados geográficos de entrada são a topografia, o uso do solo (modelo de rugosidade) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – *IVDN*. Os principais dados meteorológicos de entrada são os provenientes de *reanálises*, radiossondagens e temperatura sobre a terra e oceanos; além destes, são utilizados dados de medições indiretas sobre o oceano realizadas por satélites da *NOAA/NASA*, por meio do sistema *SSM/I – Special Sensor Microwave Imager*. Utiliza-se o termo *reanálises* para certos bancos de dados de malha geográfica global. No modelamento deste estudo foi utilizado o banco de dados de reanálises *NCAR/NCEP Global Reanalysis Project*. Estes dados contêm sequências de parâmetros meteorológicos dos principais níveis de toda a atmosfera terrestre em intervalos de seis horas e em resolução de aproximadamente 210 km (1,875°). Em conjunto com dados existentes de radiossondagens e temperaturas da superfície terrestre, os dados da base de reanálises *NCAR/NCEP* estabelecem as condições de contorno iniciais bem como condições de contorno laterais atualizadas para a progressão das simulações do *MASS*. A partir dessas condições, o modelo determina 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.

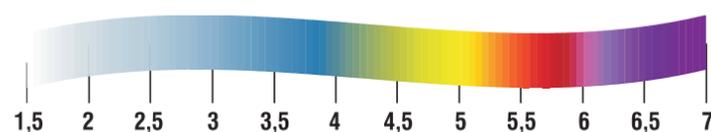
As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram as bases de dados meteorológicos utilizados pelo modelamento de mesoescala, sobre o

» DADOS DE REANÁLISES
 NCEP/NCAR Global Reanalysis Project
 Velocidade média do vento
 Período: 1988 a 2003
 Amostragem: 4 x ao dia (a cada 6h)
 Altitude: Superfície » 10 metros

Figura 3.1



Velocidade média de 15 anos
a 10 m de altura (m/s)



Estado do Espírito Santo, visualizando-se a malha de pontos (*grid*) de dados de reanálises e das medições indiretas sobre o oceano.

Como os dados de reanálises são estabelecidos em uma malha com resolução horizontal relativamente baixa, de 200 km, 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 nesta etapa seja atingida (neste caso, de 3,6 X 3,6 km).

As simulações produzidas pelo *MesoMap* foram realizadas para 360 dias, extraídos aleatoriamente de um período de 15 anos, de forma a considerar cada mês e estação do ano de forma representativa.

O MODELO WINDMAP

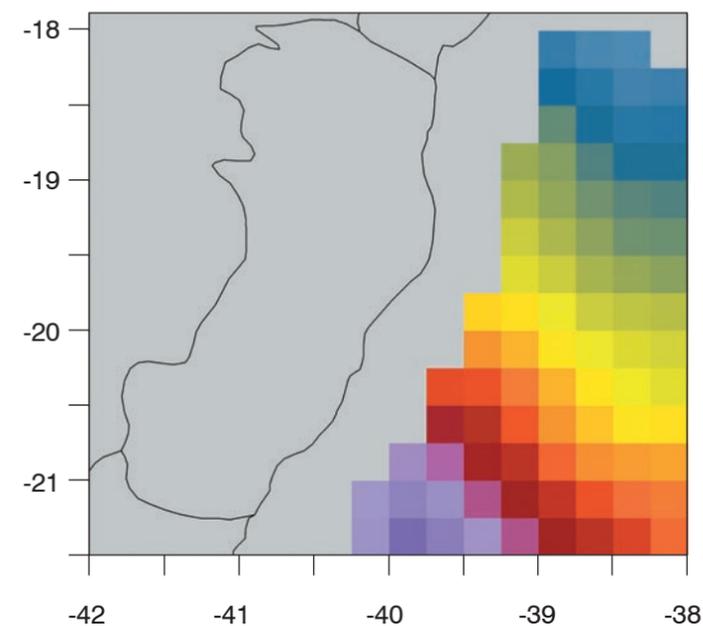
A resolução final dos mapas eólicos (200 m X 200 m) é obtida por meio do *software WindMap*^[47]. Para calcular as velocidades médias e direções de vento, o *WindMap* utiliza o resultado do modelamento de mesoescala *MASS*, juntamente com modelos digitais de terreno (relevo e rugosidade) e dados das medições anemométricas.

Desenvolvimento recente dos métodos baseados na equação da continuidade (conservação de massa ou escoamento não divergente), originários do *Numerical Objective Analysis of Boundary Layer – NOABL*^[44], o *WindMap* utiliza o método dos elementos finitos para calcular o campo de velocidade do escoamento em todo o domínio de cálculo, constituído 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 deste.

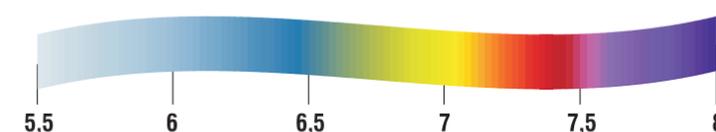
Juntamente com os dados efetivamente medidos nas torres anemométricas, os sumários estatísticos das simulações *MASS* compõem as condições de contorno e dados de inicialização, constituindo-se de estatísticas por direção numa malha regular de 3,6 km x 3,6 km, para distintos níveis de altura sobre o terreno (10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 200 m e 500 m). 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 certo nível de tolerância. O modelamento de

» MEDIÇÕES INDIRETAS SOBRE O OCEANO
 SSMI - Special Sensor Microwave Imager
 Velocidade média do vento
 Período: 1988 a 2003
 Altitude: Superfície » 10 metros

Figura 3.2



Velocidade média de 15 anos
a 10 m de altura (m/s)



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^[49]. 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 a Figura 3.3. O terreno é representado por uma malha regular de m elementos no sentido N-S e n elementos no sentido L-O. No sentido vertical são definidos w elementos e o espaçamento vertical entre os 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.

O resultado do cálculo é um campo de velocidades não divergente, ou seja, que satisfaz a equação da continuidade, ou da 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:

$$u = u_0 + \bar{u} \quad v = v_0 + \bar{v} \quad w = w_0 + \bar{w}$$

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

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

O potencial de velocidade de perturbação é resultante das influências do terreno no campo de escoamento, bem

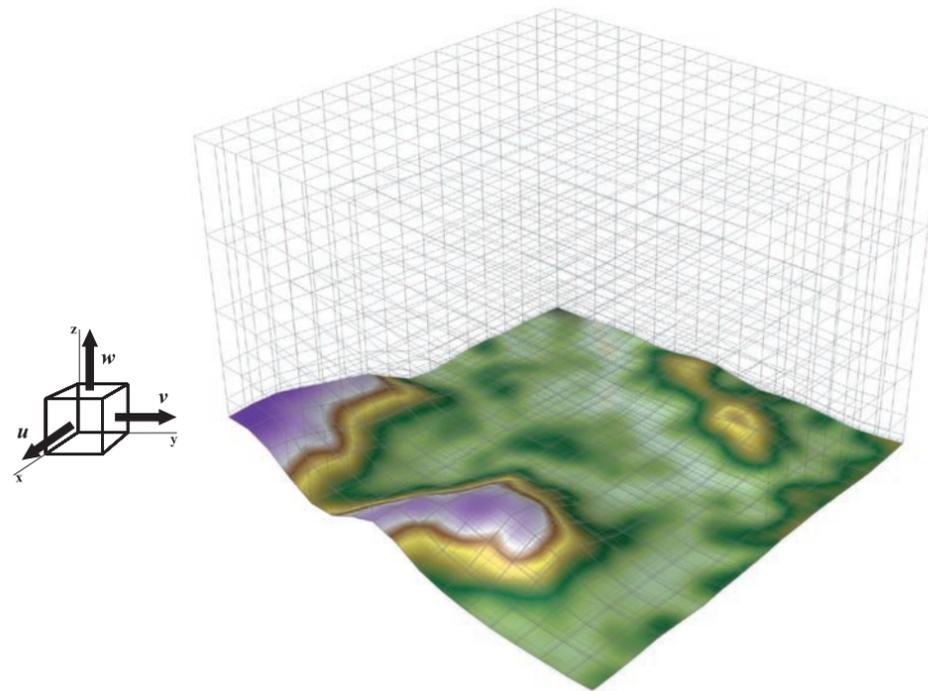


Figura 3.3 – Domínio tridimensional de cálculo do *WindMap*: a malha concentra mais elementos na região próxima à superfície do solo, onde ocorrem os gradientes mais significativos.

como de eventuais erros introduzidos nas condições de inicialização do modelo. Os coeficientes τ_h e τ_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, de modo que a vorticidade inicialmente presente no campo de escoamento é eliminada. Determina-se o potencial de velocidade 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 em [44].

O perfil de velocidade vertical do vento pode ser aproximado pela Lei Logarítmica segundo a relação^[49]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

onde $u(z)$ é a velocidade do vento na altura z , z_0 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^[49]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{L}\right) \right]$$

onde ψ 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 de condições de atmosfera neutra, instável e estável. A referência [49] apresenta as funções de similaridade ($\psi(\zeta)$, $\zeta = (z/L)$) para as diferentes condições de estabilidade atmosférica.

No Apêndice I 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.

RESULTADOS DO MAPEAMENTO:

Os principais resultados da simulação são as velocidades médias anuais e sazonais, calculadas a 50 m, 75 m e 100 m de altura sobre o terreno, as rosas-dos-ventos (frequência e velocidade média por direção) e os parâmetros das distribuições estatísticas de vento. Estes resultados são apresentados nos mapas temáticos do Capítulo 4 para todo o território capixaba.

3.2 Medições Anemométricas

O presente mapeamento contou com uma rede qualificada de 6 torres anemométricas e um período de 16 meses de medições. As torres foram instaladas em locais criteriosamente selecionados, representativos das principais regiões do Estado, em áreas de baixa rugosidade e devidamente afastadas de obstáculos. Para a escolha dessas regiões, foi realizado um mapeamento eólico preliminar, que evidenciou as áreas mais representativas e promissoras para a instalação das torres. Essas áreas foram inspecionadas *in loco*, definindo-se a posição definitiva das torres com o auxílio de Sistema de Posicionamento Global – GPS, imagens de satélite, modelos de topografia e mapa eólico preliminar. Durante as inspeções, é comum observarem-se características da paisagem local que revelam informações sobre o regime de vento, como mostra a figura 3.5. Foram instaladas duas torres no litoral sul (Praia das Neves e Piúma), uma torre na região serrana (Aracê), duas torres no litoral norte (Urussuquara e Guriri) e uma torre no extremo norte do Estado (Montanha). A Figura 3.4 apresenta a posição de instalação das torres anemométricas.



»» POSIÇÃO DAS TORRES ANEMOMÉTRICAS

Figura 3.4



⬆️ Praia de Marobá, no município de Presidente Kennedy.

Figura 3.5

» Torre de monitoramento anemométrico de Praia das Neves.

Figura 3.6



As torres, com 48 m de altura, foram equipadas com anemômetros em dois níveis (30 m e 48 m) e um sensor de direção a 48 m. Todos os anemômetros foram previamente calibrados em túnel de vento, segundo os padrões europeus de certificação^[50]. Foram utilizados armazenadores de dados (*data loggers*) de dois tipos:

- A - registra apenas um resumo das estatísticas medidas, instalados nas torres de Piúma, Aracê, Guriri e Montanha;
- B - registra as estatísticas e toda a série temporal de dados medida no período, instalados nas torres de Praia das Neves e Urussuquara.

Em cada período de medição são registrados os histogramas de velocidade e as velocidades médias e máximas (rajadas) nas duas alturas de medição, as rosas-dos-ventos (frequências de ocorrência e velocidades médias por direção), a frequência de calmarias e as velocidades médias horárias (regime diurno). Para as estações anemométricas com *data loggers* tipo B, além das séries temporais das variáveis médias são registradas ainda as velocidades máximas por direção e as séries temporais instantâneas de ocorrência de rajadas.

A Figura 3.6 mostra a torre anemométrica instalada em Praia das Neves.

TRATAMENTO, VALIDAÇÃO DOS DADOS E AJUSTE CLIMATOLÓGICO:

Os dados anemométricos foram auditados utilizando-se rotinas e algoritmos de validação e verificação, de modo a serem excluídas possíveis falhas (e.g., atrito em anemômetros) ou incoerências nos registros. Após os testes de validação, os registros considerados suspeitos ou ausentes foram analisados um a um; havendo redundância de sensores, neste caso, em diferentes alturas, os valores rejeitados foram extrapolados por análises da correlação serial e/ou da distribuição estatística dos registros correspondentes do outro sensor e também por relações conhecidas entre grandezas físicas na camada-limite atmosférica. Os dados foram então agrupados e consolidados no modelo atmosférico utilizado no mapeamento do Estado do Espírito Santo. Durante a inspeção dos dados, também é possível avaliar as interferências locais de obstáculos ou de topografia, tais como a própria estrutura da torre, por análises direcionais de turbulência e de gradiente vertical de velocidade.

O modelamento *MesoMap* utilizado para este Atlas amostrou dados meteorológicos de reanálises de 15 anos – abrangência que pode ser considerada razoável face à sua representatividade em relação à vida útil de usinas eólicas. Por outro lado, os dados anemométricos considerados (de dezembro de 2001 a março de 2003) cobriram um período pouco superior a um ciclo climatológico mínimo de 12 meses. 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. Os dados também devem possuir um período de simultaneidade com os dados de curto prazo, permitindo a avaliação das correlações entre as séries medidas.

3.3

Modelos de Terreno

Os regimes de vento são fortemente influenciados pela topografia e rugosidade do terreno. Por esta razão, os resultados das simulações de camada-limite são diretamente afetados pela qualidade dos modelos digitais empregados: estes devem ser aferidos por amostragens de validação em campo e comparações com modelos já existentes, e também devem ser georreferenciados, de modo a possibilitar o sincronismo das variáveis de terreno e atmosféricas.

MODELO DE RELEVO

Na missão do ônibus espacial *Endeavour* (missão conjunta NASA-ESA, ano 2000) foi realizado um mapeamento topográfico em alta resolução de quase toda a superfície terrestre, utilizando-se interferometria de dois radares de pequena abertura, instalados em extremidades de uma treliça de 60 m de extensão, levada naquela missão^[51]. A partir do ano de 2003, após o processamento de um grande volume de dados, os resultados deste mapeamento passaram a ser disponibilizados para as comunidades científica e técnica, passando por sucessivos aperfeiçoamentos, correções e validações. Conhecido simplesmente como modelo *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*, a versão utilizada para modelo de relevo do Estado do Espírito Santo, no presente Atlas, é a versão 4.0, lançada em agosto de 2008. Tal versão foi amostrada na resolução de 200 m x 200 m, de modo a permitir um nível de detalhamento e representatividade dos resultados 25 vezes superior ao apresentado no Atlas do Potencial Brasileiro de 2001^[52], o qual foi elaborado com base no modelo topográfico existente na época (GTOPO 30', com resolução de 1000 m x 1000 m).

MODELO DE RUGOSIDADE

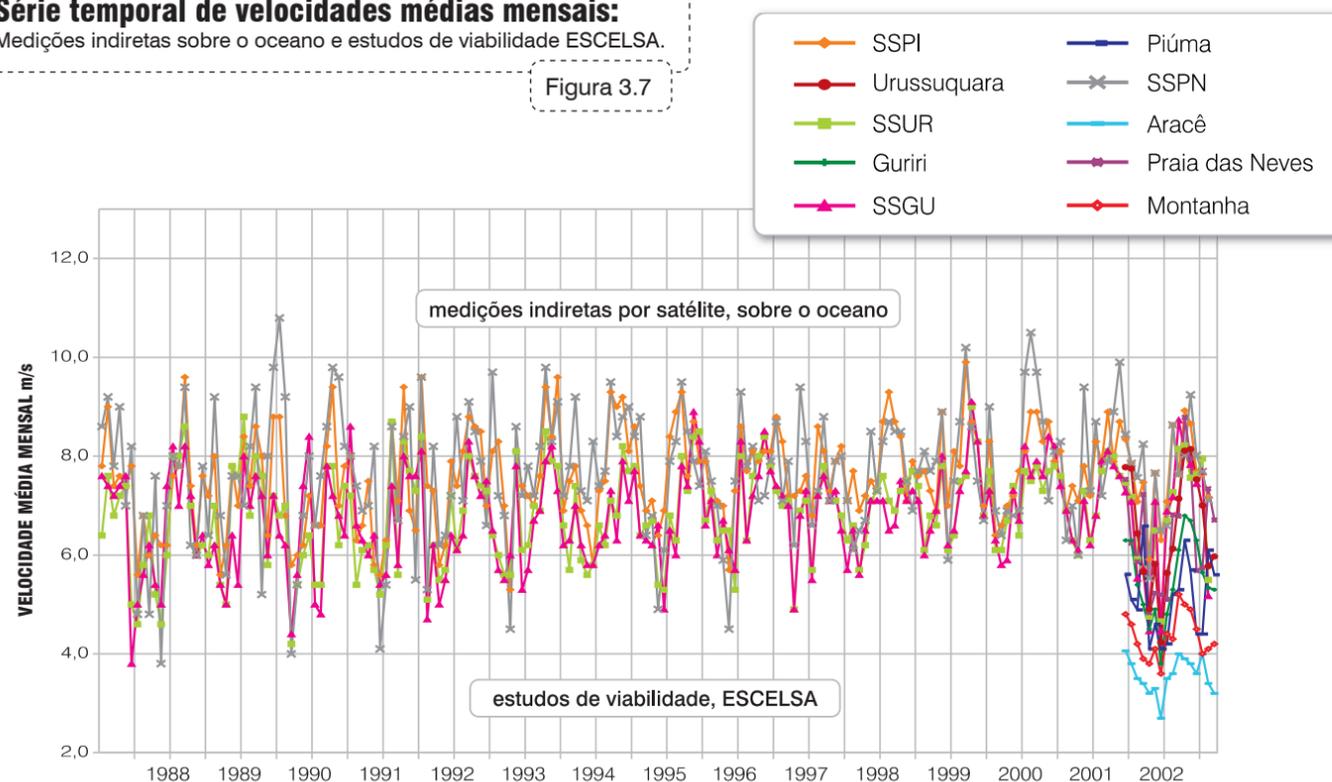
O modelo digital de rugosidade do Estado do Espírito Santo foi elaborado a partir da interpretação do mosaico de imagens *LANDSAT 5*, de aferições por comparação com o Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE), de imagens de alta definição do *Google Earth* e do Modelo de Uso do Solo, desenvolvido pela USGS, Universidade de Nebraska e o *Joint Research Centre* da Comissão Européia. O trabalho foi balizado por aferições realizadas pela CAMARGO SCHUBERT em amostragens de campo, especialmente nas áreas mais representativas e promissoras de potencial eólico.

Nas páginas a seguir são apresentados os modelos de terreno do Estado do Espírito Santo utilizados nos cálculos deste Atlas, bem como a imagem *LandSat 5* utilizada para a elaboração do modelo de rugosidade. Os mapas estão sobrepostos ao relevo sombreado, para complementar a visualização.

Entre os registros de longo prazo disponíveis para serem utilizados em ajustes climatológicos, sobressaíram-se os dados de medições indiretas de ventos de superfície sobre o oceano (fonte: NASA, NOAA). Tais medições têm sido realizadas desde 1987, por meio de sensoriamento remoto a partir de satélites. Os ventos são inferidos por medições de altura e deslocamento das ondas, utilizando-se algoritmos calibrados por medições diretas realizadas em bóias meteorológicas. Há dados para o mesmo período das medições de referência do presente Atlas, sendo que o ajuste climatológico foi aplicado apenas às estações litorâneas, cujo regime de vento é fortemente controlado pela interação das brisas oceânicas e terrestres. A Figura 3.7 mostra a abrangência temporal dos registros anemométricos considerados.

Série temporal de velocidades médias mensais: Medições indiretas sobre o oceano e estudos de viabilidade ESCELSA.

Figura 3.7



Atlas Eólico

Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento

UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

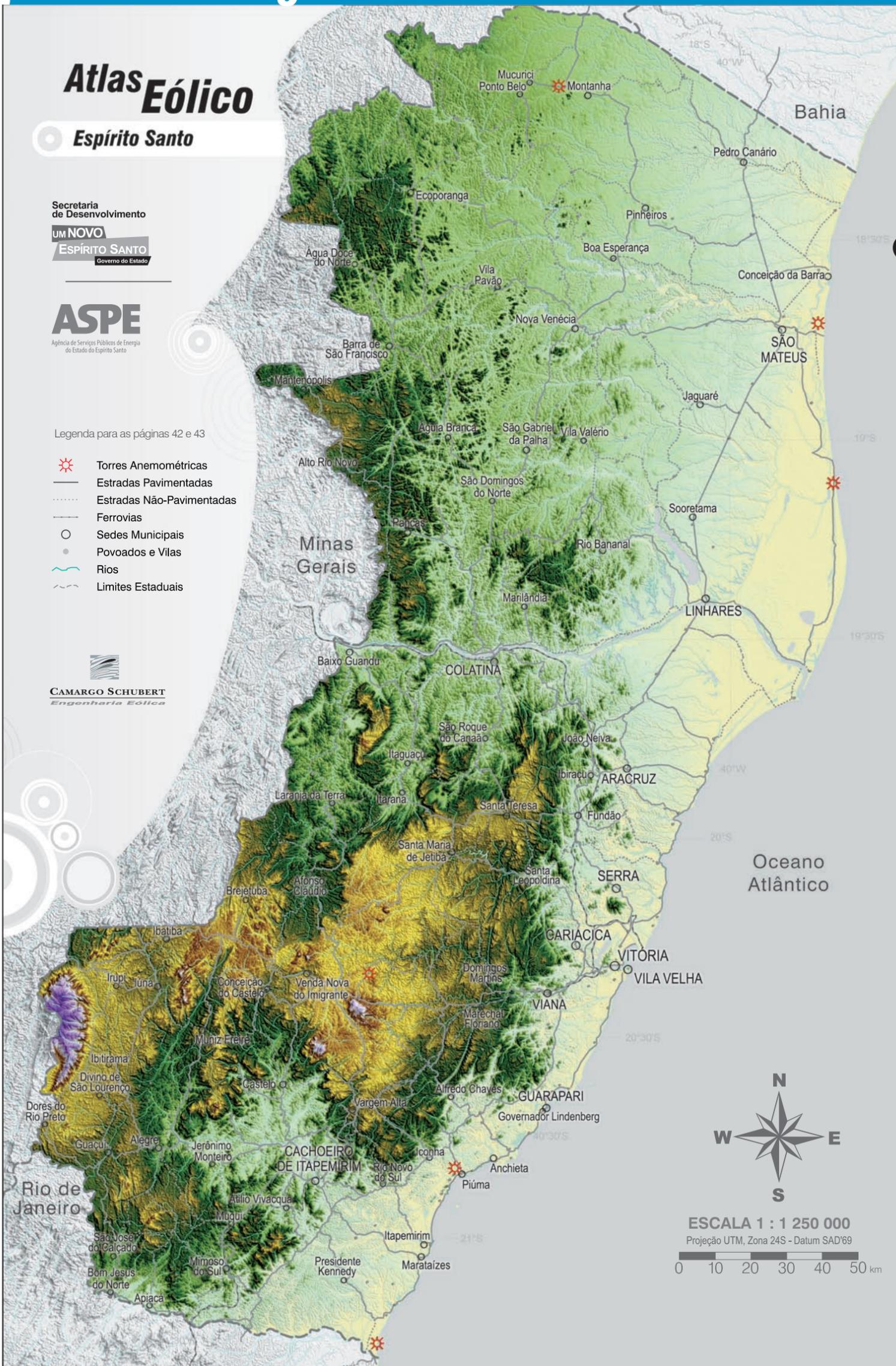
ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

Legenda para as páginas 42 e 43

-  Torres Anemométricas
-  Estradas Pavimentadas
-  Estradas Não-Pavimentadas
-  Ferrovias
-  Sedes Municipais
-  Povoados e Vilas
-  Rios
-  Limites Estaduais

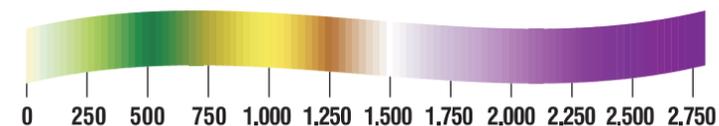

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



MODELO DIGITAL DE RELEVO

Elaborado a partir da base topográfica SRTM – Shuttle Radar Topography Mission, versão 4 – NASA/USGS^[51]

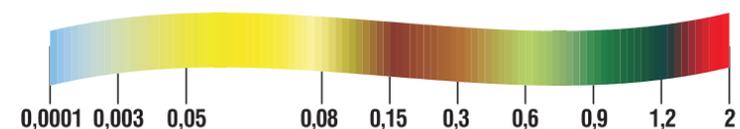
Altitude (m)



MODELO DE RUGOSIDADE

Elaborado a partir do mosaico de imagens LANDSAT 5 (em resolução de 30 m), modelos de vegetação e amostragens realizadas em trabalhos de campo, em resolução de 200 m x 200 m.

Rugosidade (m)



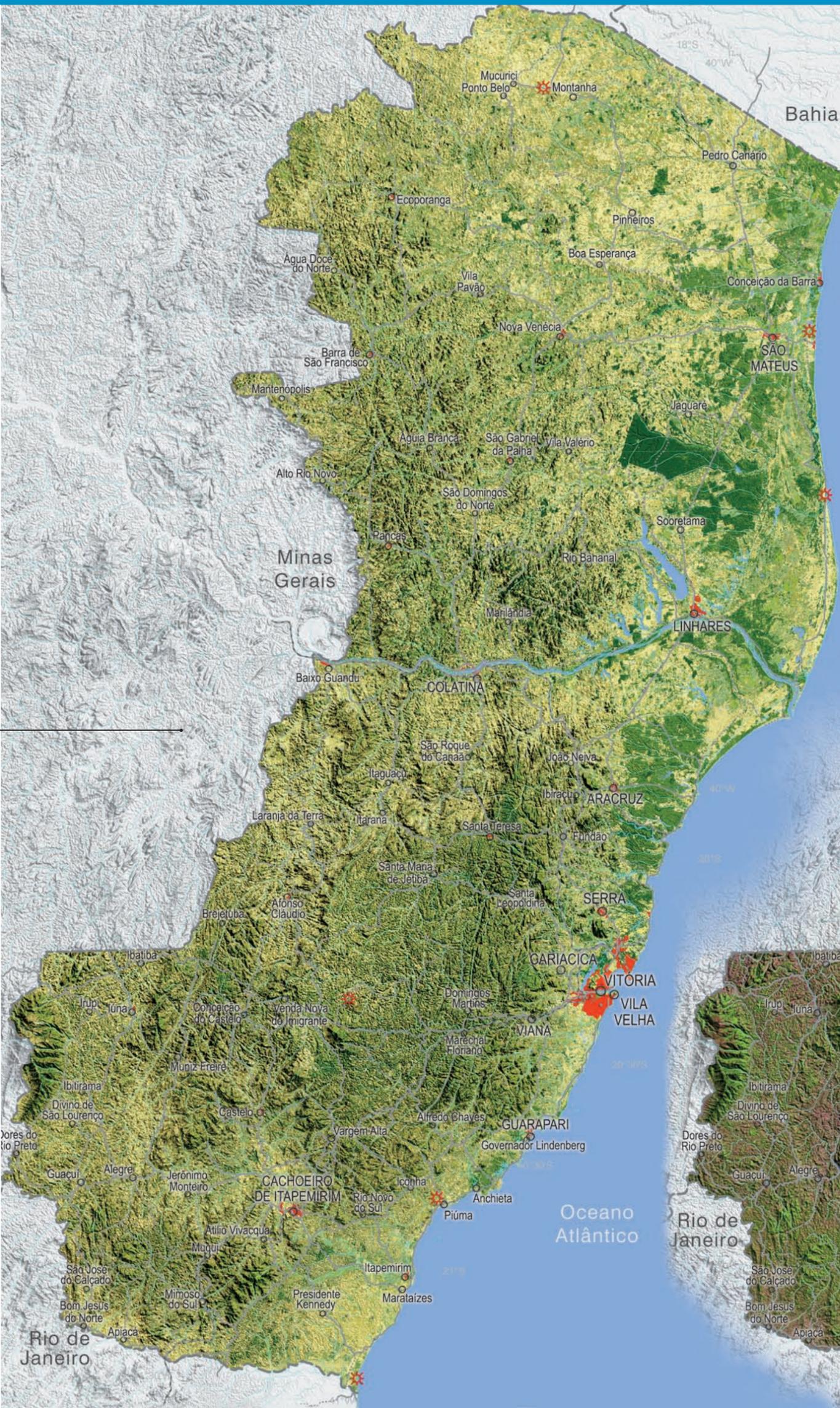
ESCALA 1 : 1 250 000

Projeção UTM, Zona 24S - Datum SAD/69



IMAGEM LANDSAT 5

Canais 3, 4 e 5. Resolução de 30 m x 30 m (à direita da página).





ZIG KOCH

4

Mapas Eólicos

○ **Espírito Santo**

- ④ **4.1**
Rosa-dos-Ventos Anual
» *Frequências x Direção*
- ④ **4.2**
Rosa-dos-Ventos Anual
» *Velocidades Normalizadas x Direção*
- ④ **4.3**
Rosa-dos-Ventos Anual
» *Fluxo de Potência Eólica x Direção*
- ④ **4.4**
Densidade Média Anual do Ar
- ④ **4.5**
Fator de Forma de Weibull Anual
- ④ **4.6**
Potencial Eólico Anual a 50 m de Altura
- ④ **4.7**
Potencial Eólico Anual a 75 m de Altura
- ④ **4.8**
Potencial Eólico Anual a 100 m de Altura
- ④ **4.9**
Potencial Eólico Sazonal a 50 m de Altura
- ④ **4.10**
Potencial Eólico Sazonal a 75 m de Altura
- ④ **4.11**
Potencial Eólico Sazonal a 100 m de Altura

Figura 4.1 – A porção com cobertura vegetal próxima à costa pertence à Reserva Biológica de Comboios. Adjacente a ela, estende-se um terreno de baixa rugosidade, onde as velocidades médias anuais do vento situam-se entre 6,5 e 7,0 m/s, a 75 m de altura.

ZIG KOCH



Atlas Eólico

Espírito Santo

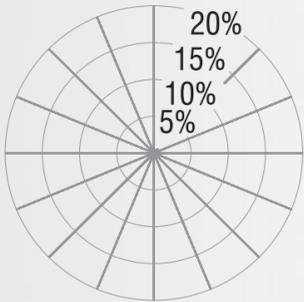
Secretaria de Desenvolvimento

UM NOVO ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

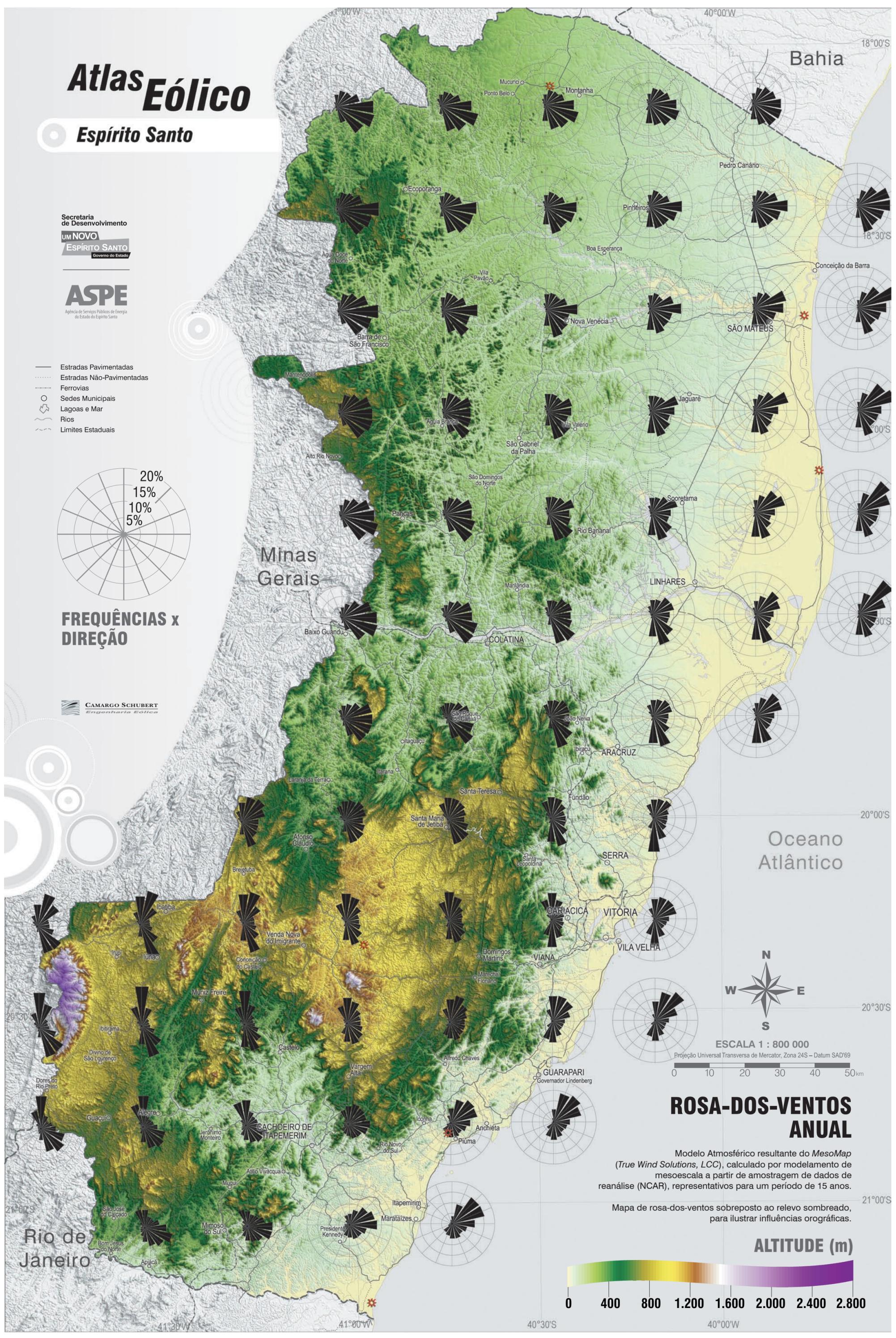
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- ⊕ Lagos e Mar
- Rios
- Limites Estaduais



FREQUÊNCIAS x DIREÇÃO

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



Oceano Atlântico



ESCALA 1 : 800 000

Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S – Datum SAD'69

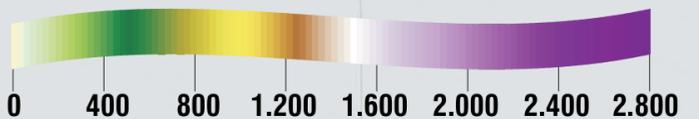


ROSA-DOS-VENTOS ANUAL

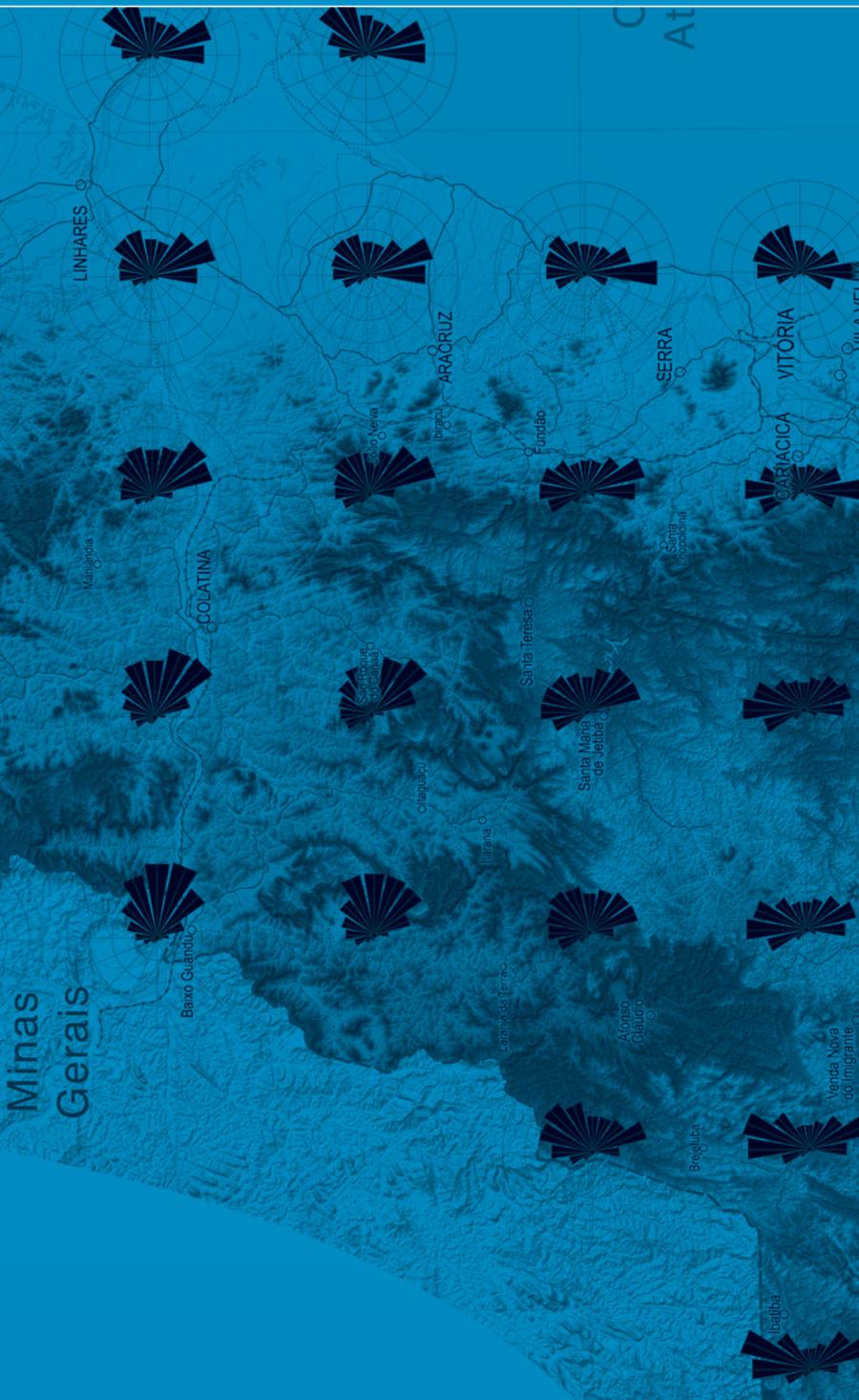
Modelo Atmosférico resultante do MesoMap (True Wind Solutions, LCC), calculado por modelamento de mesoescala a partir de amostragem de dados de reanálise (NCAR), representativos para um período de 15 anos.

Mapa de rosa-dos-ventos sobreposto ao relevo sombreado, para ilustrar influências orográficas.

ALTITUDE (m)



0 400 800 1.200 1.600 2.000 2.400 2.800



ROSA-DOS-VENTOS ANUAL

FREQUÊNCIAS x DIREÇÃO



Figura 4.2
 Os terrenos no interior do município de Linhares são bastante promissores para aproveitamentos eólicos. Observa-se na imagem que as chuvas do verão de 2008/2009 causaram depósitos de água formando veredas, alternando áreas secas e alagadas.

Atlas Eólico

Espírito Santo

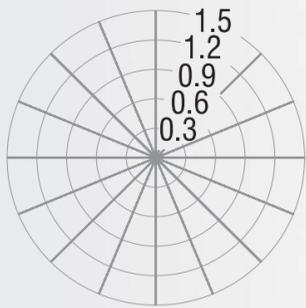
Secretaria de Desenvolvimento

UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

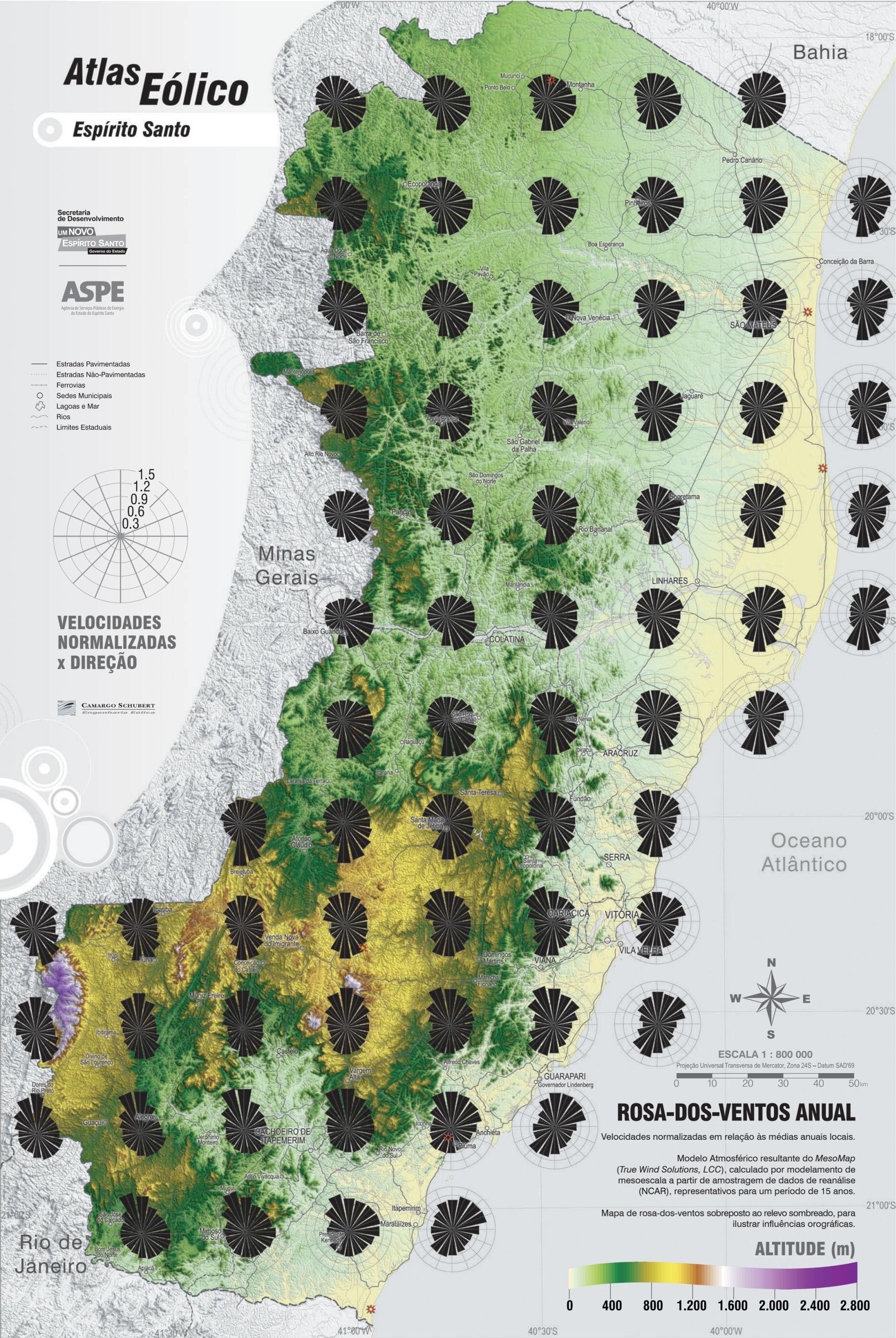
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Estradas Pavimentadas
- - - Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- ⊕ Lagos e Mar
- ~ Rios
- - - Limites Estaduais



VELOCIDADES NORMALIZADAS X DIREÇÃO

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



ESCALA 1 : 800 000

Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S – Datum SAD'69



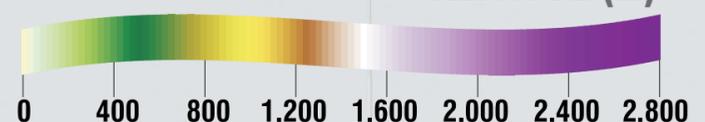
ROSA-DOS-VENTOS ANUAL

Velocidades normalizadas em relação às médias anuais locais.

Modelo Atmosférico resultante do MesoMap (True Wind Solutions, LCC), 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.

ALTITUDE (m)



Atlas Eólico

Espírito Santo

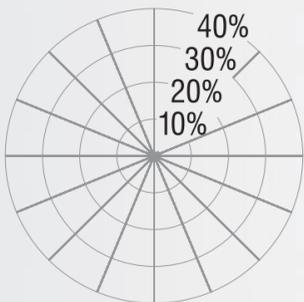
Secretaria de Desenvolvimento

UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

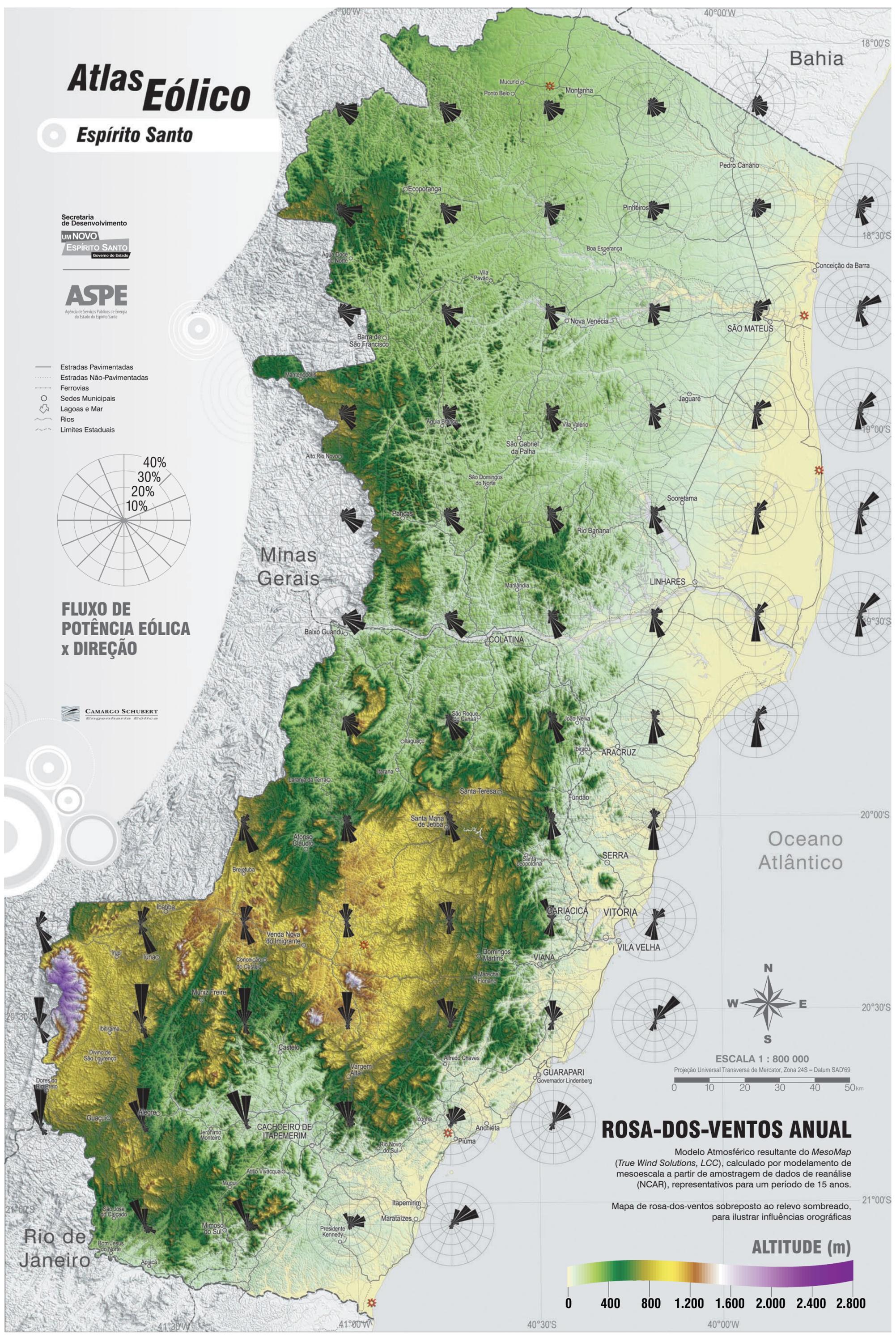
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- ⊕ Lagos e Mar
- ~ Rios
- - - Limites Estaduais



FLUXO DE POTÊNCIA EÓLICA X DIREÇÃO

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

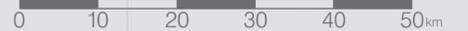


Oceano Atlântico



ESCALA 1 : 800 000

Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S – Datum SAD'69

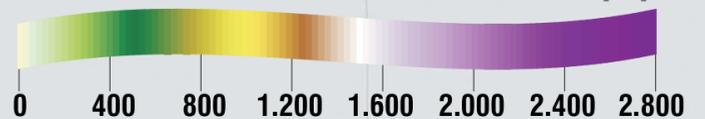


ROSA-DOS-VENTOS ANUAL

Modelo Atmosférico resultante do MesoMap (True Wind Solutions, LCC), 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

ALTITUDE (m)



0 400 800 1.200 1.600 2.000 2.400 2.800

Atlas Eólico

Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento

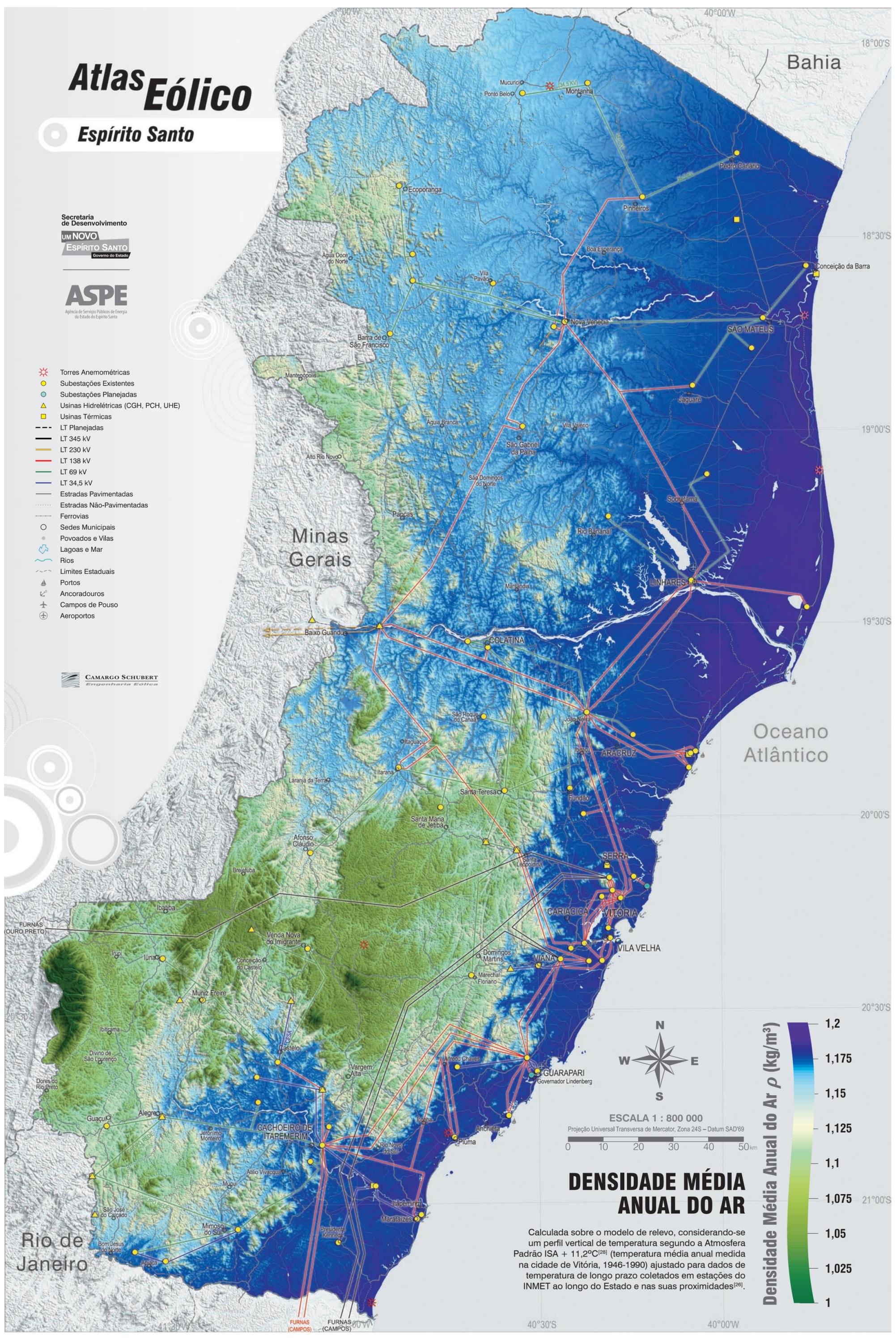
UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

-  Torres Anemométricas
-  Subestações Existentes
-  Subestações Planejadas
-  Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
-  Usinas Térmicas
-  LT Planejadas
-  LT 345 kV
-  LT 230 kV
-  LT 138 kV
-  LT 69 kV
-  LT 34,5 kV
-  Estradas Pavimentadas
-  Estradas Não-Pavimentadas
-  Ferrovias
-  Sedes Municipais
-  Povoados e Vilas
-  Lagoas e Mar
-  Rios
-  Limites Estaduais
-  Portos
-  Ancoradouros
-  Campos de Pousio
-  Aeroportos

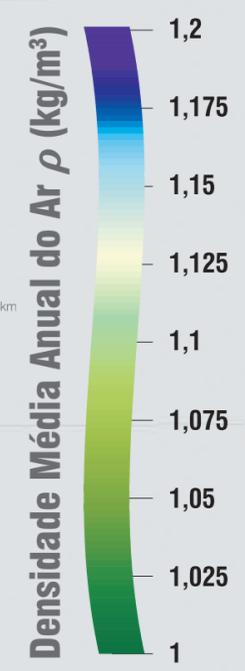
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



ESCALA 1 : 800 000
Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S - Datum SAD'69

DENSIDADE MÉDIA ANUAL DO AR

Calculada sobre o modelo de relevo, considerando-se um perfil vertical de temperatura segundo a Atmosfera Padrão ISA + 11,2°C^[26] (temperatura média anual medida na cidade de Vitória, 1946-1990) ajustado para dados de temperatura de longo prazo coletados em estações do INMET ao longo do Estado e nas suas proximidades^[26].





DENSIDADE MÉDIA ANUAL DO AR



Figura 4.5
Município de Marataízes, litoral sul do Estado do Espírito Santo. A região possui características propícias ao desenvolvimento de projetos eólicos.

Atlas Eólico

Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento

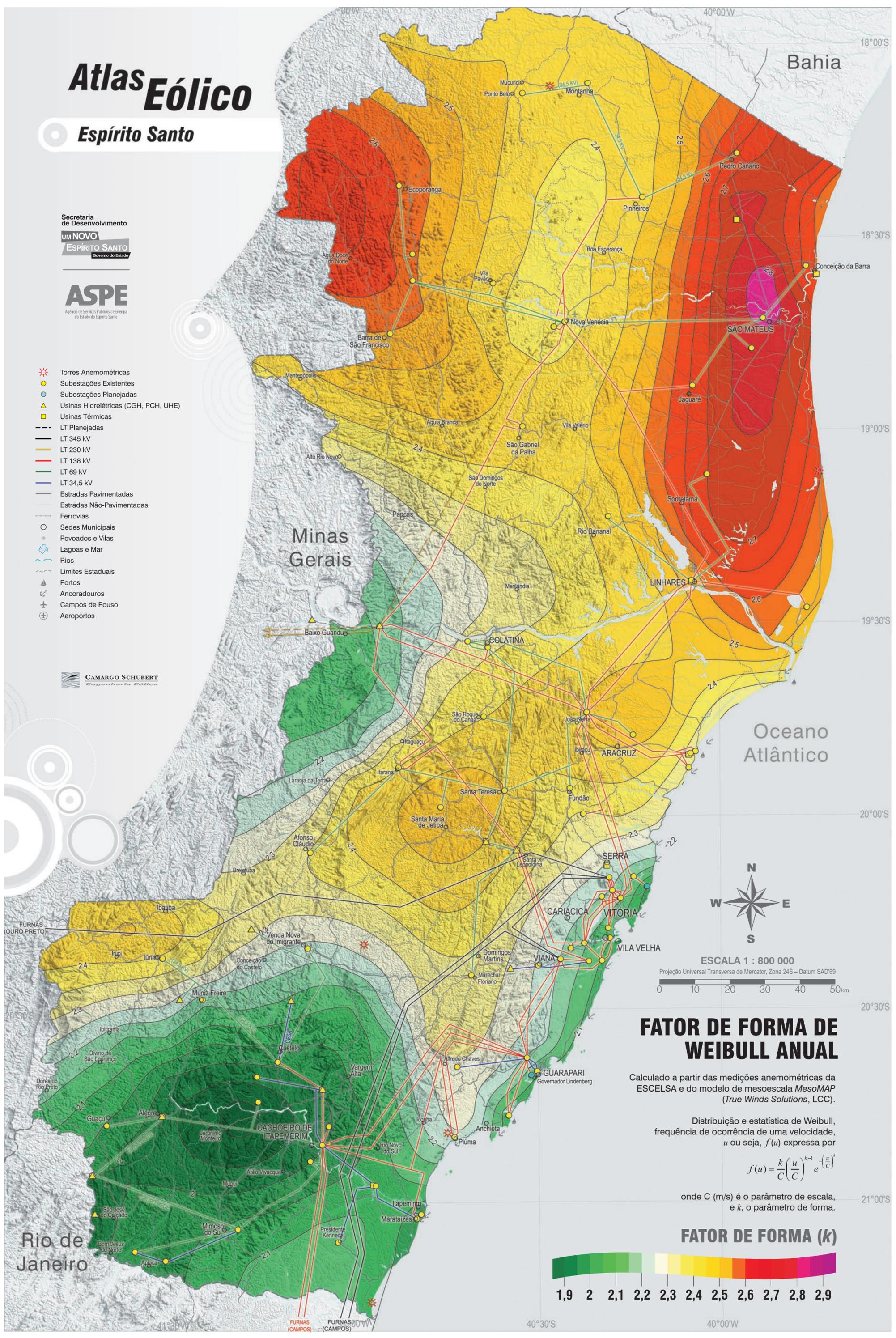
UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

-  Torres Anemométricas
-  Subestações Existentes
-  Subestações Planejadas
-  Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
-  Usinas Térmicas
-  LT Planejadas
-  LT 345 kV
-  LT 230 kV
-  LT 138 kV
-  LT 69 kV
-  LT 34,5 kV
-  Estradas Pavimentadas
-  Estradas Não-Pavimentadas
-  Ferrovias
-  Sedes Municipais
-  Povoados e Vilas
-  Lagoas e Mar
-  Rios
-  Limites Estaduais
-  Portos
-  Ancoradouros
-  Campos de Pouso
-  Aeroportos

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



ESCALA 1 : 800 000

Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S - Datum SAD'69



FATOR DE FORMA DE WEIBULL ANUAL

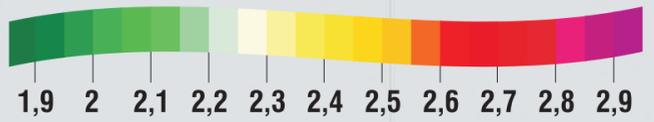
Calculado a partir das medições anemométricas da ESELSA e do modelo de mesoescala MesoMAP (True Winds Solutions, LCC).

Distribuição e estatística de Weibull, frequência de ocorrência de uma velocidade, u ou seja, $f(u)$ expressa por

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

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

FATOR DE FORMA (k)



Rio de Janeiro

FURNAS (OURO PRETO)

20°30'S

21°00'S

41°30'W

FURNAS (CAMPOS)

40°30'S

40°00'W

Bahia

Oceano Atlântico

Minas Gerais

18°00'S

18°30'S

19°00'S

19°30'S

20°00'S

20°30'S

21°00'S



FATOR DE FORMA DE WEIBULL ANUAL

Figura 4.6
Região centro-leste do município de Marataízes, onde as velocidades médias anuais do vento atingem 7.0 m/s, a 75 m de altura.

Atlas Eólico

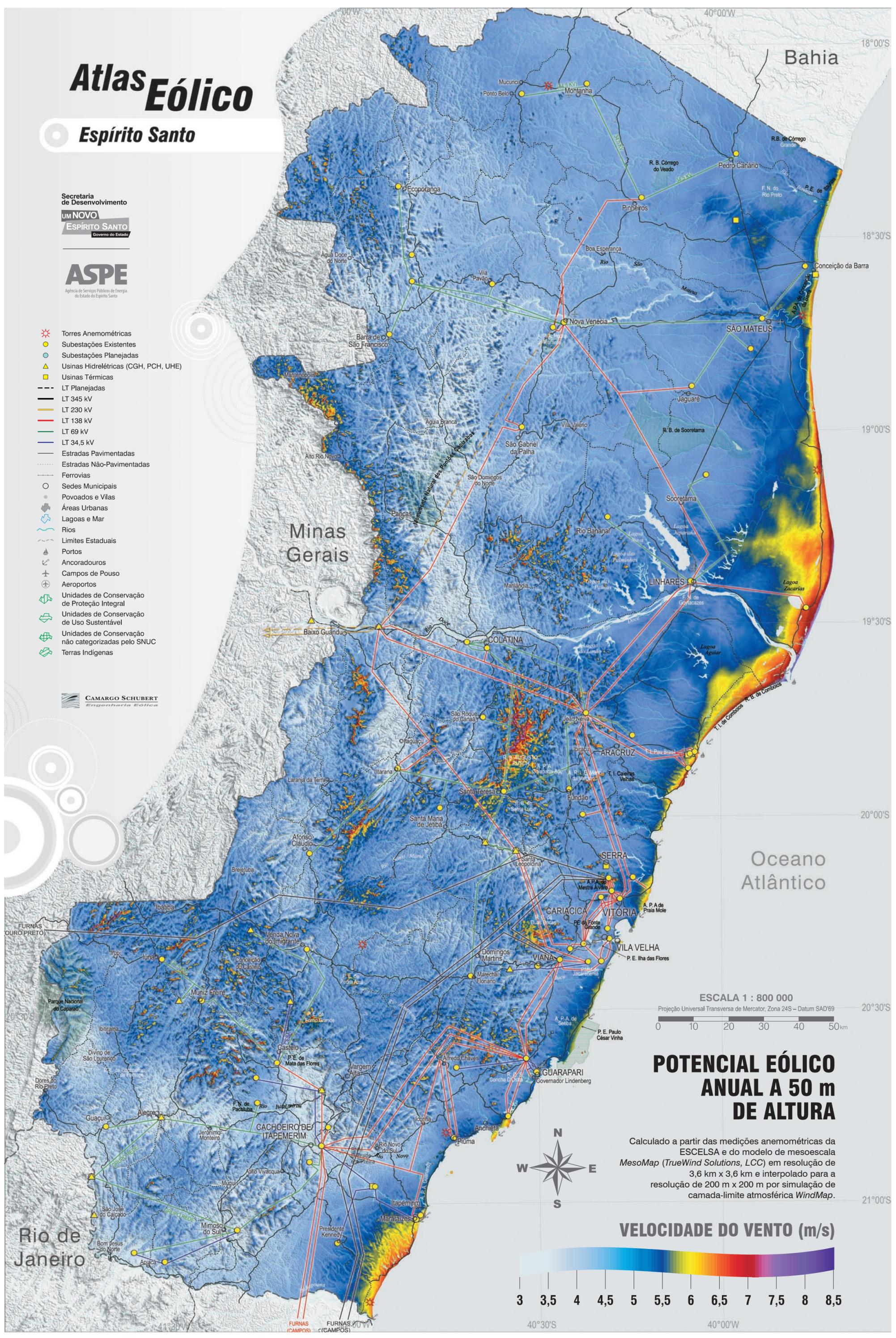
Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento
UM NOVO
ESPIRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Torres Anemométricas
- Subestações Existentes
- Subestações Planejadas
- Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
- Usinas Térmicas
- LT Planejadas
- LT 345 kV
- LT 230 kV
- LT 138 kV
- LT 69 kV
- LT 34,5 kV
- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- Povoados e Vilas
- Áreas Urbanas
- Lagoas e Mar
- Rios
- Limites Estaduais
- Portos
- Ancoradouros
- Campos de Pousio
- Aeroportos
- Unidades de Conservação de Proteção Integral
- Unidades de Conservação de Uso Sustentável
- Unidades de Conservação não categorizadas pelo SNUC
- Terras Indígenas

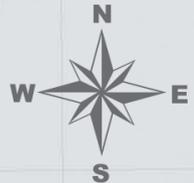
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



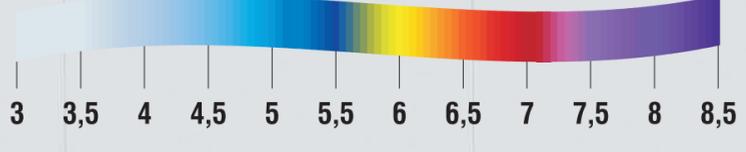
ESCALA 1 : 800 000
Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S – Datum SAD'69
0 10 20 30 40 50 km

POTENCIAL EÓLICO ANUAL A 50 m DE ALTURA

Calculado a partir das medições anemométricas da ESCELSA e do modelo de mesoescala MesoMap (TrueWind Solutions, LCC) em resolução de 3,6 km x 3,6 km e interpolado para a resolução de 200 m x 200 m por simulação de camada-limite atmosférica WindMap.



VELOCIDADE DO VENTO (m/s)



Rio de Janeiro

Oceano Atlântico

Bahia

Minas Gerais

FURNAS (CAMPOS) FURNAS (CAMPOS)

40°30'S

40°00'W



POTENCIAL EÓLICO ANUAL A 50 m DE ALTURA



Figura 4.7
 À medida que se penetra para o interior dos municípios de Presidente Kennedy e Marataízes, litoral sul do Estado do Espírito Santo, as características físicas da paisagem permanecem propícias a aproveitamentos eólicos: com poucas ondulações, as atividades agropecuárias existentes mantêm a superfície do solo com baixa rugosidade.

Atlas Eólico

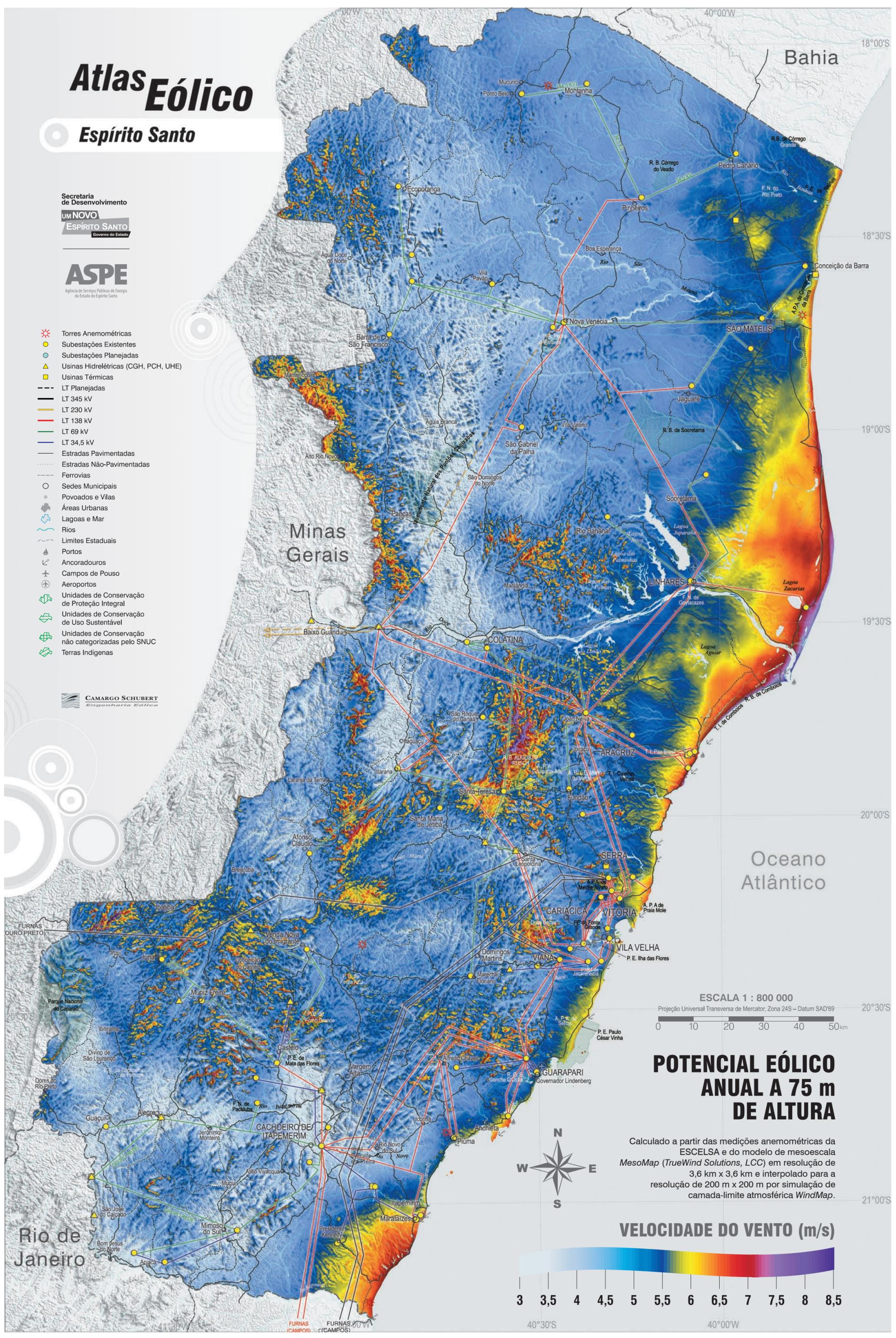
Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento
UM NOVO
ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Torres Anemométricas
- Subestações Existentes
- Subestações Planejadas
- Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
- Usinas Térmicas
- LT Planejadas
- LT 345 kV
- LT 230 kV
- LT 138 kV
- LT 69 kV
- LT 34,5 kV
- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- Povoados e Vilas
- Áreas Urbanas
- Lagoas e Mar
- Rios
- Limites Estaduais
- Portos
- Acoradouras
- Campos de Pouso
- Aeroportos
- Unidades de Conservação de Proteção Integral
- Unidades de Conservação de Uso Sustentável
- Unidades de Conservação não categorizadas pelo SNUC
- Terras Indígenas

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

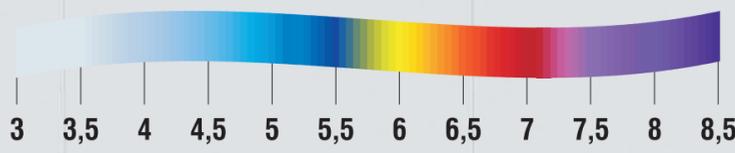


ESCALA 1 : 800 000
Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S - Datum SAD'69

POTENCIAL EÓLICO ANUAL A 75 m DE ALTURA

Calculado a partir das medições anemométricas da ESCELSA e do modelo de mesoescala MesoMap (TrueWind Solutions, LCC) em resolução de 3,6 km x 3,6 km e interpolado para a resolução de 200 m x 200 m por simulação de camada-limite atmosférica WindMap.

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)



Rio de Janeiro

Oceano Atlântico

Bahia

Minas Gerais

FURNAS (CAMPOS) FURNAS (CAMPOS)



40°30'S

40°00'W

18°00'S

18°30'S

19°00'S

19°30'S

20°00'S

20°30'S

21°00'S

20°30'S

21°00'S

41°30'W



POTENCIAL EÓLICO ANUAL A 75 m DE ALTURA



ZIG KOCH

Figura 4.8
 Nas proximidades da costa, na parte superior da imagem, o município de Marataízes;
 na parte inferior da imagem, parte do município de Presidente Kennedy.

Atlas Eólico

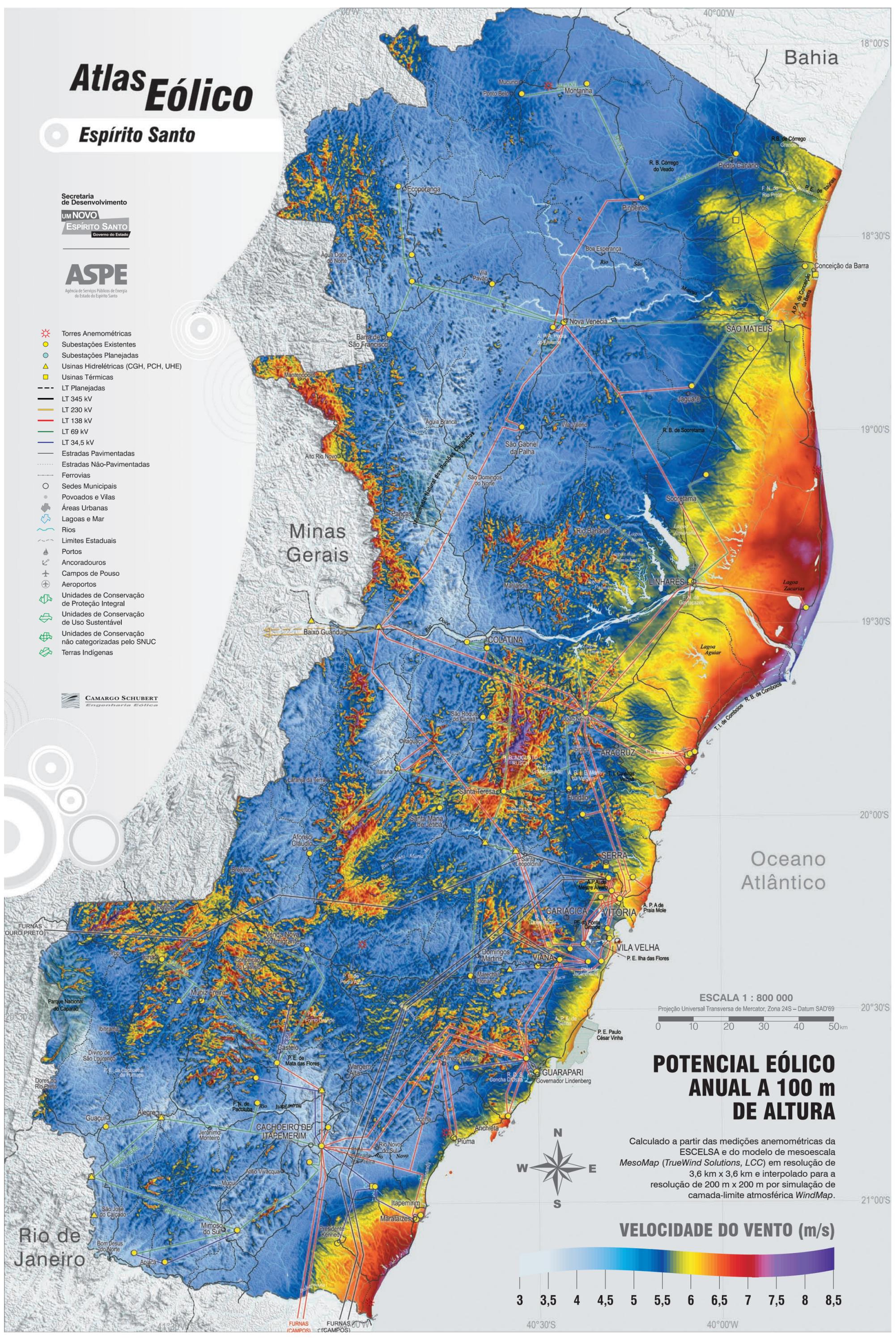
Espírito Santo

Secretaria de Desenvolvimento
UM NOVO
ESPIRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Torres Anemométricas
- Subestações Existentes
- Subestações Planejadas
- Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
- Usinas Térmicas
- LT Planejadas
- LT 345 kV
- LT 230 kV
- LT 138 kV
- LT 69 kV
- LT 34,5 kV
- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- Povoados e Vilas
- Áreas Urbanas
- Lagoas e Mar
- Rios
- Limites Estaduais
- Portos
- Ancoradouros
- Campos de Pousio
- Aeroportos
- Unidades de Conservação de Proteção Integral
- Unidades de Conservação de Uso Sustentável
- Unidades de Conservação não categorizadas pelo SNUC
- Terras Indígenas

CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica

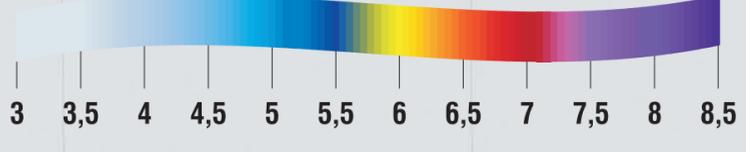


ESCALA 1 : 800 000
Projeção Universal Transversa de Mercator, Zona 24S – Datum SAD'69

POTENCIAL EÓLICO ANUAL A 100 m DE ALTURA

Calculado a partir das medições anemométricas da ESCELSA e do modelo de mesoescala MesoMap (TrueWind Solutions, LCC) em resolução de 3,6 km x 3,6 km e interpolado para a resolução de 200 m x 200 m por simulação de camada-limite atmosférica WindMap.

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)



Rio de Janeiro

Oceano Atlântico

Bahia

Minas Gerais

FURNAS (CAMPOS)

FURNAS (CAMPOS)

4 Mapas Eólicos do Espírito Santo

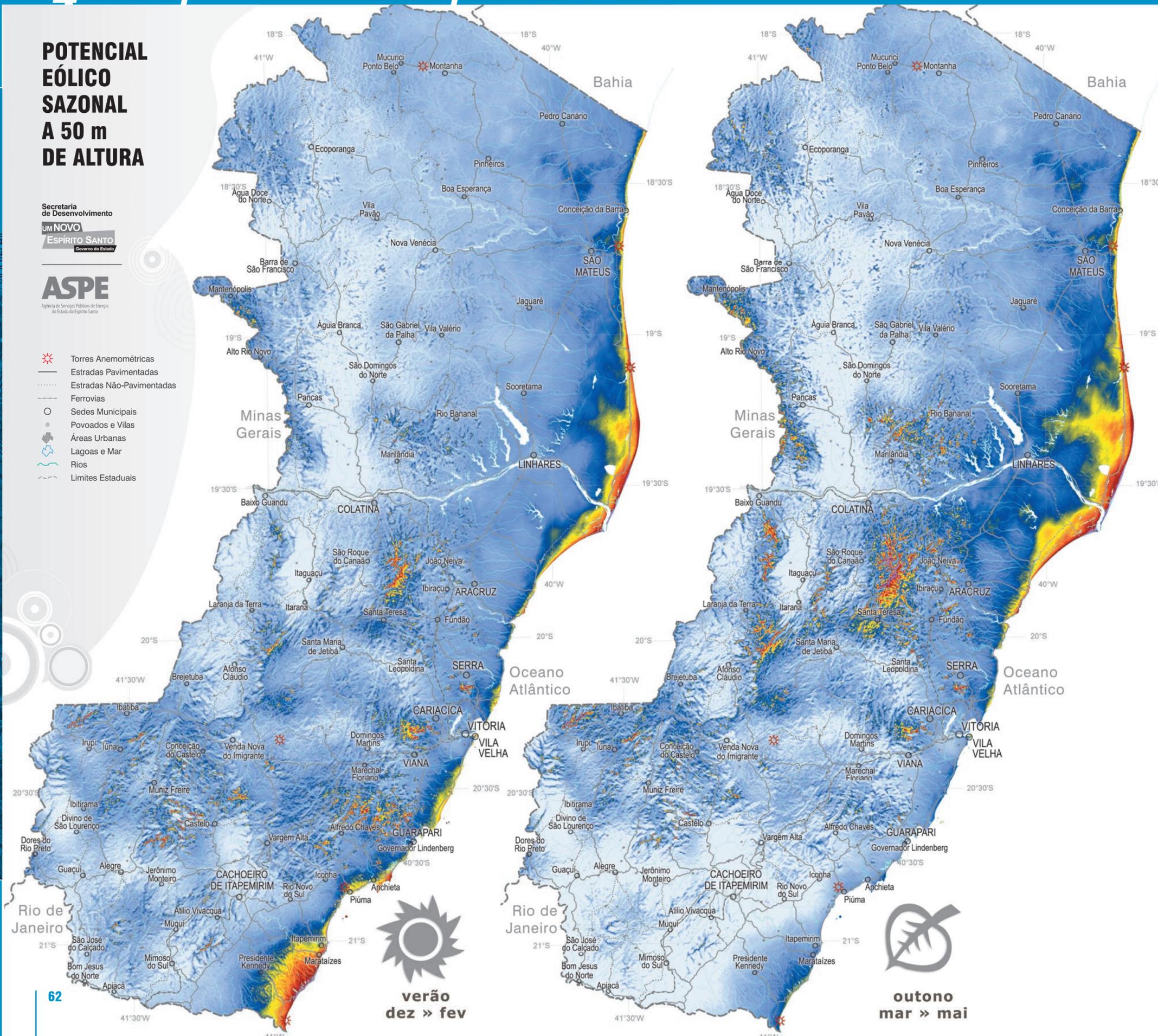


POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 50 m DE ALTURA

Secretaria de Desenvolvimento
UM NOVO ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

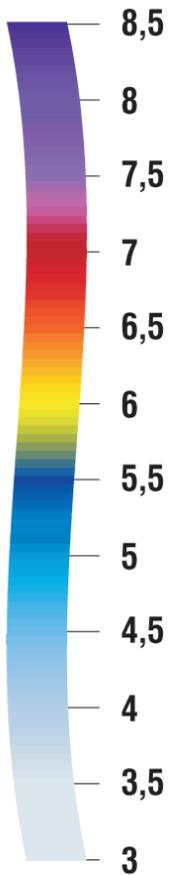
ASPE
Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

- Torres Anemométricas
- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- Povoados e Vilas
- Áreas Urbanas
- Lagoas e Mar
- Rios
- Limites Estaduais

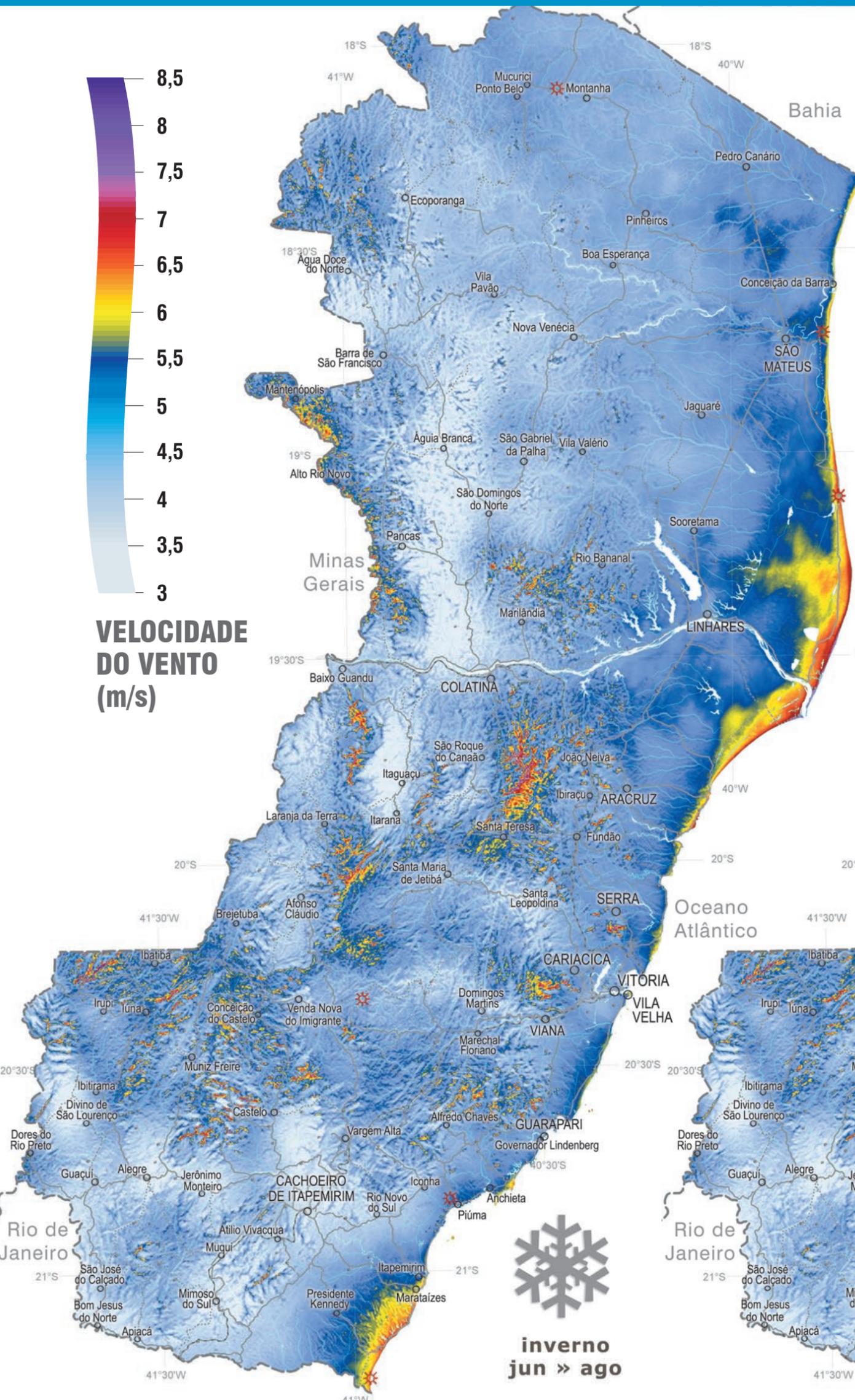


POTENCIAL EÓLICO ANUAL A 100 m DE ALTURA

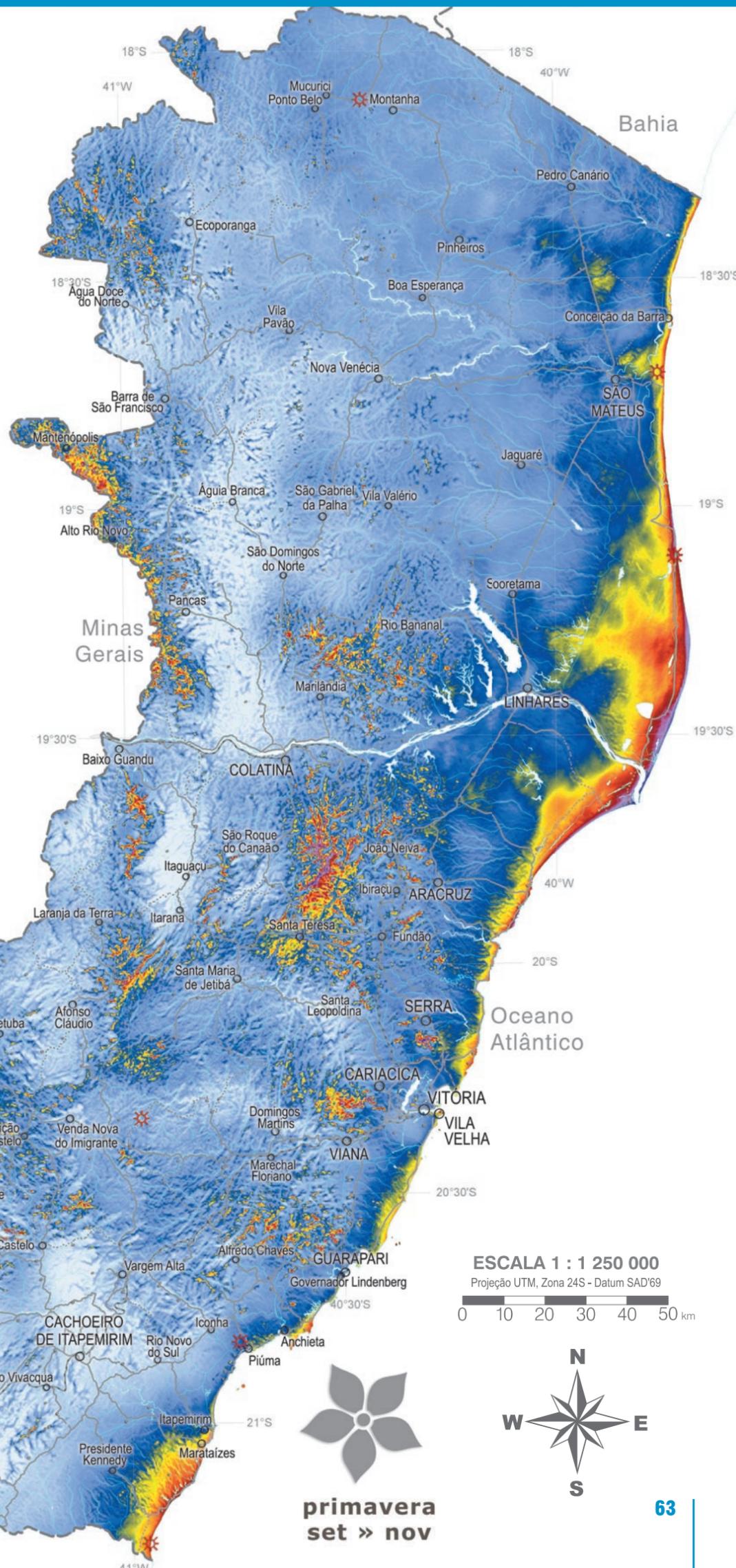




VELOCIDADE DO VENTO (m/s)



inverno
jun » ago



primavera
set » nov

ESCALA 1 : 1 250 000
Projeção UTM, Zona 24S - Datum SAD'69



4 Mapas Eólicos do Espírito Santo

POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 75 m DE ALTURA

Secretaria de Desenvolvimento

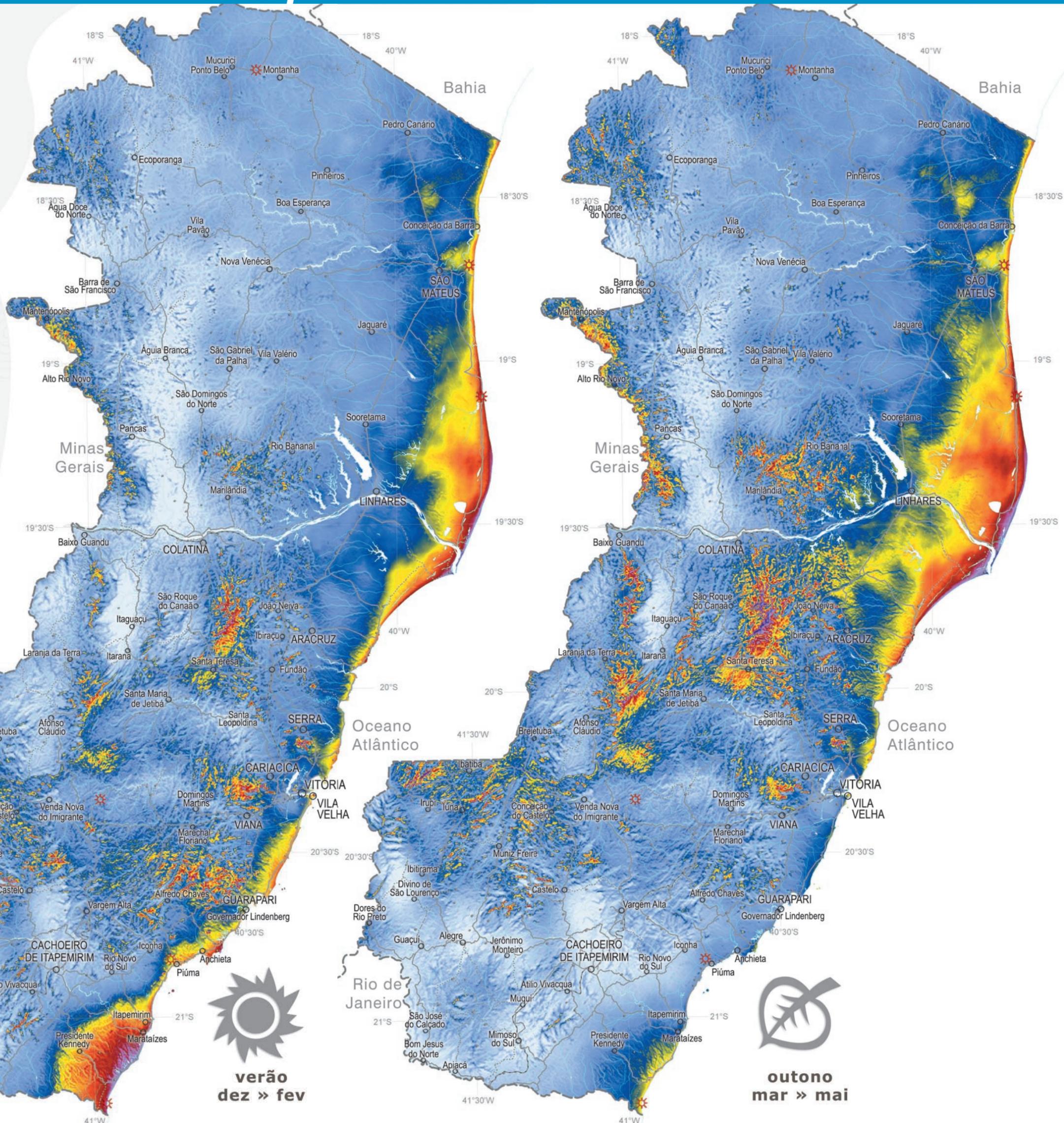
UM NOVO ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

-  Torres Anemométricas
-  Estradas Pavimentadas
-  Estradas Não-Pavimentadas
-  Ferrovias
-  Sedes Municipais
-  Povoados e Vilas
-  Áreas Urbanas
-  Lagoas e Mar
-  Rios
-  Limites Estaduais

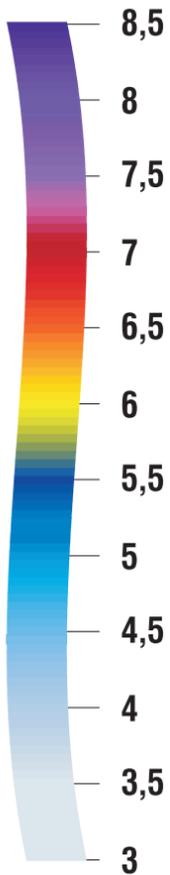
CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica



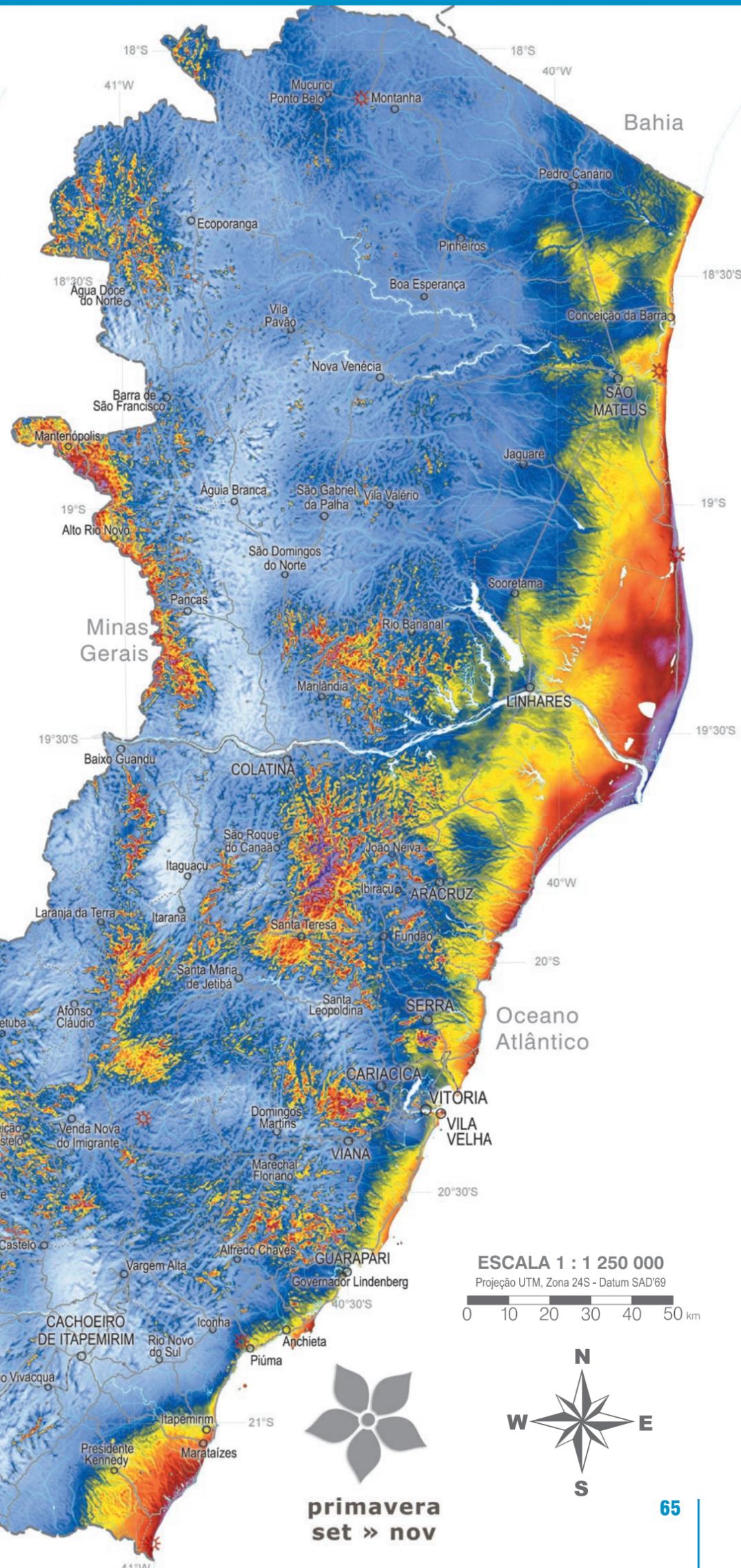
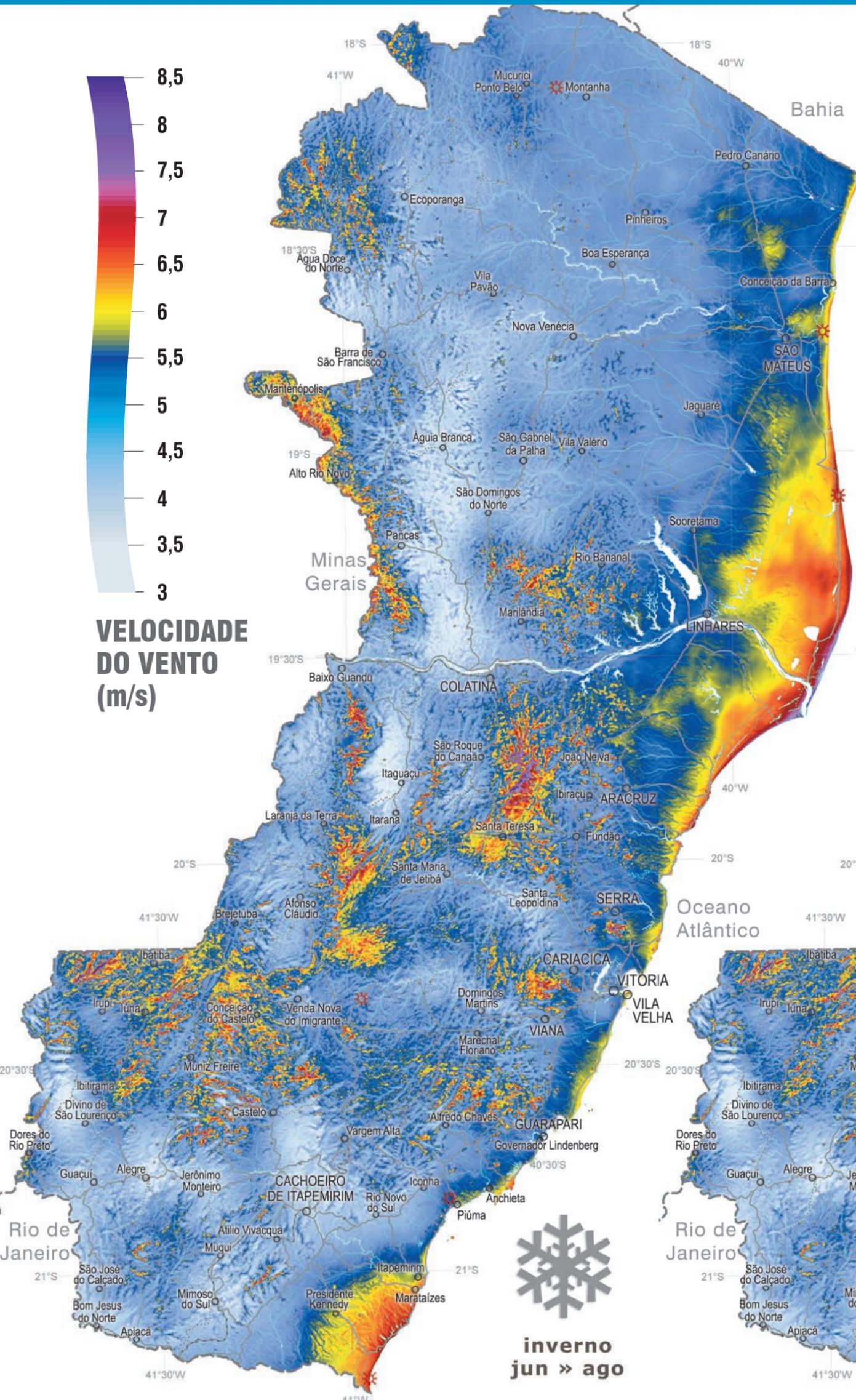
verão
dez » fev



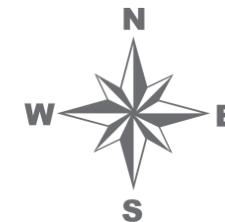
outono
mar » mai



VELOCIDADE DO VENTO (m/s)



ESCALA 1 : 1 250 000
Projeção UTM, Zona 24S - Datum SAD'69



4 Mapas Eólicos do Espírito Santo

POTENCIAL EÓLICO SAZONAL A 100 m DE ALTURA

Secretaria de Desenvolvimento

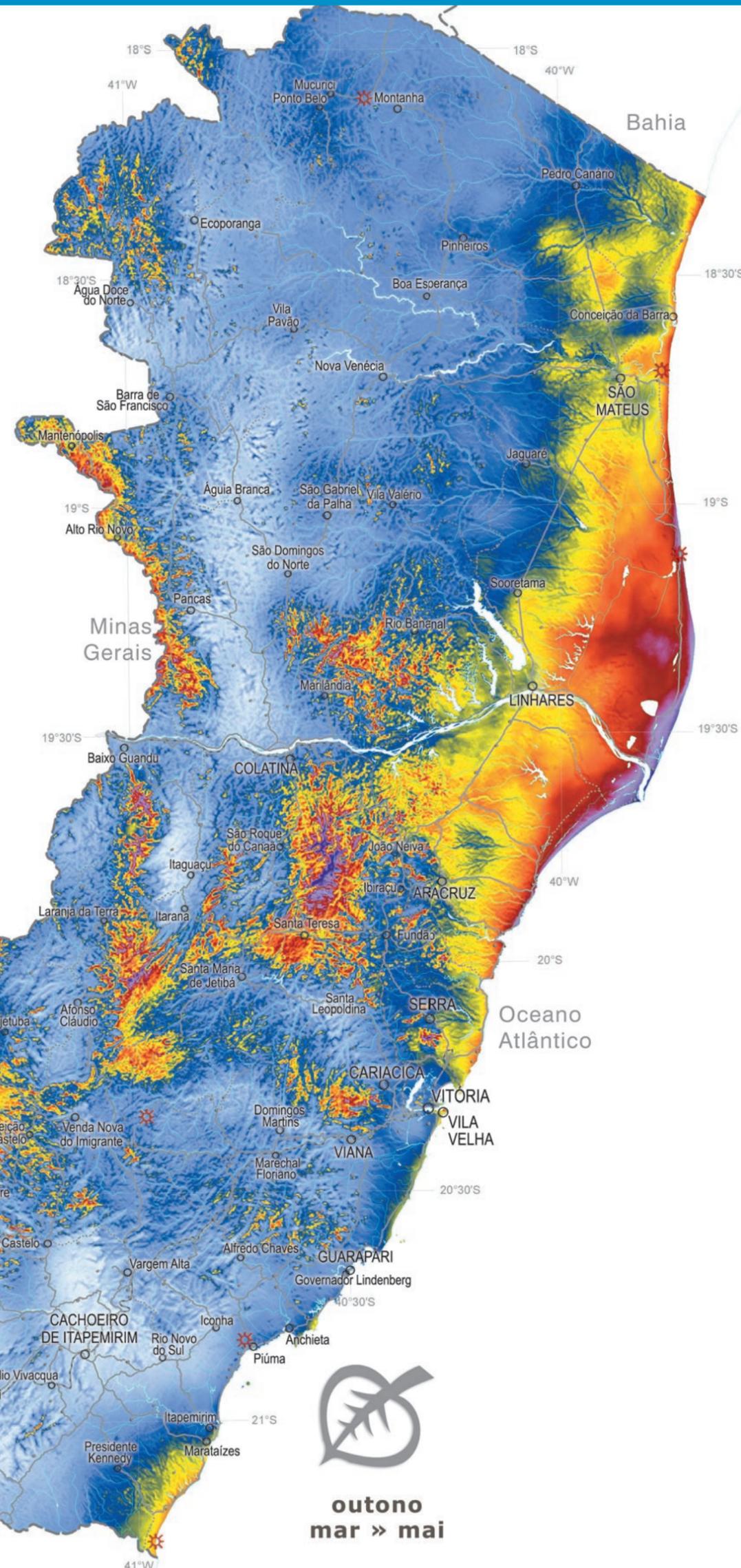
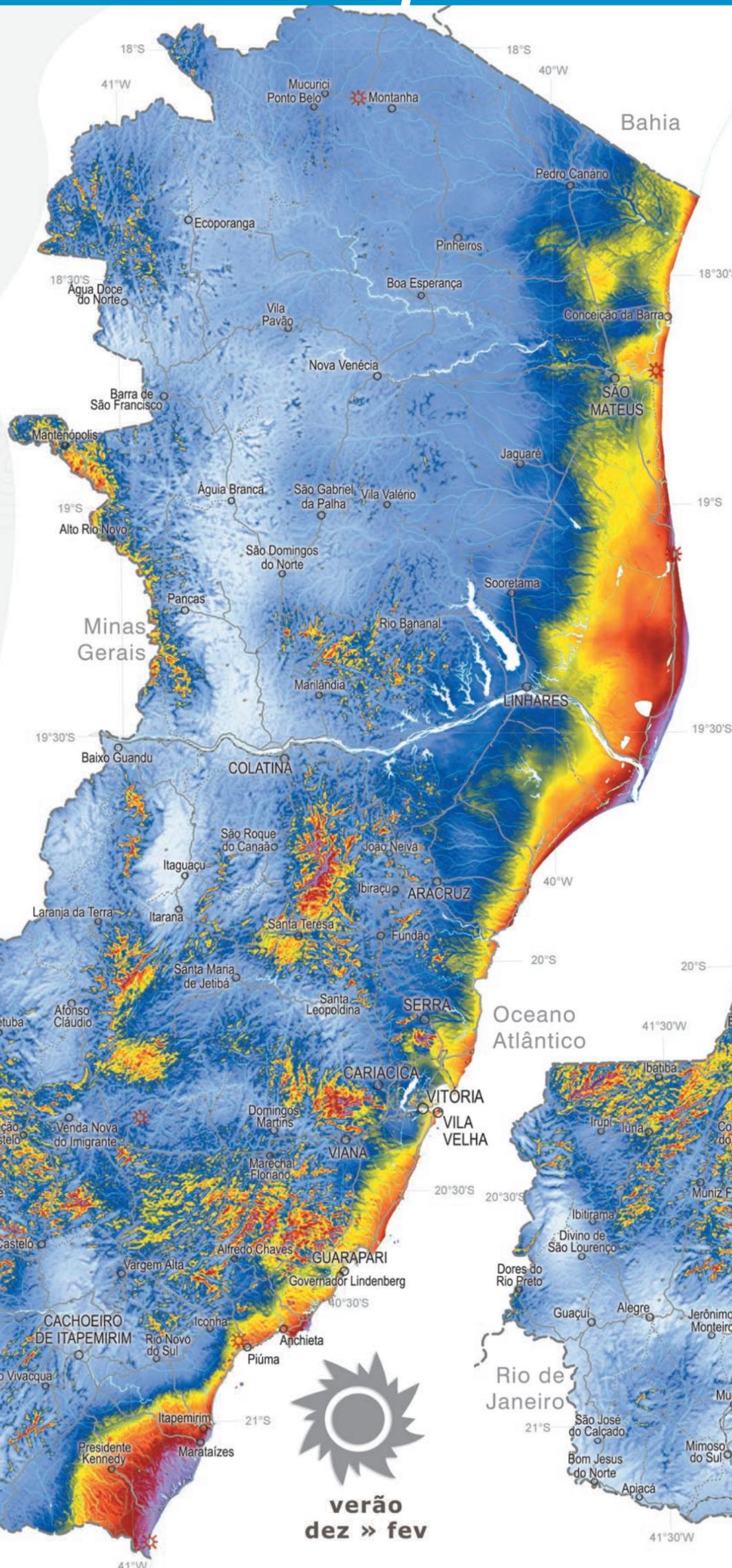
UM NOVO ESPÍRITO SANTO
Governo do Estado

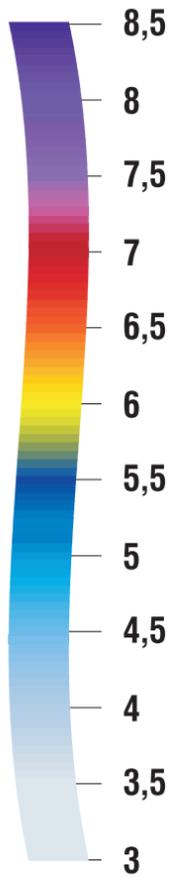
ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

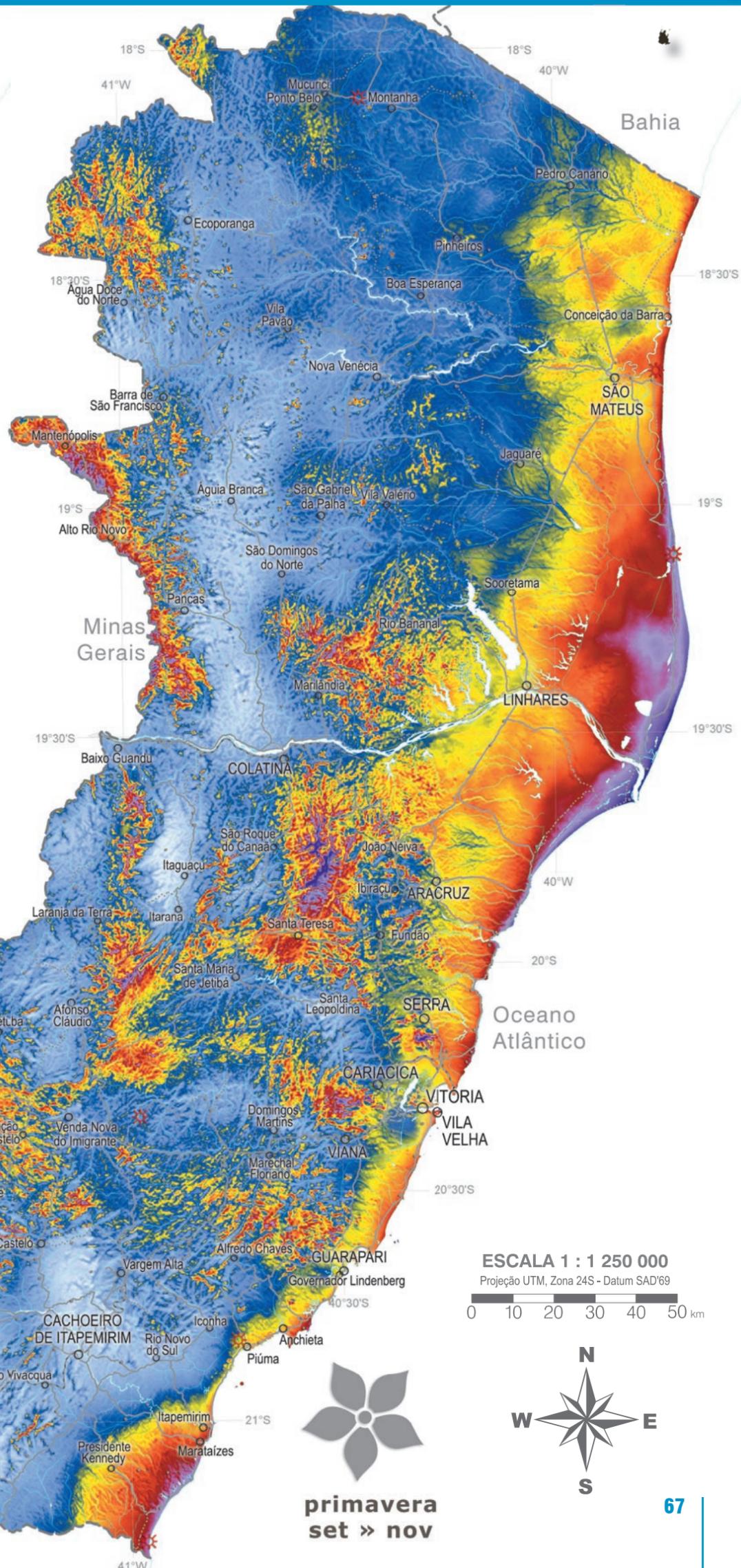
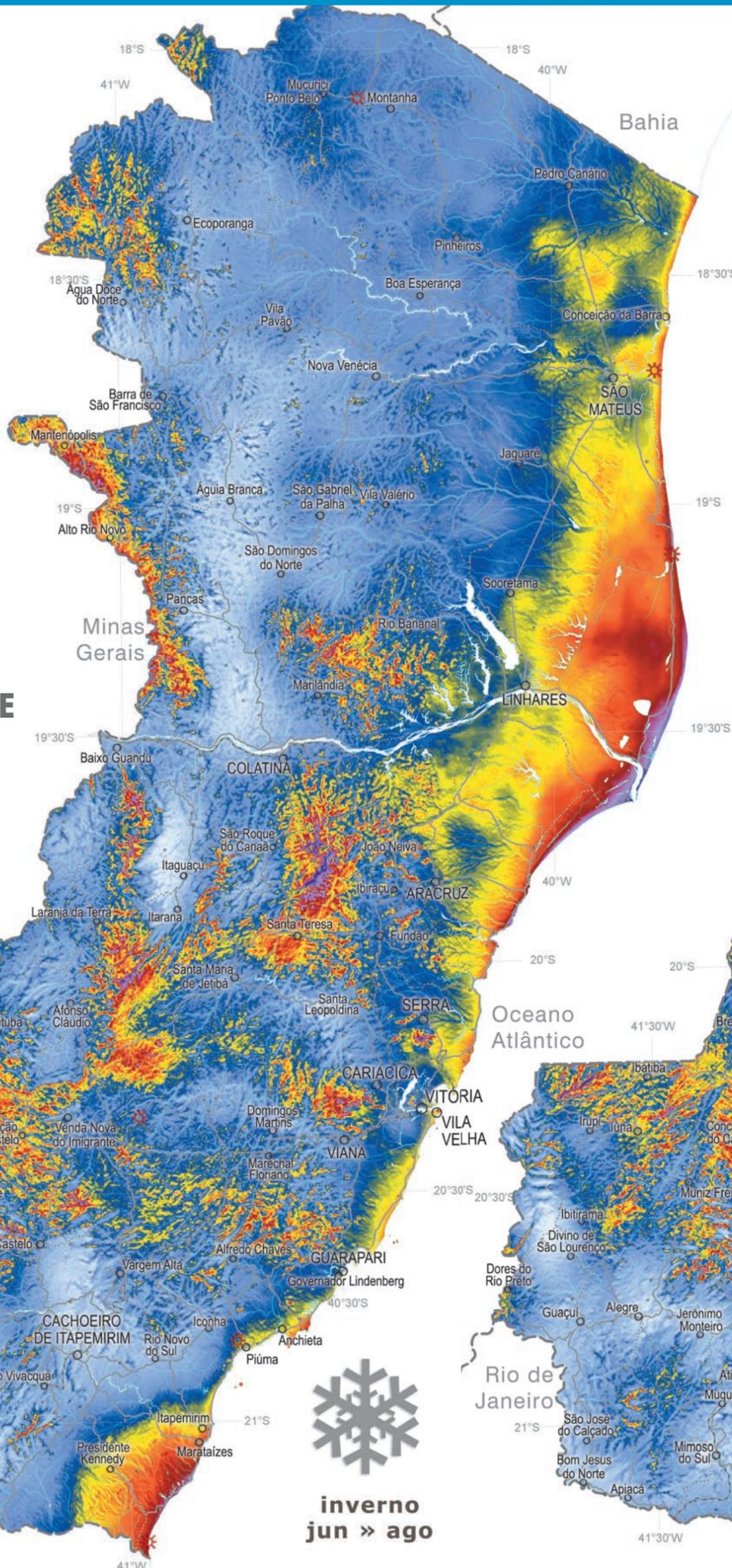
-  Torres Anemométricas
-  Estradas Pavimentadas
-  Estradas Não-Pavimentadas
-  Ferrovias
-  Sedes Municipais
-  Povoados e Vilas
-  Áreas Urbanas
-  Lagoas e Mar
-  Rios
-  Limites Estaduais

 CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica





VELOCIDADE DO VENTO (m/s)



ESCALA 1 : 1 250 000
 Projeção UTM, Zona 24S - Datum SAD'69
 0 10 20 30 40 50 km





ZIG KOCH

5

Análises e Diagnósticos

○ **Espírito Santo**

- ① **5.1**
0 Potencial Eólico do Espírito Santo
- ② **5.2**
Áreas Mais Promissoras
- ③ **5.3**
Potencial Eólico Sobre o Mar (Offshore)

5.1 O Potencial Eólico do Espírito Santo

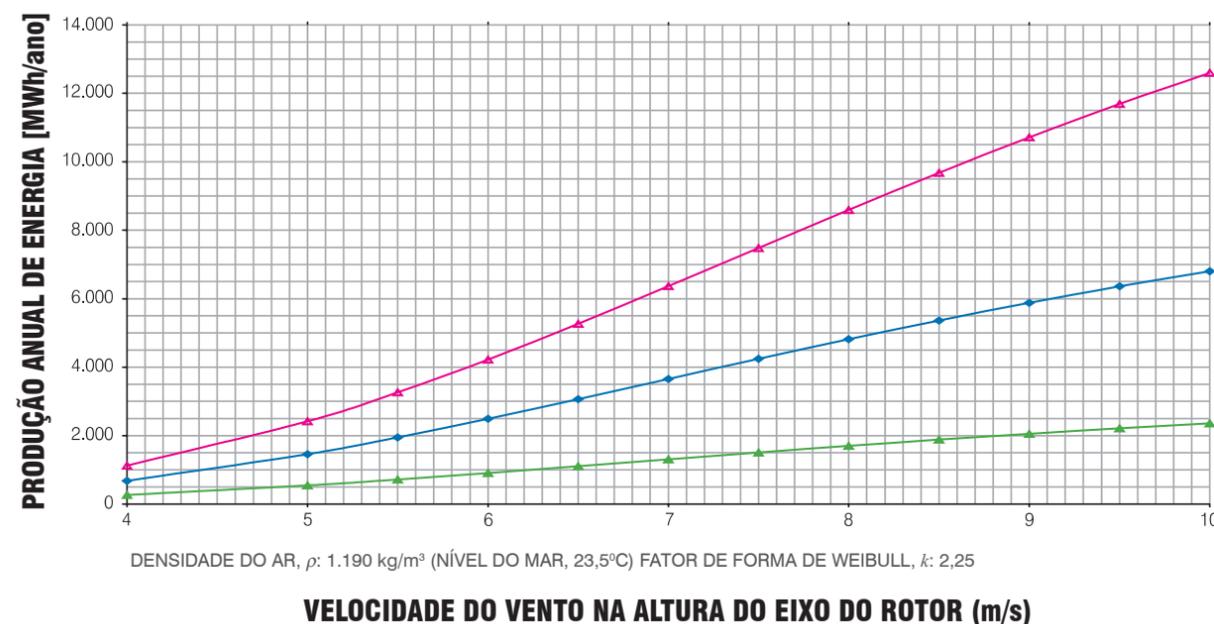
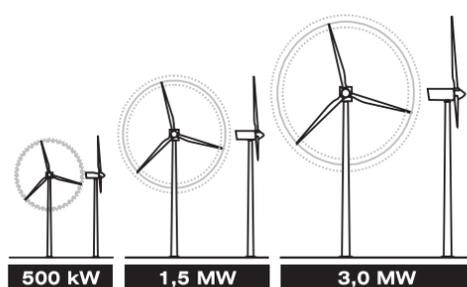
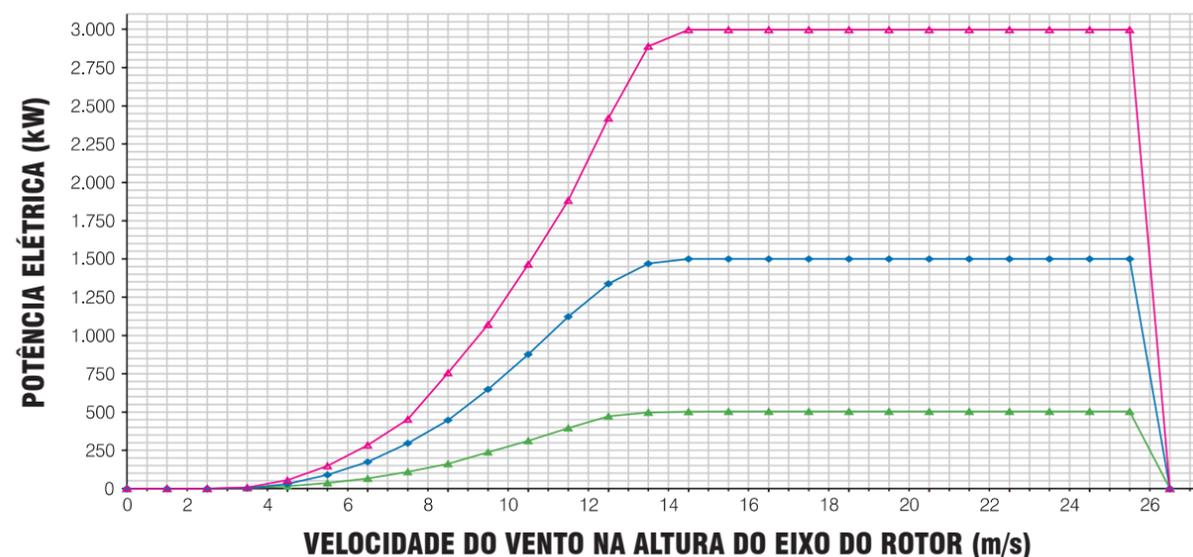
O potencial eólico do Estado do Espírito Santo foi calculado a partir da integração dos mapas de velocidades médias anuais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia de usinas eólicas no estado-da-arte mundial.

Nesse processo foram adotadas as seguintes considerações:

1ª) Para as velocidades de vento calculadas nas três alturas – 50 m, 75 m e 100 m – utilizaram-se curvas médias de desempenho de turbinas eólicas comerciais, das classes: 500 kW, 1,5 MW e 3,0 MW, com diâmetros de rotor de 40 m, 80 m e 100 m, e torres de 50 m, 75 m e 100 m de altura, respectivamente. Na Figura 5.1 são apresentadas as curvas de potência das turbinas consideradas.

Potência	Diâmetro do Rotor	Altura da Torre
500 kW	40 m	50 m
1,5 MW	80 m	75 m
3,0 MW	100 m	100 m

Figura 5.1 – Curvas de desempenho das turbinas consideradas no cálculo: potência e geração anual.



2ª) Foi considerada uma taxa de ocupação média de terreno de 1,5 MW/km², 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 ^[52] a ^[55].

3ª) Para todo o território do Espírito Santo, nos respectivos mapas com resolução de 200 m x 200 m, foram integradas as áreas com velocidades médias anuais a partir de 6,0 m/s, em faixas de 0,5 m/s. A integração e o cálculo do potencial de geração foram realizados considerando-se usinas eólicas implantadas em terra (*onshore*), sendo descartadas as áreas abrangidas pelas principais lagoas, rios e represas. O potencial eólico sobre o mar (*offshore*) foi integrado separadamente, segundo os mesmos critérios apresentados nesta

seção, para uma faixa situada nas proximidades do litoral capixaba, conforme descrição e resultados apresentados no item 5.3.

4ª) Os fatores de capacidade foram corrigidos para o efeito da densidade local do ar, a partir do Mapa de Densidade do Ar.

5ª) Na integração das curvas de potência das turbinas, foram calculadas as distribuições de velocidade do vento locais, considerando-se os Fatores de Forma de Weibull (*k*) apresentados no mapa correspondente.

6ª) 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%.

A Tabela 5.1 apresenta o resultado da integração dos mapas e o potencial eólico do Estado do Espírito Santo. 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, no emprego de turbinas de 1,2 MW a 1,8 MW em lugar 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 5,5 m/s e 7,0 m/s. Tecnicamente, médias anuais a partir de 6,0 m/s já constituem condições favoráveis para a operação de usinas eólicas.

Os resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 0,53 GW, 1,79 GW e 4,06 GW, para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,5 m/s (Tabela 5.1), nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente.

O fator de capacidade médio estimado para as áreas com velocidades médias anuais na faixa de 6,5 a 7,0 m/s é de 0,224 na altura de 75 m.

Como referência comparativa, o Sistema Elétrico Brasileiro possuía uma capacidade total instalada de 102,6 GW até o final de 2008^[18], e o total de recursos hidráulicos no Brasil (inventariado mais estimado) é de 143,8 GW^[56]. O Estado do Espírito Santo possui uma capacidade instalada* de 1,17 GW^[18]. O consumo de energia elétrica no Estado foi de 8,45 TWh no ano de 2007^[10], ao passo que a estimativa de geração eólica anual é de 1,16 TWh, 3,71 TWh e 7,30 TWh nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 6,5 m/s.

POTENCIAL DE GERAÇÃO EÓLICA

INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE					
ALTURA [m]	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [GWh]

100	6,0 - 6,5	4306	6460	0,154	8738
	6,5 - 7,0	1946	2919	0,192	4903
	7,0 - 7,5	598	897	0,230	1804
	7,5 - 8,0	131	196	0,267	460
	8,0 - 8,5	28	42	0,300	111
	≥ 8,5	5	8	0,328	22

75	6,0 - 6,5	2498	3747	0,184	6023
	6,5 - 7,0	896	1345	0,224	2636
	7,0 - 7,5	236	354	0,264	818
	7,5 - 8,0	50	75	0,300	196
	8,0 - 8,5	12	17	0,334	51
	≥ 8,5	2	3	0,359	8

50	6,0 - 6,5	879	1318	0,199	2297
	6,5 - 7,0	266	399	0,24	837
	7,0 - 7,5	68	102	0,279	249
	7,5 - 8,0	15	23	0,317	63
	8,0 - 8,5	3	4	0,346	11
	≥ 8,5	0	0	0,378	2

INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	ENERGIA ANUAL [GWh]

≥ 6,0	7015	10522	16038
≥ 6,5	2708	4062	7300
≥ 7,0	762	1143	2397
≥ 7,5	164	247	593
≥ 8,0	33	50	134
≥ 8,5	6	9	25

≥ 6,0	3693	5540	9732
≥ 6,5	1195	1793	3709
≥ 7,0	299	448	1073
≥ 7,5	63	94	255
≥ 8,0	13	20	59
≥ 8,5	2	3	9

≥ 6,0	1230	1846	3459
≥ 6,5	352	528	1162
≥ 7,0	86	129	325
≥ 7,5	18	27	76
≥ 8,0	3	4	13
≥ 8,5	0	1	2

Tabela 5.1

* As usinas em divisas com outros estados foram consideradas com metade da potência.

5.2 Áreas Mais Promissoras

O mapeamento do Potencial Eólico do Espírito Santo evidenciou duas principais áreas para empreendimentos eólico-elétricos no Estado, como indicado na Figura 5.2, ambas situadas ao longo do litoral capixaba.

A seguir é apresentada uma descrição sucinta das duas principais áreas, em termos das velocidades médias anuais e dos principais centros de consumo de energia.

São apresentadas também fotografias aéreas procurando-se retratar os pontos mais promissores para instalação de usinas eólicas, sob o ponto de vista das condições de rugosidade do terreno e relevo. Como foi elaborado um grande número dessas fotografias, optou-se por distribuí-las também ao longo do

capítulo 4. A localização dos pontos de onde foram tiradas é indicada nas figuras 5.4 e 5.9. A localização da totalidade das fotos elaboradas para este Atlas dentro do Estado do Espírito Santo é indicada na Lista de Fotografias.

É importante observar que algumas dessas fotografias revelam alagamentos atípicos causados pelo intenso período de chuvas ocorrido no verão de 2008/2009. Ressalta-se ainda que, quando por ocasião da instalação de aerogeradores, estes são normalmente posicionados nas porções mais elevadas do terreno, de modo a não comprometer o acesso.

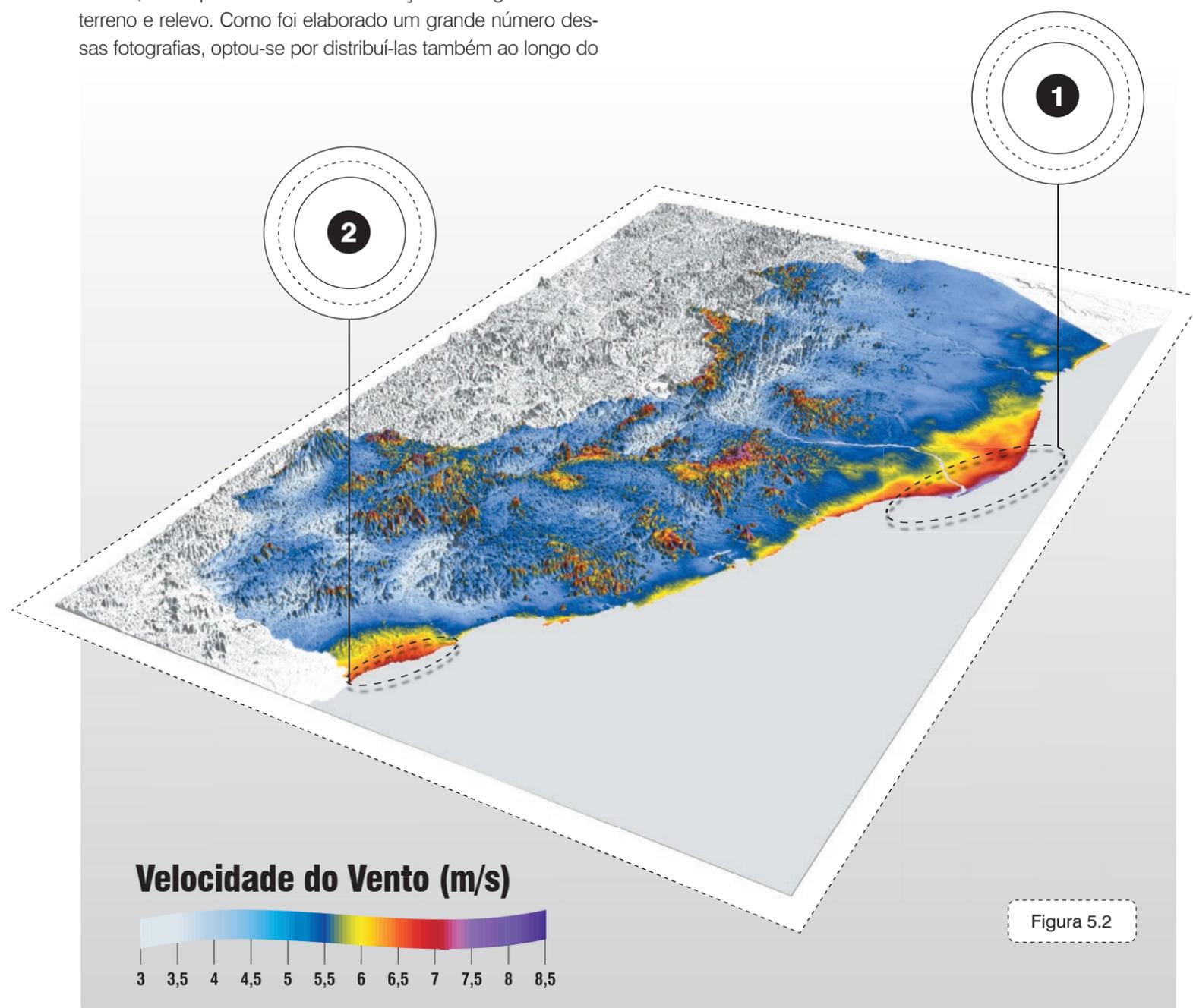


Figura 5.3 – O mapeamento do potencial eólico do Espírito Santo revelou que esta área está entre as que apresentam as maiores velocidades médias anuais de vento do Estado, com a porção próxima a costa atingindo o valor de 7,5 m/s, a 75 m de altura. A área situa-se a apenas alguns quilômetros da Subestação de Cacimbas (Figura 1.11).



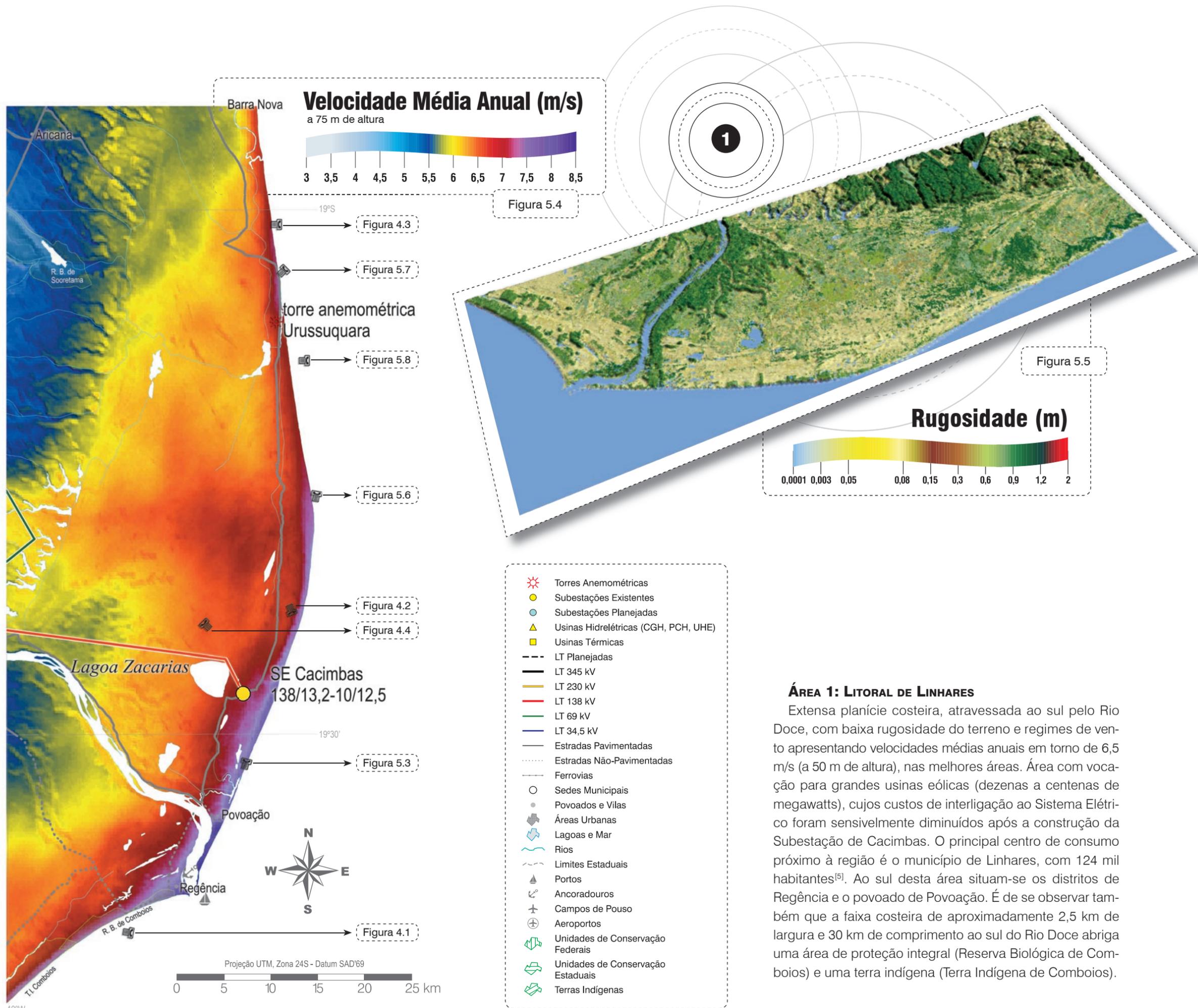


Figura 5.6 – A área pouco povoada no leste do município de Linhares possui várias características que a torna promissora para a instalação de empreendimentos eólicos.



Figura 5.7 – Sul do município de São Mateus, nas proximidades da divisa com o município de Linhares.



ZIG KOCH

Figura 5.8 – Divisa entre os municípios de Linhares e São Mateus.



ZIG KOCH

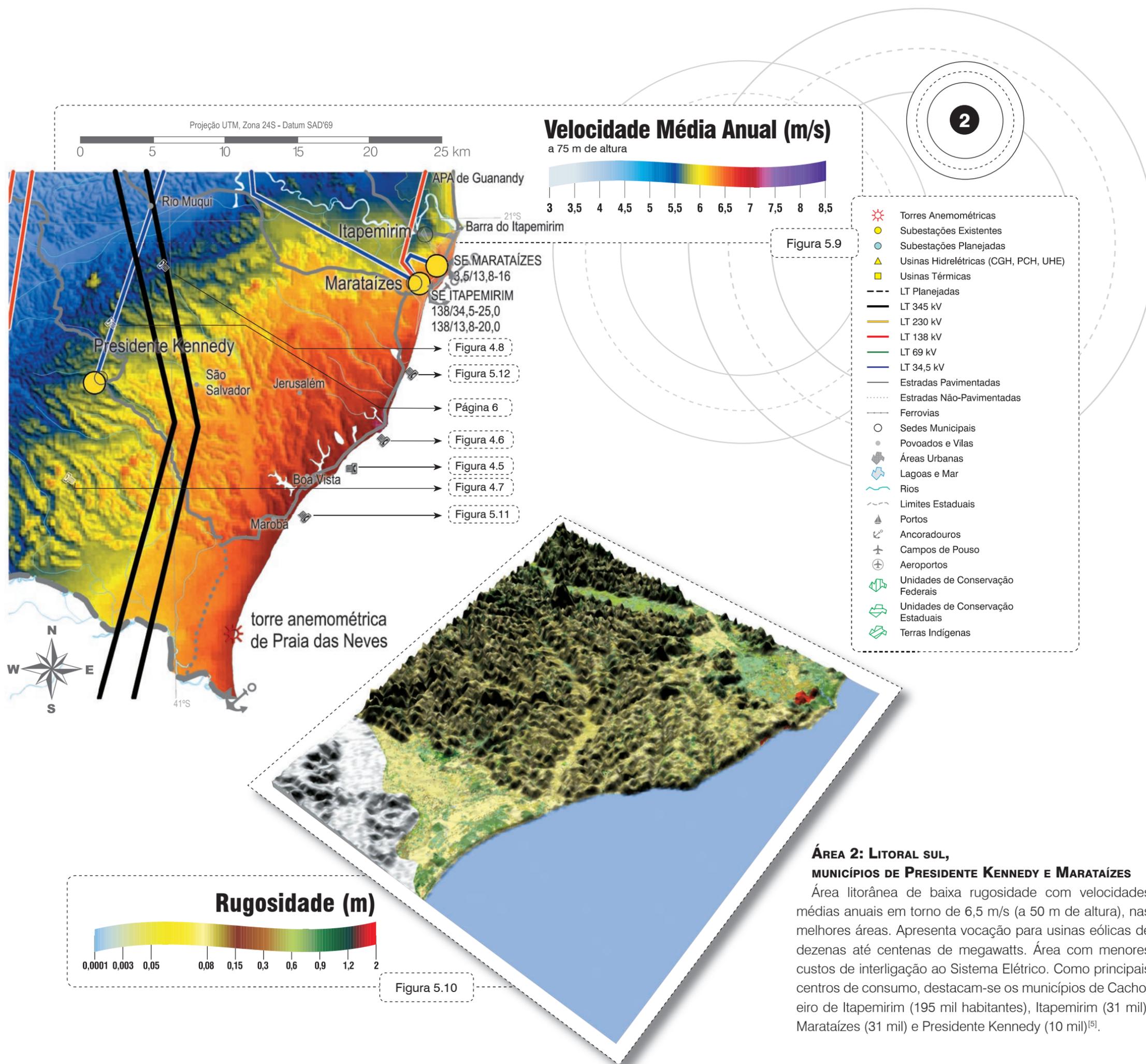


Figura 5.11 – Nas proximidades do povoado de Marobá, ao redor da divisa entre os municípios de Presidente Kennedy e Marataízes, há áreas promissoras para aproveitamentos eólicos. O povoamento é relativamente pequeno, ocorrendo principalmente atividades agropecuárias. As velocidades médias anuais, na região da costa, são estimadas em torno de 7,0 m/s, a 75 m de altura.



Figura 5.12 – Nas proximidades da cidade de Marataízes o povoamento é maior que nas áreas mais ao sul do município (Figura 5.11); ainda assim, predominam práticas de agricultura e pecuária que mantêm a rugosidade do terreno baixa, possibilitando a coexistência com usinas eólicas.



Além dessas áreas principais, existem outras no interior do Estado, situadas, entretanto, em locais de terreno complexo, com dificuldade de acesso, onerando, conseqüentemente, o transporte e a montagem de turbinas, a interligação ao Sistema Elétrico e a subestações distantes. Em princípio, destinam-se a empreendimentos eólicos isolados e de pequeno porte (até poucas dezenas de megawatts). A área montanhosa do município de Santa Teresa, ilustrada na figura 5.13, é um exemplo de local com algumas destas características.

A análise da viabilidade técnica e econômica de implantação de usinas eólicas nas áreas aqui indicadas como mais

promissoras requer campanhas de medições específicas para os locais de projeto, para os quais devem ser elaborados também modelos de relevo e rugosidade em alta resolução.

Ainda que os resultados apresentados neste Atlas sejam bastante representativos das condições médias anuais do vento sobre o Estado, com o mapeamento das áreas mais promissoras através de anemometria qualificada e avançadas técnicas de modelamento e simulação numérica, variações significativas em torno da média podem ocorrer na microescala, uma vez que o vento é bastante sensível

às características locais de relevo, rugosidade e ocorrência de obstáculos.

O potencial de geração eólica do Espírito Santo é promissor (1,79 GW a 75 m de altura para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,5 m/s) e poderá ser aproveitado gradativamente, nos limites de inserção do Sistema Elétrico Regional. O aproveitamento da energia dos ventos pode, de modo complementar, alavancar o crescimento econômico e a autossustentabilidade energética do Estado, gerando energia e melhor qualidade de vida para milhares de pessoas.

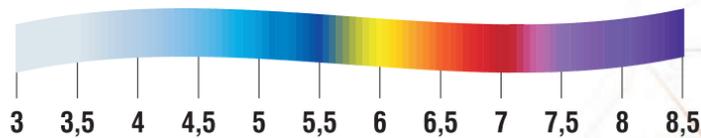
» Figura 5.13 – Região montanhosa do município de Santa Teresa, ao norte da Reserva Biológica Augusto Ruschi.



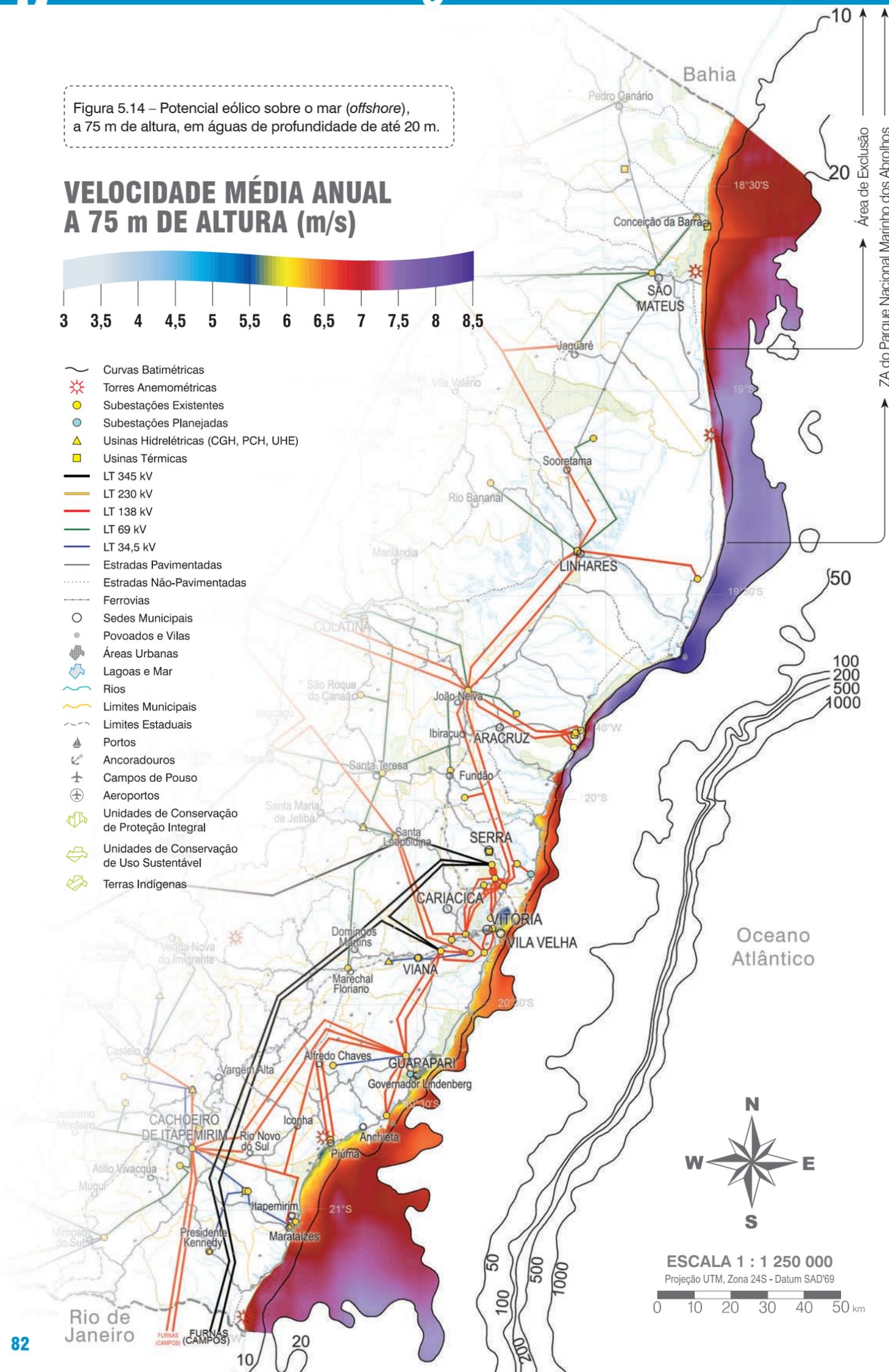
ZIG KOCH

Figura 5.14 – Potencial eólico sobre o mar (*offshore*), a 75 m de altura, em águas de profundidade de até 20 m.

VELOCIDADE MÉDIA ANUAL A 75 m DE ALTURA (m/s)



- Curvas Batimétricas
- Torres Anemométricas
- Subestações Existentes
- Subestações Planejadas
- Usinas Hidrelétricas (CGH, PCH, UHE)
- Usinas Térmicas
- LT 345 kV
- LT 230 kV
- LT 138 kV
- LT 69 kV
- LT 34,5 kV
- Estradas Pavimentadas
- Estradas Não-Pavimentadas
- Ferrovias
- Sedes Municipais
- Povoados e Vilas
- Áreas Urbanas
- Lagoas e Mar
- Rios
- Limites Municipais
- Limites Estaduais
- Portos
- Ancoradouros
- Campos de Pouso
- Aeroportos
- Unidades de Conservação de Proteção Integral
- Unidades de Conservação de Uso Sustentável
- Terras Indígenas



5.3 Potencial Eólico Sobre o Mar (*Offshore*)

A tecnologia de construção de usinas eólicas sobre o mar (*offshore*) tem se desenvolvido, nos últimos anos, principalmente nos países do norte da Europa, como Reino Unido, Suécia, Dinamarca e Países Baixos. Juntos, estes países já produzem atualmente 1,1 GW com essa modalidade de geração^[57], havendo ainda vários novos projetos em andamento em outras partes do mundo.

Ainda que essas usinas sejam consideravelmente mais caras que os empreendimentos convencionais (*onshore*), existe uma tendência a torná-las mais competitivas, na medida em que quanto maior a escala de uso, maior a otimização do emprego dos recursos; além disso, observa-se uma tendência à elevação dos custos de implantação de novas unidades geradoras, mesmo das que usam energias convencionais.

As usinas sobre o mar possuem, na verdade, algumas vantagens em relação às usinas em terra, salientando-se a qualidade do vento, que é, além de naturalmente mais intenso, também teoricamente menos turbulento (pois desloca-se sobre uma superfície plana), o que significa menor fadiga e maior durabilidade para as máquinas^[58]. Para minimizar os custos associados à logística da construção, à elaboração de fundações subaquáticas e à criação de conexões elétricas, usinas deste tipo têm sido instaladas principalmente sobre águas de profundidades de até 30 m.

Com a intenção de se fazer um dimensionamento conservador, no cálculo do potencial eólico *offshore* do Estado do Espírito Santo foram consideradas águas com profundidades de até 20 m. A Tabela 5.2 mostra os resultados da integração do potencial eólico sobre águas com profundidades entre 0 e 10 m (parte superior da tabela), e entre 0 e 20 m (parte inferior da tabela). Na determinação dos limites destas águas, foram utilizadas as curvas batimétricas do IBGE^[59], sendo que esse cálculo não considerou as principais lagoas do Estado, por situarem-se em locais com menores velocidades médias de vento. Os demais critérios utilizados para a integração *offshore* foram os mesmos empregados no cálculo do potencial *onshore* (ver seção 5.1), com o objetivo de possibilitar a comparação entre ambos. Os resultados são, portanto, também conservadores sob o ponto de vista da taxa de aproveitamento utilizada, pois o valor de 1,5 MW/km², que corresponde a 20% do realizável em terrenos planos e sem obstáculos, pode ser significativamente maior sobre a água, onde as restrições de uso são menores.

O potencial eólico sobre o mar ao longo do litoral do Estado do Espírito Santo é bastante significativo (4,7 GW em locais com velocidades maiores que 7,0 m/s, a 75 m de altura), e poderá ser explorado para a construção de usinas eólicas no futuro.

ZONA DE AMORTECIMENTO DO PARQUE NACIONAL MARINHO DOS ABROLHOS

A Zona de Amortecimento (ZA) do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos foi criada em 2006 pelo IBAMA^[61], impondo restrições a ações potencialmente causadoras de prejuízos no entorno do parque, especialmente aquelas associadas à indústria petrolífera. A criação da ZA gerou disputas jurídicas que resultaram na sua anulação pela Justiça Federal em 2007^[62]. As últimas informações^[63] obtidas por ocasião da elaboração deste Atlas são de que o IBAMA aguarda julgamento de recurso; o processo encontra-se aparentemente estagnado desde fevereiro de 2008.

Como indicado na figura 5.14, a ZA abrange uma significativa parcela das águas ao longo do litoral capixaba. Estas águas respondem por 45,5% do potencial eólico indicado na

tabela 5.2 (a 75 m de altura, em locais com profundidades de 0 a 20 m e velocidades médias de vento maiores que 7 m/s). Dentro da ZA há ainda uma Área de Exclusão, onde as restrições são mais severas, e cujas águas respondem por 22,9% deste mesmo potencial.

É possível, entretanto, que uma eventual legalização desta ZA sequer venha a prejudicar futuros empreendimentos da indústria eólica, dados os impactos ambientais mínimos associados a ela e o fato de constituírem alternativa a empreendimentos de outras naturezas que implicam prejuízos ambientais maiores. Tendo em vista esta premissa, aliada à atual indefinição legal, a área abrangida pela Zona de Amortecimento dos Abrolhos não foi excluída do cálculo do potencial eólico sobre o mar apresentado neste Atlas.

Figura 5.15
Plataforma de Produção de Gás Natural de Peroá, em Linhares. A unidade, do tipo fixa, apoia-se sobre fundações do tipo jaqueta, que é uma das alternativas atualmente empregadas pela indústria eólica em aerogeradores *offshore*.

ZIG KOCH

Tabela 5.2

ESTIMATIVA DE POTENCIAL EÓLICO SOBRE O MAR (OFFSHORE)

INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE					
ALTURA [m]	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [GWh]

100	6,0 - 6,5	202	303	0,176	468
	6,5 - 7,0	357	536	0,204	960
	7,0 - 7,5	219	329	0,248	715
	7,5 - 8,0	39	58	0,273	138
	8,0 - 8,5	15	23	0,315	63
	≥ 8,5	2	2	0,344	7

75	6,0 - 6,5	278	417	0,202	739
	6,5 - 7,0	289	433	0,232	881
	7,0 - 7,5	194	292	0,275	702
	7,5 - 8,0	19	29	0,322	81
	8,0 - 8,5	8	11	0,356	35
	≥ 8,5	0	0	0,000	0

100	6,0 - 6,5	220	330	0,177	512
	6,5 - 7,0	894	1341	0,210	2465
	7,0 - 7,5	2396	3595	0,246	7739
	7,5 - 8,0	1118	1677	0,279	4090
	8,0 - 8,5	174	261	0,319	731
	≥ 8,5	15	22	0,345	66

75	6,0 - 6,5	352	528	0,205	948
	6,5 - 7,0	1280	1920	0,241	4057
	7,0 - 7,5	2263	3394	0,276	8202
	7,5 - 8,0	748	1121	0,313	3076
	8,0 - 8,5	128	193	0,355	600
	≥ 8,5	0	0	0,000	0

INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	ENERGIA ANUAL [GWh]

≥ 6,0	834	1251	2351
≥ 6,5	632	948	1883
≥ 7,0	275	412	923
≥ 7,5	55	83	208
≥ 8,0	17	25	70
≥ 8,5	2	2	7

≥ 6,0	788	1182	2437
≥ 6,5	510	765	1698
≥ 7,0	221	332	818
≥ 7,5	27	40	116
≥ 8,0	8	11	35
≥ 8,5	0	0	0

≥ 6,0	4817	7225	15603
≥ 6,5	4597	6895	15091
≥ 7,0	3703	5554	12626
≥ 7,5	1307	1960	4887
≥ 8,0	189	283	797
≥ 8,5	15	22	66

≥ 6,0	4771	7156	16883
≥ 6,5	4419	6628	15935
≥ 7,0	3139	4708	11878
≥ 7,5	876	1314	3675
≥ 8,0	128	193	600
≥ 8,5	0	0	0

0 a 20 m « PROFUNDIDADE » 0 a 10 m

- [1] IPEMA – Instituto de Pesquisas da Mata Atlântica. **Conservação da Mata Atlântica no Estado do Espírito Santo: Cobertura Vegetal e Unidades de Conservação**. Vitória, 2005.
- [2] SEDES - Secretaria de Desenvolvimento do Espírito Santo. **Informações Gerais**. Disponível em: <http://www.es.gov.br/site/espírito_santo/infos_gerais.aspx> Acesso em: 06 mar. 2008.
- [3] AMORIM, H.B. **Inventário Florestal Nacional: Florestas Nativas - Rio de Janeiro e Espírito Santo**. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. Brasília, 1984.
- [4] PICOS da Bandeira e do Cristal já tem novas altitudes. **IBGE - Comunicação Social**. 02 dez. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=267&id_pagina=1> Acesso em: 15 dez. 2008.
- [5] IBGE. **Contagem da População 2007**. Disponível em: <http://www.ibge.com.br/servidor_arquivos_est> Acesso em: 15 dez. 2008.
- [6] IBGE. **Censo Demográfico 2000**. Disponível em: <http://www.ibge.com.br/servidor_arquivos_est> Acesso em: 15 dez. 2008.
- [7] IJSN – Coordenação de Economia e Desenvolvimento. **Produto Interno Bruto e Produto Interno Bruto per capita no ES e Brasil, 2002-2006**. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/follow.asp?urlframe=contasregionais/pib_estadual_tabelas.asp> Acesso em: 18 dez. 2008.
- [8] IJSN – Coordenação de Economia e Desenvolvimento. **Produto Interno Bruto - PIB - a preços de mercado, por município – 2006**. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/follow.asp?urlframe=contasregionais/pib_estadual_tabelas.asp> Acesso em: 18 dez. 2008.
- [9] IJSN. **Indicadores de Desenvolvimento do Espírito Santo – INDES**. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/follow.asp?urlframe=perfil/index_regioes.htm> Acesso em: 20 dez. 2008.
- [10] SEDES – Secretaria de Desenvolvimento do Espírito Santo. **Indicadores de Conjuntura Econômica**. Disponível em: <<http://www.sedes.es.gov.br/default.asp?arq=indica>> Acesso em: 01 dez. 2008.
- [11] ONS. **2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2008-2012**. Nota Técnica ONS 118/2008. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/operacao/previsao_carga/II_Revisao_Quadrimestral_2008.pdf> Acesso em: 02 jan. 2009.
- [12] SEDES – Secretaria de Desenvolvimento do Espírito Santo. **Infraestrutura (do ES)**. Disponível em: <<http://www.sedes.es.gov.br/default.asp?arq=portos>> Acesso em: 04 jan. 2009.
- [13] ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Anuário Estatístico Portuário 2007**. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/Portal/Anuarios/Portuario2007/Index.htm>> Acesso em: 05 jan. 2009.
- [14] GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento dos Transportes. **Anuário Estatístico dos Transportes 2001 (ano base 2000)**. Disponível em: <<http://www.geipot.gov.br/anuario2001/index.htm>> Acesso em: 05 nov. 2008.
- [15] DER-ES - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Espírito Santo. **Gerência da Malha Rodoviária: Relatório de Trechos, 26/11/2007**. Disponível em: <<http://www.der.es.gov.br/download/ListaRodovias.pdf>> Acesso em: 5 dez. 2008.
- [16] IJSN. **O Espírito Santo em Mapas**. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/follow.asp?urlframe=mapas/indice.html>> Acesso em: 28 dez. 2008.
- [17] BRASIL. Ministério dos Transportes. **Mapa dos Principais Rios Navegáveis**. Atualizado em jan. 2008. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/bit/inhidro.htm>> Acesso em: 31 dez. 2008.
- [18] ANEEL – Banco de Informações de Geração. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15>> Acesso em: 15 mar. 2009.
- [19] ASPE – Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo. **Energia no Espírito Santo**. Disponível em: <http://www.aspe.es.gov.br/default.asp?arq=energia_no_espírito> Acesso em: 30 dez. 2008.
- [20] ANEEL. **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico**. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/brasil/viewer.htm>> Acesso em: 05 out. 2008.
- [21] ESCELSA. **Sistema Escelsa – Geração, Transmissão e Distribuição** – Configuração para 2007.
- [22] DER-ES. **Mapa do Sistema Rodoviário – Situação física em novembro de 2006**. Secretaria de Transportes e Obras Públicas. Disponível em: <<http://www.der.es.gov.br/MapaRodoviarioDER.XML>> Acesso em: 15 nov. 2008.
- [23] ASPE. **UCs_est_fed_ES.zip**. ARC shape. Arquivo fornecido por e-mail.
- [24] IBGE. **Mapa de Clima do Brasil 2002**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm> Acesso em: 28 dez. 2008.
- [25] MORAES, C. **Geografia do Espírito Santo**. Instituto Histórico e Geográfico do Espírito Santo. Vitória, 2004.
- [26] EMBRAPA. **Banco de Dados Climáticos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br>> Acesso em: 01 dez. 2008.
- [27] SANT' ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do Sudeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**. Presidente Prudente. v. 1, n. 1. p. 43-60, dez. 2005.
- [28] NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration; NASA - National Aeronautics and Space Administration. **U.S. Standard Atmosphere**. Washington, D.C., 1962.
- [29] ROHATGI, J. S.; NELSON, V. **Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power**. Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994.
- [30] IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil 2004**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/mapas_murais> Acesso em: 02 jan. 2009.
- [31] MITTERMEIER, R.A.; MYERS, N.; GIL, P.R. & MITTERMEIER, C.G. **Hotspots: earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions**. Toppan Printing Co. Japão, 1999.
- [32] IPEMA – Instituto de Pesquisas da Mata Atlântica. **Conservação da Mata Atlântica no Estado do Espírito Santo: Cobertura Vegetal, Unidades de Conservação e Fauna Ameaçada**. Vitória, 2004.

[33] INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; ISA – Instituto Socio-Ambiental; FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas da Evolução dos Remanescentes Florestais e Ecossistemas Associados no Domínio da Mata Atlântica no Período 1985-1990**. São Paulo, 1993.

[34] BRASIL. Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, v. 138, seção I, p.01-06 FASC, 19 jul. 2000.

[35] BRANDON, K. Natural protected areas and biodiversity conservation. In: **Congresso Brasileiro de Unidades de Conservação**. Anais, Campo Grande, 2000. p. 1-10.

[36] 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, ago. 1999.

[37] WINDPOWER MONTHLY News Magazine. **The Windicator**. v. 24, n.1, p. 71. jan. 2009.

[38] MOLLY, J. P.; Technical Trends in Wind Turbine Development, **DEWI Magazin**, n. 20, p. 52-59, feb. 2002.

[39] AWS Scientific, Inc. **Wind Resource Assessment Handbook**, National Renewable Energy Laboratory. WindPower '96 Training Seminar Edition, Denver, CO, Jun. 23, 1996.

[40] 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" Denver, CO, Jun. 23-27, 1996. Published at AWEA conference proceedings.

[41] JENSEN, N.O. **A Note on Wind Generator Interaction**. Riso National Laboratory, Report Riso-M-2411, Roskilde, Denmark, 1984.

[42] 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. Oct. 14-18, 1991.

[43] TROEN, I.; MORTENSEN, N. G.; PETERSEN, E. L. **Wind Atlas Analysis and Application Program**. Risoe National Laboratory. Denmark.

[44] PHILLIPS, G.T. **A Preliminary User's Guide for the NOABL Objective Analysis Code**. DOE/ET/20280-T1, U.S. Department of Energy, Jul. 1979.

[45] MARKUS, M.; BAILEY, B. **Survey of Wind Flow Models**, National Renewable Energy Laboratory, TAT-5-15208-01, Oct. 1996.

[46] BARNARD, J. C. An Evaluation of Three Models Designed for Siting Wind Turbines in Areas of Complex Terrain. **Solar Energy**, v. 46, n.5, p. 283-294, 1991.

[47] BROWER, M. **WindMap™ Version 3.10**. Brower & Company, 2001. Disponível em: <<http://www.browerco.com>>

[48] BROWER, M.; BAILEY, B.; ZACK, J. Micrositing Using the MesoMap System. **American Wind Energy Association**, 2002. Disponível em: <<http://www.truewind.com>>

[49] STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Atmospheric Sciences Library. Kluwer Academic Publishers, 1991.

[50] MEASNET - **Measuring Network of Wind Energy Institutes**. Disponível em: <<http://www.measnet.com>>

[51] NASA. **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>> Acesso em 02 ago. 2008.

[52] AMARANTE, O. A. C. do, BROWER, M.; ZACK, J. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, MME /ELETROBRÁS/CEPEL, 2001.

[53] AMARANTE, O. A. C. do. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará**. SEINFRA/CE. 2001.

[54] AMARANTE, O. A. C. do; SILVA, F. J. L. da. **Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia**. Camargo Schubert Engenharia Eólica, COELBA/Iberdrola Empreendimentos do Brasil. out. 2001.

[55] AMARANTE, O. A. C.; SILVA, F. J. L. da; CUSTÓDIO, R. S.; GRAVINO, N. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. SEMC/RS, ago. 2002.

[56] BRASIL – Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2007**. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BEN2007_Default.aspx> Acesso em: 02 jan. 2009.

[57] MOSEMAN, A. Can Offshore Grids Solve our Wind Power Wooses? **Popular Mechanics**, 11 Dec. 2008. Disponível em: <<http://www.popularmechanics.com/science/earth/4295504.html>> Acesso em: 15 jan. 2009.

[58] DWIA – Danish Wind Industry Association. **Offshore Wind Conditions**. Disponível em: <<http://www.windpower.org/en/tour/wres/offshore.htm>> Acesso em: 20 jan. 2009.

[59] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Carta Internacional ao Milionésimo**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 09 jan. 2009.

[60] DEWI - Deutsches Windenergie-Institut. **Energia Eólica**. Wilhelmshaven, 1998.

[61] IBAMA. Portaria nº 39, de 16 de maio de 2006. **Diário Oficial da União**, Nº94, 18 mai. 2006. Seção 1, p. 44.

[62] BRASIL. Seção Judiciária do Distrito Federal. Mandado de Segurança Individual. Município de Caravelas/BA e Presidente do IBAMA. Juiz: José Márcio da Silveira e Silva. 14 jun. 2007. Disponível em: <<http://www.df.trf1.gov.br/destaques/IBAMA-ABROLHOS%20-%2019%20JUN%2007.pdf>> Acesso em: 20 fev. 2009.

[63] BRASIL. Seção Judiciária do Distrito Federal. Consulta Processual. Processo nº 2006.34.00.021017-7. Disponível em: <<http://processual-df.trf1.gov.br/Processos/ProcessosSecaoOra/ConsProcSecaoopro.php?SECAO=DF&proc=200634000210177>> Acesso em: 21 fev. 2009.

[64] IAGA - International Association of Geomagnetism and Aeronomy. **IRGF - International Geomagnetic Reference Field - version 10 (1900-2010)**. Modelo implementado no programa **Geomag 6.1**. Disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/>> Acesso em: 10 jan.2009.



ZIG RÖCH

Apêndice

Fórmulas e Mapas Úteis

○ **Espírito Santo**

- ① **a.1**
Distribuição de Weibull
- ② **a.2**
Lei Logarítmica e Rugosidade
- ③ **a.3**
Densidade do Ar
- ④ **a.4**
Produção Anual de Energia (PAE) e Fator de Capacidade
- ⑤ **a.5**
Declinação Magnética

a.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 frequência de ocorrência de uma velocidade u é representada matematicamente por^[29]

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

No Gráfico a.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^[29]

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

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^[53].

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 velocidade do vento é dado por

$$\bar{u} = \int_0^{\infty} u f(u) du = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

onde a Função Gama (Γ) é definida por

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

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

O Fluxo ou Densidade de Potência Eólica é definido como

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (\text{W/m}^2)$$

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

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

onde ρ é a densidade do ar^[43].

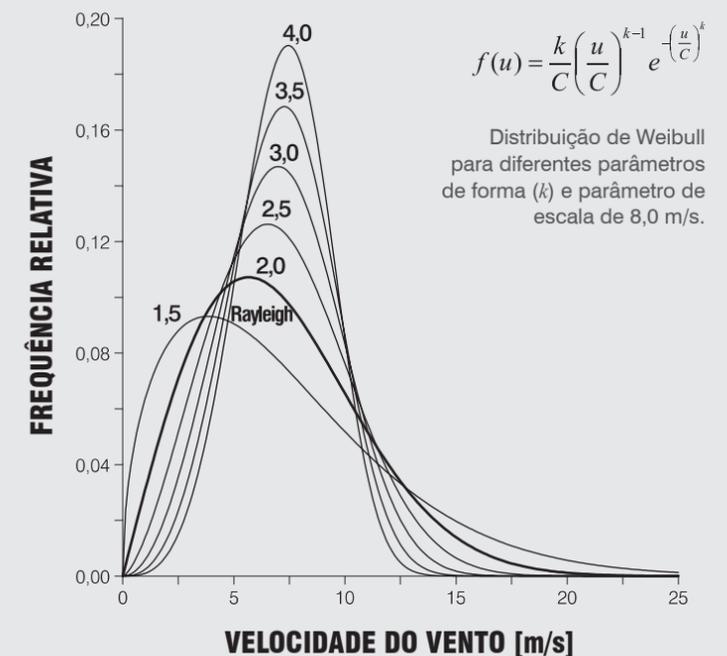


Gráfico a.1 – Distribuições de Weibull e Rayleigh.

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

Tabela a.1 – Função Gama para diferentes valores de k .

a.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

$$u(h) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right),$$

onde $u(h)$ é a velocidade do vento na altura h , z_0 é a rugosidade do terreno, $\kappa \cong 0,4$ é a constante de Von Kármán e u_* é a velocidade de atrito^[49].

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

$$\frac{u(h_2)}{u(h_1)} = \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)}$$

Explicitando-se a rugosidade desta expressão, tem-se

$$z_0 = \exp\left[\frac{u(h_2)\ln(h_1) - u(h_1)\ln(h_2)}{u(h_2) - u(h_1)}\right]$$

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 α 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

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

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

Fluxo de Potência Eólica (W/m ²)	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
1.000		9,0	9,5	9,8	10,1	10,5	11,0

Nível do Mar, 15°C ($\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$)

Tabela a.2 – Variação do fluxo de potência eólica com a velocidade média do vento e o fator de forma de Weibull.

a.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/m³). 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 Espírito Santo, considerando-se um perfil vertical de temperatura segundo a Atmosfera Padrão ISA + 11,2°C^[26] (temperatura média anual medida na cidade de Vitória, 1946-1990), calculado sobre o modelo de relevo na resolução de 200 m X 200 m e ajustado para dados de temperatura de longo prazo (1946-1990) coletados em 11 estações do INMET ao longo do Estado e nas suas proximidades^[26].

Uma expressão aproximada para o cálculo da densidade do ar ρ (em kg/m³) a partir da temperatura T (em °C) e altitude z (em metros) é dada por:

$$\rho = \frac{352,98 \times \left(1 - \frac{z}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + T}$$

a.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 frequência de ocorrência das velocidades de vento ($f(u)$)^[60], conforme ilustrado no Gráfico a.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:

$$FC = \left(\frac{PAE}{8,76 \times P_n} \right)$$

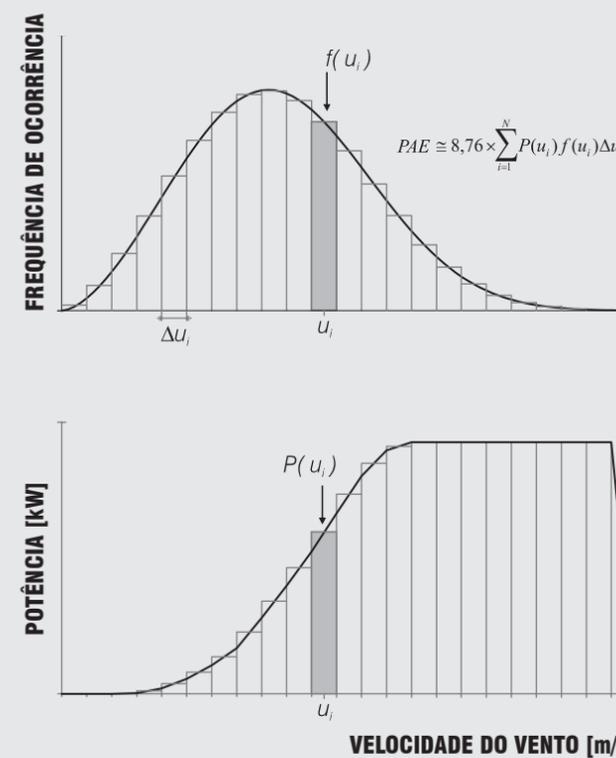
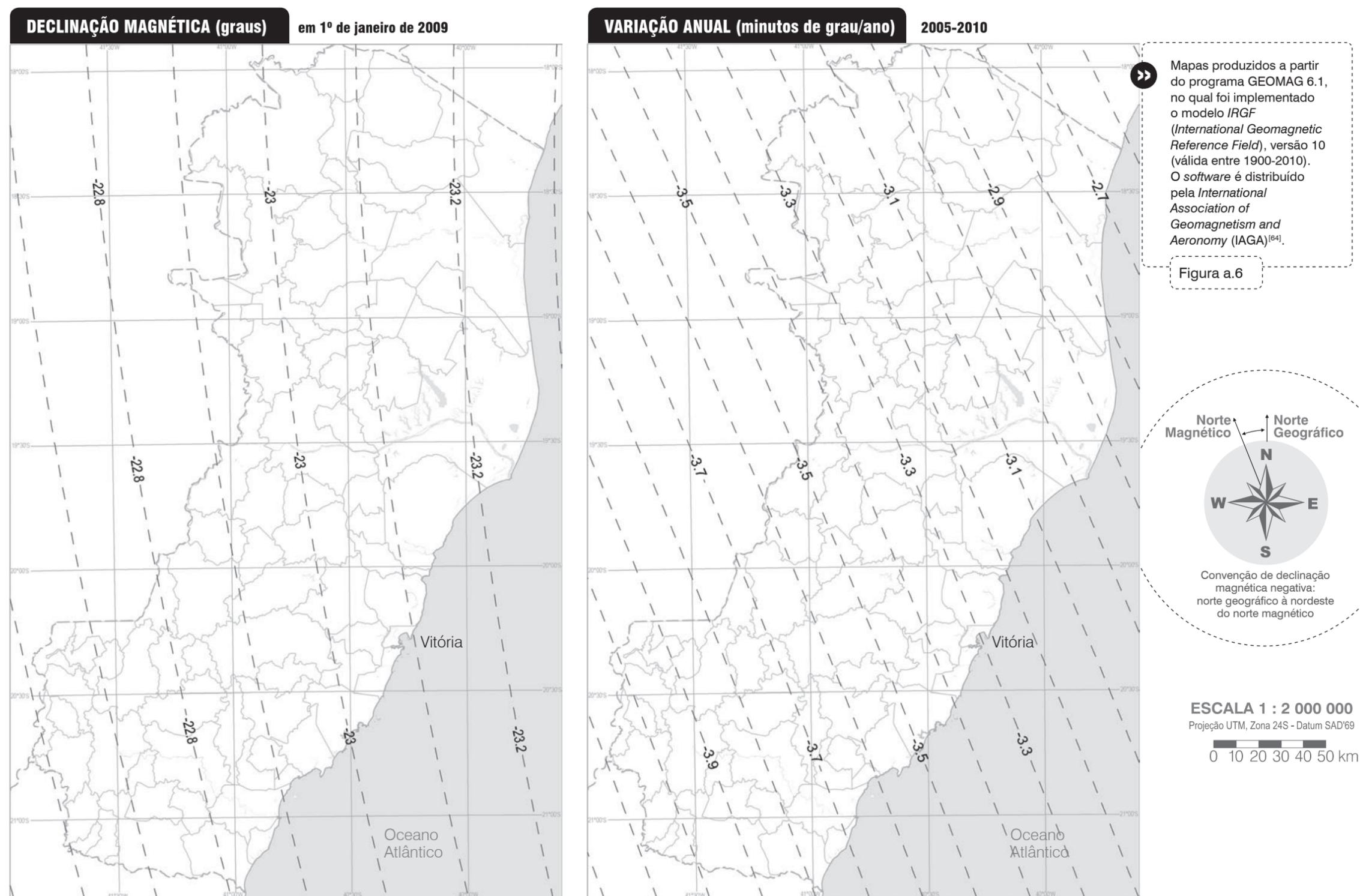


Gráfico a.2 – Cálculo da Produção Anual de Energia (PAE).



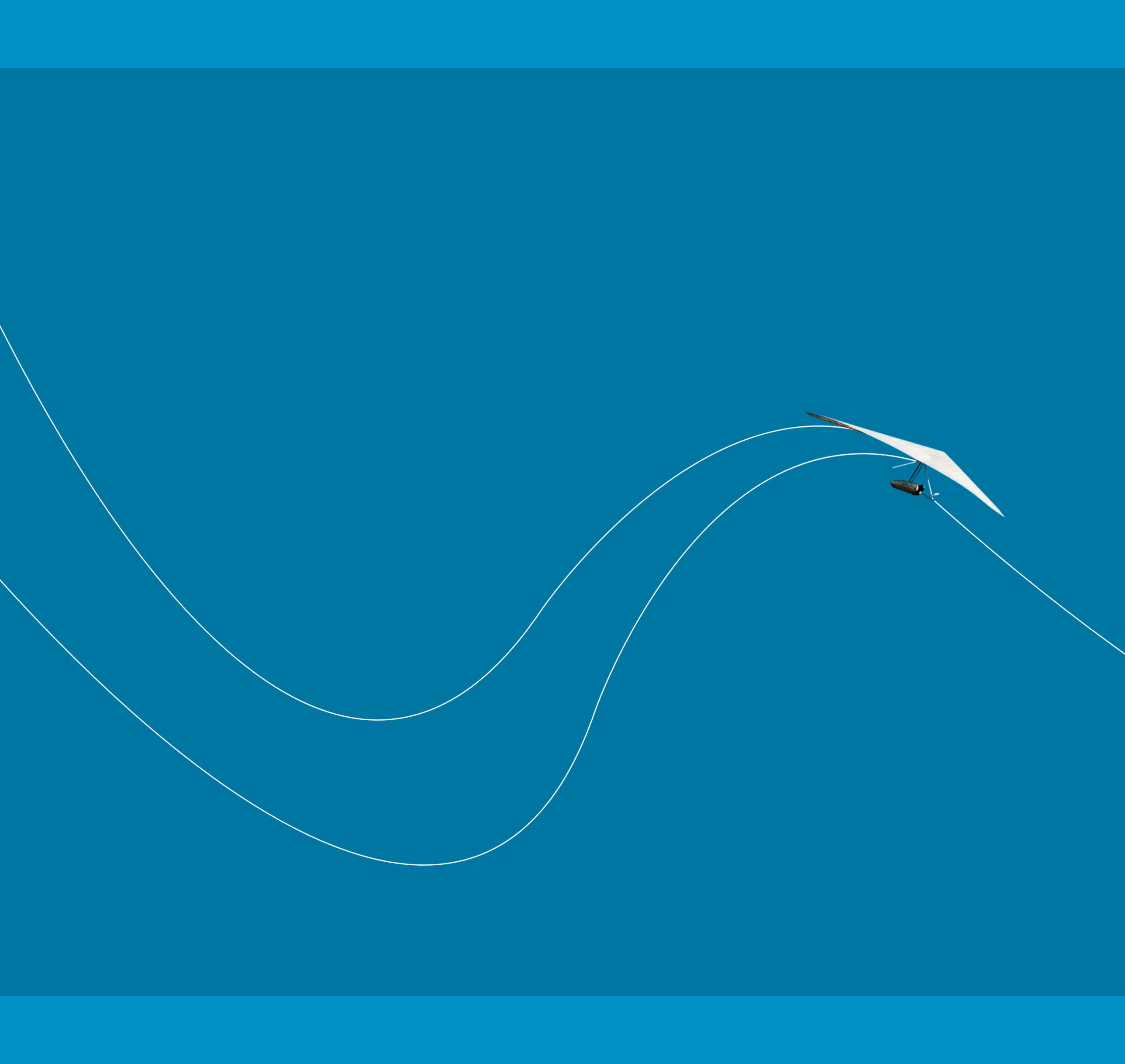
a.5 Declinação Magnética

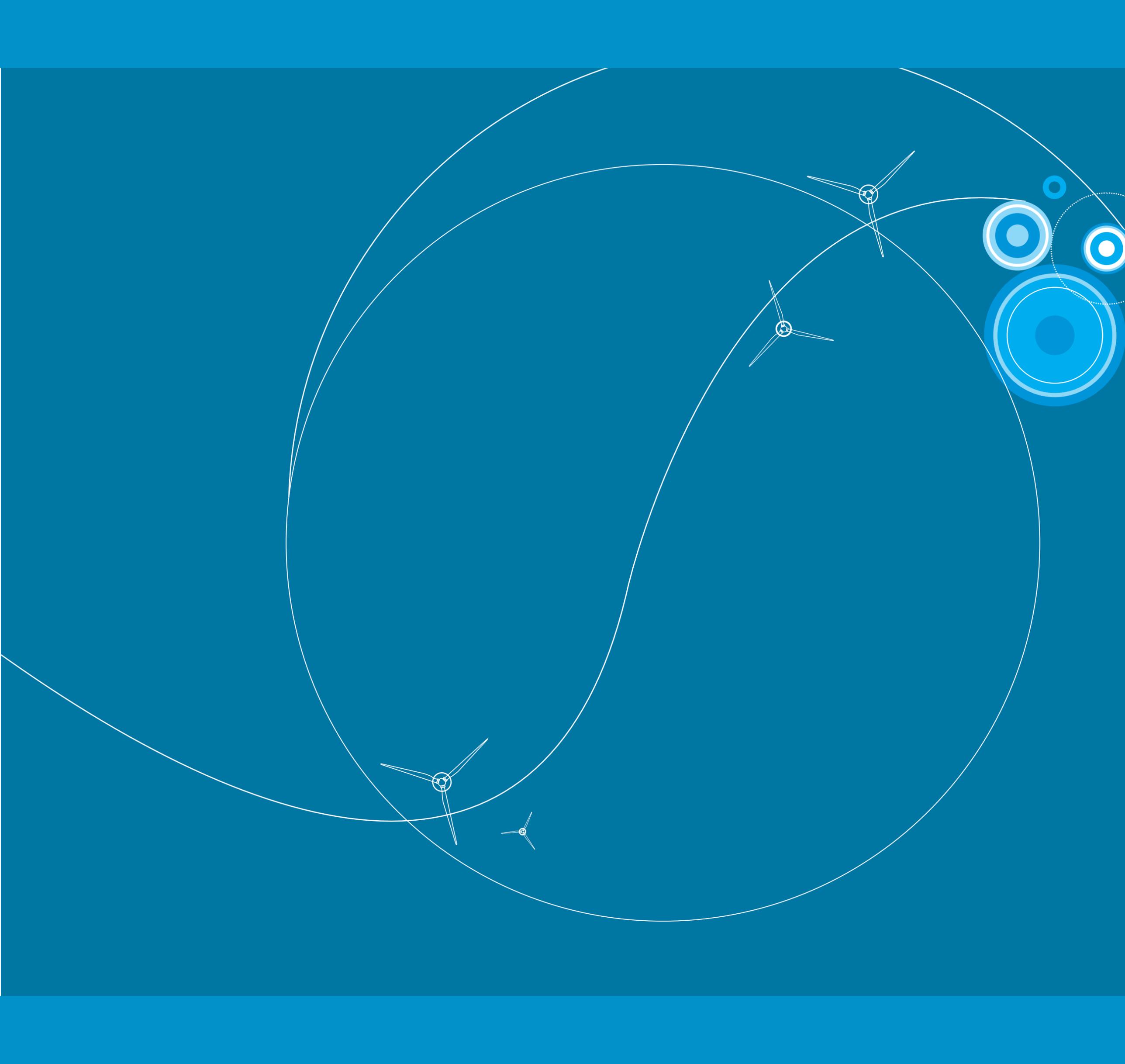
Como informação de auxílio à instalação futura de sensores de direção em torres anemométricas no Estado do Espírito Santo, foram desenvolvidos mapas de declinação magnética e variação magnética anual, para o ano de 2009^[64]. Os mapas são apresentados na Figura a.6.













ASPE

Agência de Serviços Públicos de Energia
do Estado do Espírito Santo

Secretaria
de Desenvolvimento

UM NOVO

ESPÍRITO SANTO

Governo do Estado

 **escelsa**
energias do brasil



CAMARGO SCHUBERT
Engenharia Eólica