1. Introdução

1.1 Estudos do Potencial Eólico Brasileiro

Com o uso de ferramentas possibilitadas por recentes avanços da capacidade computacional, de simulações baseadas nas leis físicas de interação entre as diversas variáveis meteorológicas – registradas e consolidadas em extensos bancos de dados e validadas por registros anemométricos selecionados –, o presente Atlas supera obstáculos históricos ao conhecimento do potencial eólico brasileiro, que é apresentado com detalhamento e representatividade antes impossíveis.

O potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido objeto de estudos e inventários desde os anos 1970 e o seu histórico revela o lento mas progressivo descortinamento de um potencial energético natural de relevante magnitude existente no país.

Em 1976-77, um processamento específico de dados anemométricos medidos em aeroportos brasileiros foi realizado no Instituto de Atividades Espaciais, no Centro Técnico Aeroespacial, IAE/CTA [1].* As maiores velocidades médias anuais, da ordem de 4m/s a 10m de altura, já induziam marginalmente a viabilidade técnica de máquinas de pequeno porte para sistemas isolados e apontavam o litoral da região Nordeste e o Arquipélago de Fernando de Noronha como os sítios mais promissores para a realização de projetos-piloto para geração de energia eólio-elétrica. Até 1981, diversos protótipos de turbinas eólicas de pequeno porte (2kW e 5kW) foram desenvolvidos e um campo de testes foi operado no Centro de Lançamento de Foguetes da Barreira do Inferno, na costa do Rio Grande do Norte, em projeto conjunto com o DFVLR-IBK, órgão de pesquisa aeroespacial da Alemanha.

Em 1987, a CHESF – Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco finalizou um inventário do potencial eólico da região Nordeste [2], realizado a partir de processamento/análise de registros anemográficos para um período de 5 anos (1977-1981) de 81 estações a 10m de altura, pertencentes à Rede Meteorológica do Nordeste – SUDENE. Os dados, processados pela Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, foram publicados em sumários e mapas de isolinhas para velocidades a 10m de altura. As maiores velocidades médias anuais encontradas para a altura de 10m foram de 5,5m/s e 4,3m/s, para Macau, RN e Caetité, BA, respectivamente.

Também na década de 1980, diversos estudos regionais foram conduzidos para mapeamento eólico de estados brasileiros, destacando-se os trabalhos realizados em Minas Gerais e no Rio Grande do Sul.

O primeiro "Atlas do Levantamento Preliminar do Potencial Eólico Nacional" foi iniciado em 1979, pela ELETROBRÁS-CONSULPUC [3]. Ainda na década de 1980, a ELETROBRÁS e a Fundação Padre Leonel Franca deram continuidade a esse trabalho, com a realização de um extenso estudo meteorológico que incluiu o processamento de dados de 389 estações anemométricas de 10m de altura, existentes em todo o território nacional, relacionadas no quadro 2:

Quadro 2

Instituto Nacional de Meteorologia:	319
Ministério da Aeronáutica (aeroportos):	51
CEMIG – Cia. Energética de Minas Gerais:	10
ELETROBRÁS:	2
PORTOBRÁS – Empresa de Portos do Brasil:	2
COPEL – Cia. Paranaense de Energia:	2

O "Atlas do Potencial Eólico Nacional" [4], resultante desse trabalho, indicou a tendência a velocidades maiores de vento no litoral brasileiro e também em áreas do interior favorecidas por relevo e baixa rugosidade. O mapeamento por isolinhas das velocidades médias a 10m de altura também possibilitou identificar locais com médias anuais entre 5m/s e 6m/s.

Todos esses estudos realizados até o final da década de 1980 foram prejudicados pela consideração exclusiva de registros anemométricos obtidos a alturas máximas de 10m. A maioria dos seus dados é mascarada pela influência de rugosidade e obstáculos próximos; esses dados não são necessariamente representativos das áreas geográficas em que estão instalados os equipamentos. Metodologias para a correção e extrapolação desses dados para alturas desejadas (WAsP, por exemplo) ainda não se achavam disponíveis na época. Mesmo que existissem, aplicá-las ao território brasileiro em toda a sua extensão possivelmente implicaria custos e prazos excessivos, além de grandes margens de incerteza nos resultados.

Na década de 1990 iniciaram-se medições específicas para inventários de potencial eólico em torres de maior altura (>=20m) instaladas em locais especificamente selecionados em diversas regiões do Brasil: litoral do Ceará e Estados da Bahia, Minas Gerais e Paraná.

Em 1996, um relatório da CHESF [5] apresentou um estudo do potencial eólico do litoral do Ceará e do Rio Grande do Norte, já a partir dessas primeiras medições na região. Simulações computacionais com uso de curvas de desempenho de turbinas de 500kW e 600kW indicaram a possibilidade de geração de 9,55 TWh/ano e 2,96 TWh/ano com a ocupação de 10% dos litorais do Ceará e Rio Grande do Norte, respectivamente.

Em 1999, a COPEL publicou o "Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná", a partir das medições efetuadas por 5 anos em 25 locais especialmente selecionados, em torres de 18m a 64m de altura. Esse mapa foi produzido na resolução de 2km a partir do software WindMap, com utilização de modelos de geoprocessamento de relevo e rugosidade do Estado do Paraná. Além de revelar áreas de grande potencial eólico no interior do Paraná, o trabalho indicou um potencial de geração eólica de 5,8 TWh/ano no estado, utilizando-se apenas as áreas com velocidades médias anuais superiores a 6,5m/s.

Com a aceleração mundial do aproveitamento eólio-elétrico em escala e a instalação das primeiras usinas eólicas no Brasil, no final da década de 1990, iniciaram-se as primeiras medições anemométricas específicas para estudos de viabilidade, com uso de torres de 30-50m e equipamentos com precisão e procedimentos requeridos para a finalidade. Essas medições concentraram-se inicialmente nos Estados do Pará, Ceará, Paraná, de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul.

Já resultante dessas medições mais precisas, a Secretaria da Infra-Estrutura do Governo do Estado do Ceará publicou em 2001 o "Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará". Também com a utilização da metodologia WindMap, os mapas temáticos de velocidades médias anuais de vento são apresentados na resolução de 500m, para as alturas de 50m e 70m. Destacaram-se as áreas de baixíssima rugosidade das dunas do litoral cearense, com velocidades médias anuais da ordem de 9m/s. A integração das áreas em software de geoprocessamento revela um potencial aproveitável da ordem de 12,0 TWh na altura de 50m e de 51,9 TWh na altura de 70m, para ventos médios anuais superiores a 7m/s.

1.2 O Brasil: Geografia

Este Atlas do Potencial Eólico cobre todo o território brasileiro. Com 8.514.215 km^2, o Brasil é o quinto país do mundo e o maior da América Latina em área territorial. Estendendo-se entre as latitudes 5°16'N e 33°45'S e longitudes 32°23'W e 73°59'W (figura 1.1), o Brasil apresenta distintas regiões imersas em várias zonas de climas e regimes sinóticos de circulação atmosférica. Seus 7.367 km de extensão litorânea com o Oceano

** As obras correspondentes às referências em algarismos arábicos entre colchetes encontram-se listadas na página 45*

Atlântico constituem um complexo indutor de mecanismos de mesoescala ao longo dos quais ocorrem brisas marinhas de variadas amplitudes diurnas e sazonais.

O relevo interior (figura 1.2) contrapõe extensas planícies com altitudes médias inferiores a 250m – entre as quais se destacam as da Amazônia, do Pantanal e do Rio Grande do Sul – aos planaltos que se estendem do sul até a região central, com altitudes médias entre 750m e 1.000m. Ao contrário de seus vizinhos andinos a oeste, o Brasil não se caracteriza por grandes elevações. Em poucos locais a altitude ultrapassa 2.000m, e em seu ponto máximo, o Pico da Neblina (AM), atinge 3.014m.

No caso eólico, o relevo exerce distintas influências conforme o caso e a região: como obstáculo ao movimento da camada atmosférica inferior, como indutor de fenômenos de mesoescala (brisas montanha-vale) e como gerador de ondas e acelerações orográficas. Como a camada inferior da atmosfera tem espessura da ordem de 600m a 1.500m, áreas territoriais elevadas geralmente estão imersas em distintas camadas atmosféricas e regimes de vento.

Aliado aos regimes pluviais com origem no mecanismo de circulação atmosférica, o relevo brasileiro é responsável pelo notável aproveitamento hidrelétrico realizado em suas bacias, destacando-se as dos rios Paraná-Paraguai, São Francisco e Araguaia-Tocantins. No final do século passado, a eletricidade de fonte hídrica supria cerca de 93% do consumo brasileiro. Visíveis na figura 1.2, essas principais bacias e respectivas áreas alagadas por reservatórios hidrelétricos encontram-se relativamente distantes dos principais centros de consumo, indicados em vermelho.

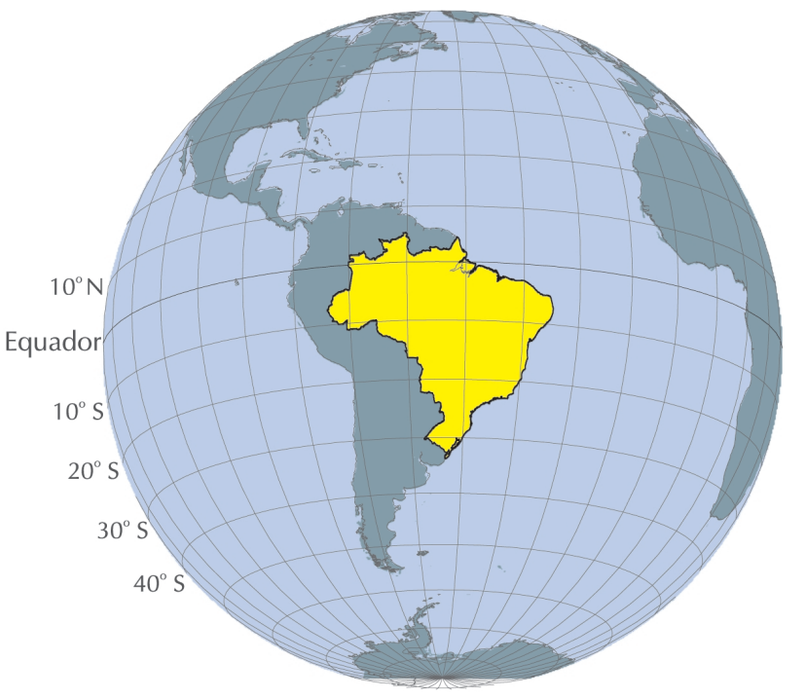

Figura 1.1 – Posição geográfica do Brasil, projeção ortográfica

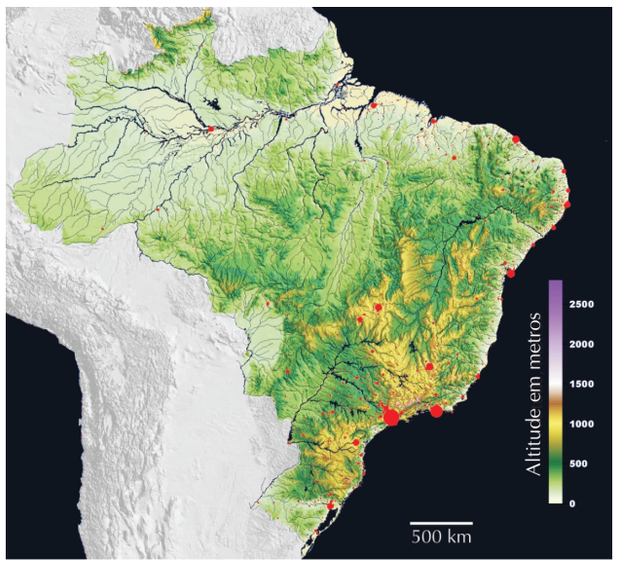

Figura 1.2 – Relevo

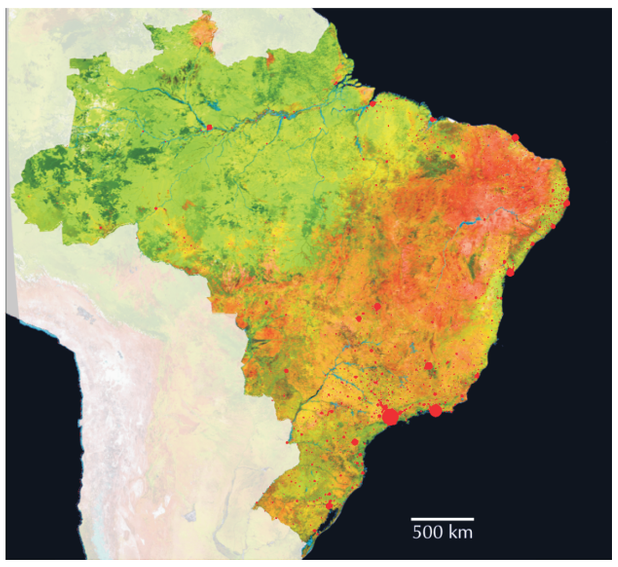

Figura 1.3 – Mosaico de imagens compostas do satélite SPOT

A população brasileira é de cerca de 170 milhões de habitantes, 80% concentrados em centros urbanos e 20% dispersos no meio rural. Existem regiões de baixa densidade demográfica, a exemplo da Amazônia, em contraste com regiões de alta densidade, como a Sudeste.

Grande parte do território nacional é coberto por florestas, como se apresenta na figura 1.3.

O Governo brasileiro, por intermédio do Ministério de Minas e Energia, vem desenvolvendo esforços para a universalização da oferta de energia elétrica a todo o meio rural, bem como para a crescente e necessária interligação do sistema elétrico em escala nacional. Além da expansão territorial do sistema elétrico, as taxas de crescimento econômico de um país em desenvolvimento como o Brasil requerem a expansão contínua da capacidade geradora, a taxas compatíveis. Nesse contexto, a tecnologia eólio-elétrica interligada à rede emerge como uma das alternativas de geração complementar. Este ATLAS insere-se nas ações de inventário estratégico das fontes energéticas existentes no território brasileiro.

1.3 SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Em 1999, cerca de 93% do consumo total (315 TWh) de energia elétrica no Brasil foram supridos por usinas hidrelétricas [6]. Desse percentual, 39,6% foram consumidos pelos setores residencial e comercial; 44%, pelo setor industrial; e 3,9%, pelo setor agropecuário.

O desenvolvimento econômico do país potencializa necessidades de expansão da oferta de energia em níveis acima de 5% ao ano, pelos próximos 10 anos [6].

Uma síntese do sistema elétrico brasileiro: geração, transmissão e centros urbanos é mostrada na figura 1.4, na qual pode-se notar:

- o sistema de transmissão já é interligado em escala nacional, com tendência ao seu fortalecimento à medida que novos investimentos programados forem realizados;
- os centros de consumo estão relativamente afastados dos principais centros de geração, com distâncias da ordem de 500km a 1.000km. O volume maior de geração e consumo está concentrado na região Sudeste;
- áreas reconhecidamente importantes para o aproveitamento do potencial eólico no Brasil, como os litorais Nordeste e Sul, encontram-se próximas às extremidades do sistema de transmissão, distantes dos principais centros de geração elétrica.

A figura 1.4 não mostra as malhas de subtransmissão e distribuição elétrica, as quais também encontram-se em notável expansão no âmbito do programa governamental que visa ao atendimento de todos os consumidores rurais do país.

Em 1999, 94,9% das residências de todo o Brasil já eram atendidas com energia elétrica [6].

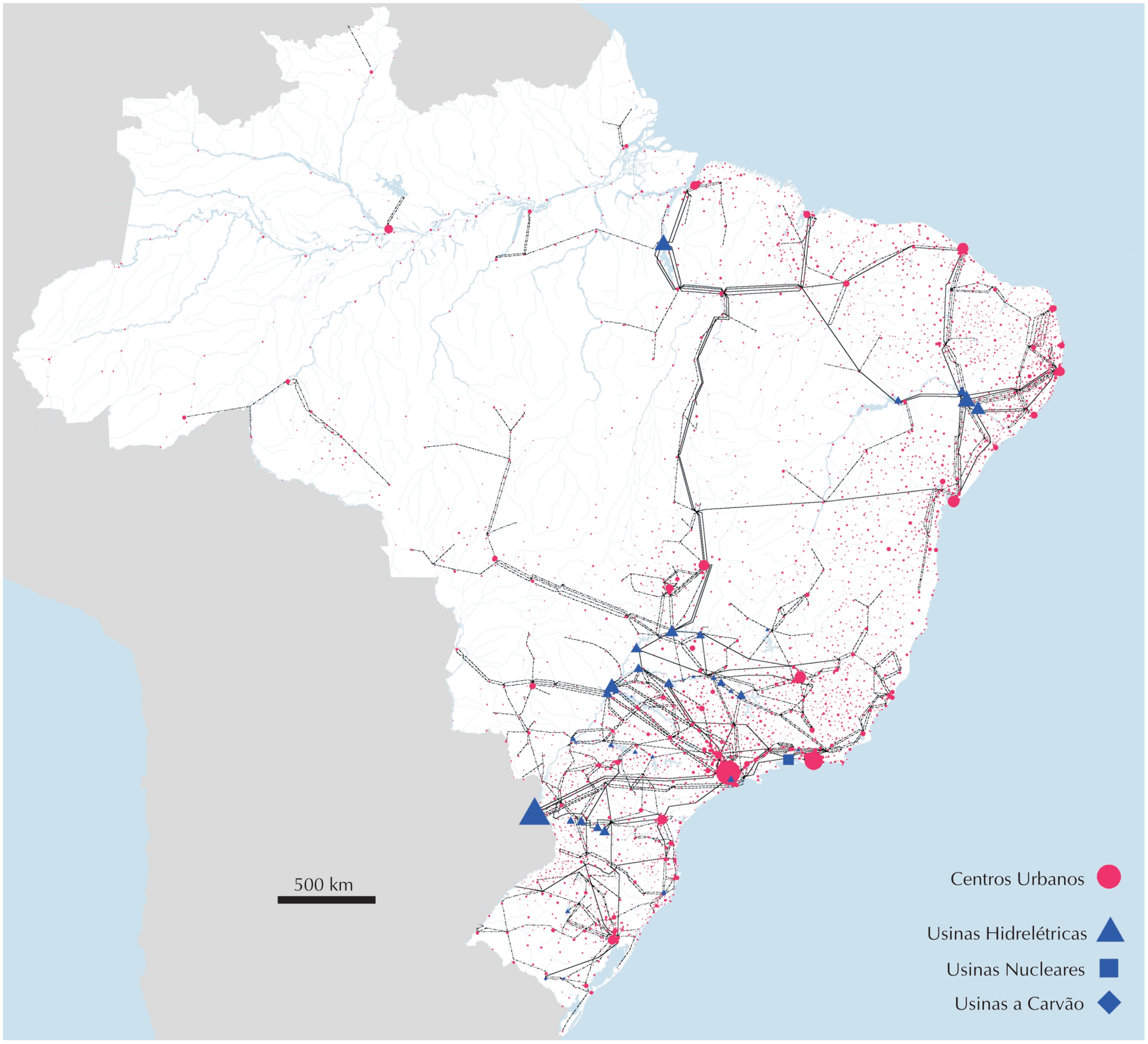

Figura 1.4 – Síntese do sistema elétrico brasileiro: geração, transmissão e centros urbanos

1.4 CLIMA E SAZONALIDADE

Pela sua extensão em latitude, o Brasil apresenta diferentes climas que variam do equatorial (úmido e semi-úmido), na região Norte, ao subtropical, na região Sul. Na figura 1.5 são apresentadas as médias climatológicas sazonais de precipitação e temperatura [7], que ilustram os diferentes tipos de clima e suas sazonalidades. As velocidades médias sazonais de vento (a 50m de altura), resultantes do presente ATLAS, estão adicionadas à figura 1.5 para ilustrar a complementaridade sazonal entre o potencial eólico e o hídrico, sendo este último fundamentalmente associado à precipitação pluviométrica.

O norte do país é dominado pelo clima equatorial úmido, caracterizado por temperaturas médias superiores a 25ºC e chuvas acima de 2.000mm/ano. É a região da Floresta Amazônica, gerada e mantida pela maior intensidade pluviométrica, cuja causa é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), para onde convergem os ventos de superfície oriundos dos dois hemisférios terrestres. Uma área de clima equatorial semi-úmido ocorre mais ao norte, abrangendo a metade nordeste do Estado de Roraima e o noroeste do Pará, com totais pluviométricos entre 1.500mm/ano e 2.000mm/ano.

O clima tropical abrange praticamente toda a costa, desde o Maranhão até partes de São Paulo, estende-se a oeste até Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, inclui partes do Nordeste e estados centrais como Goiás e Tocantins. É caracterizado por chuvas com sazonalidade bem definida: estação seca de 4-5 meses (abril-setembro) e chuvosa (novembro-março). Essa sazonalidade tem importante papel energético no sistema elétrico brasileiro, de geração predominantemente hidráulica, pois suas principais bacias de aproveitamento têm origem nessa região (figura 1.2). Ao longo das serras de Minas Gerais e São Paulo o clima é tropical de altitude, com temperatura média anual pouco inferior a 20ºC.

No Sertão nordestino destaca-se um enclave de clima semi-árido, com temperaturas médias anuais superiores a 25ºC, pluviosidade inferior a 750mm/ano e longas estiagens de mais de 8 meses por ano. Abaixo do Trópico de Capricórnio (latitude 23º27'S) a região Sul é dominada pelo clima subtropical, cujas características térmicas e pluviométricas são similares às do clima temperado, com temperaturas médias anuais inferiores a 20ºC e chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

As amplitudes térmicas anuais são menores na grande região mais próxima ao Equador, aumentando em direção ao extremo sul do país.

Entre os grandes fatores que influem no clima brasileiro estão a Zona de Convergência Intertropical ao norte, móvel ao longo do ano e para a qual convergem os ventos alísios; as distintas ações exercidas pelo relevo continental, incluindo-se a formidável muralha à circulação atmosférica exercida pelo maciço dos Andes no extremo oeste do continente sul-americano; a ação contínua da alta pressão do Anticiclone Tropical Atlântico; e a ação periódica irregular das massas de ar polares que adentram as regiões Sul e Sudeste em maior intensidade. A Amazônia representa uma região bastante peculiar na Terra, pela extensão da área ocupada por florestas equatoriais e pela intensidade e o volume em que ocorrem as trocas de energia entre água e atmosfera, em um sistema superfície-atmosfera fortemente acoplado.

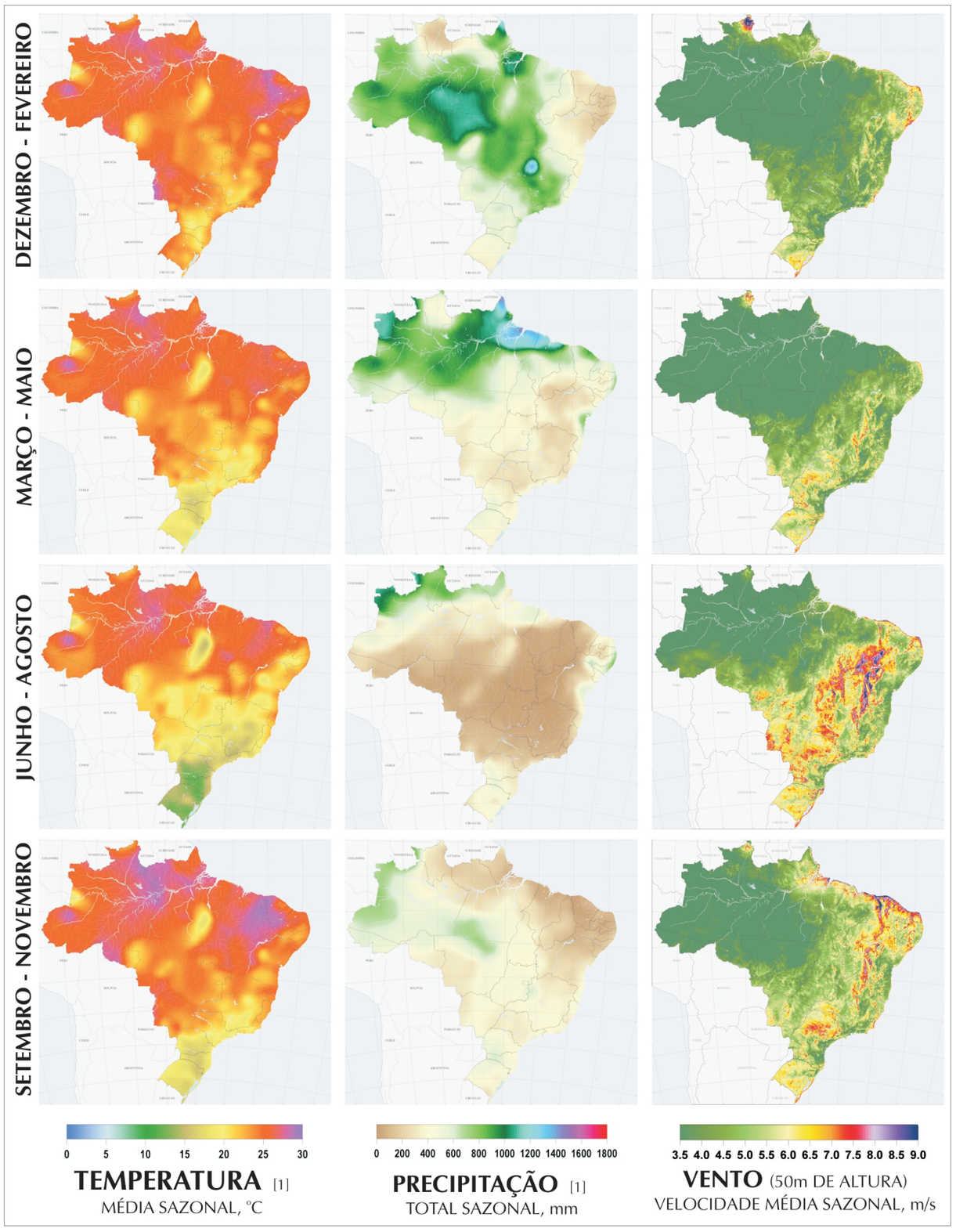

Figura 1.5 – Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil