

A distribuição da rede gravimétrica no Brasil e o desenvolvimento da infraestrutura nacional

RESUMO

No Brasil e em vários países, é possível observar o relacionamento espacial entre o nível de ocupação do uso do solo e a infraestrutura instalada. Partindo-se do pressuposto de que as redes geodésicas servem de apoio para a instalação de algumas infraestruturas (como redes cadastrais municipais), esse trabalho tem como objetivo investigar o relacionamento entre a atual ocupação territorial com a cobertura espacial da rede gravimétrica brasileira. Além disso, propõe-se uma análise acerca da distribuição de estações gravimétricas e de possíveis empreendimentos hidrelétricos na região da bacia Amazônica. A partir do arcabouço gravimétrico e da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) procedeu-se à validação do último modelo de ondulação geoidal, o MAPGEO2015. Constatou-se que há uma cobertura de 68,88% do território brasileiro em que o MAPGEO2015 está devidamente validado, onde estão localizados 94,05% dos municípios e residem 89,72% da população. A porção do modelo geoidal não validada está localizada na região centro-noroeste da Amazônia Legal Brasileira, para a qual há o planejamento da implantação de algumas usinas hidrelétricas.

PALAVRAS-CHAVE: Gravimetria. Infraestrutura. Fronteiras. Geoide.

Carlos Alberto Correa e Castro Junior

correaecastrojr@gmail.com
orcid.org/0000-0003-0276-8673
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Goiânia, Goiás, Brasil.

Nilson Clementino Ferreira

ncferreira@gmail.com
orcid.org/0000-0003-3419-6438
Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás, Brasil

Gabriel do Nascimento Guimarães

gabriel@ufu.br
orcid.org/0000-0003-4380-4650
Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil

INTRODUÇÃO

O território brasileiro foi colonizado desde o litoral para o interior. Esse processo de ocupação recebeu o nome de expansão de fronteiras, por ser caracterizado por distintas frentes (VELHO, 1972; MARTINS, 1996). Vários autores explicam os modelos de ocupação do território nacional, caracterizado por diferentes frentes. Miziara (2000, 2006), elaborou um estudo teórico que unifica as frentes de ocupação em três momentos, tradicionalmente identificados com a expansão das fronteiras, sendo eles a frente de expansão, a frente pioneira e a fronteira agrícola. Esses momentos de ocupação consideram os atributos naturais da terra (relevo, tipo de solo, clima, localização, entre outros) e os resultados dos investimentos tecnológicos (retirada da cobertura vegetal nativa, manejo dos solos, aplicação de insumos orgânicos e químicos, formação de áreas de pastagens e áreas agrícolas, dentre outros).

Na ocupação de um território, com o passar do tempo, os investimentos públicos e privados em infraestrutura de transporte, energia e saneamento tendem a aumentar, influenciando no preço da terra que, por sua vez, capacitam gradativamente o território para receber mais investimentos (FERREIRA et al., 2007). Em alguns casos, conforme os interesses políticos, administrativos, sociais e econômicos, o espaço geográfico pode ser novamente modificado com a ocorrência de processos de urbanização, que podem resultar em novos núcleos populacionais, ou mesmo na expansão de núcleos populacionais previamente existentes (SOUZA, 1995). Dessa forma, após a fronteira agrícola, normalmente ocorre mais uma etapa da construção do espaço geográfico, que é a consolidação da ocupação por meio da implantação de infraestruturas e de urbanização.

A construção e transformações do espaço geográfico devem ser planejadas e mensuradas, a fim de possibilitar um conhecimento dos custos e benefícios (econômicos, ambientais e sociais) dessas transformações. Além disso, as implementações de tais transformações necessitam ser apoiadas em mapeamentos de alta qualidade. Tais mapeamentos devem considerar Sistemas de Referência Terrestre (SRT) altamente precisos e estáveis ao longo do tempo, de tal forma que as alterações do espaço geográfico e as obras de infraestrutura sejam devidamente executadas, conforme o planejamento. Diante disso, a Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy - IAG*) não tem poupado esforços para a implantação de um Sistema de Referência Geodésico Global (*Global Geodetic Reference System - GGRS*). Sua realização ficará a cargo do GGRF (*Global Geodetic Reference Frame*). Este compreende o *International Terrestrial Reference Frame (ITRF)* e o *International Celestial Reference Frame (ICRF)*, o futuro *International Height Reference Frame (IHRF)*, além do novo *International Gravity Reference Frame (IGRF)* (IAG, 2015; IAG, 2016). Os SRTs possuem papel precípuo no monitoramento de quantidades relacionadas ao Sistema Terra, sendo que estão concentrados em determinar, monitorar, mapear e compreender as mudanças relacionadas à forma, rotação e distribuição de massa da Terra (PLAG; PEARLMAN, 2009).

Um sistema de referência geodésico é materializado no espaço geográfico por meio de redes de pontos implantados, cujas coordenadas, velocidades e precisões são estimadas a partir do processamento de dados de mensuração em campo, considerando um modelo matemático que represente a superfície da Terra (BLITZKOW et al., 2011). A correta utilização de um sistema de referência pode

minimizar inconveniências na implantação de obras e na ocupação do espaço geográfico, evitando-se também a ocorrência de riscos de inundações, alagamentos, movimentos de massas de terra, entre outros problemas correlatos. Sendo assim, um sistema de referência geodésico se constitui em necessária infraestrutura para a implantação de outras intervenções de engenharia, além de subsidiar a ocupação do espaço geográfico. Um exemplo é a construção de rodovias, onde o órgão responsável (DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) exige que este tipo de obra esteja apoiada em Referências de Nível (RRNN).

A existência da possível relação entre o estágio de ocupação do território nacional com a base geodésica implantada remete este trabalho a investigar o relacionamento entre a atual ocupação territorial com a cobertura espacial da rede gravimétrica brasileira. Além disso, propõe-se uma análise acerca da distribuição gravimétrica e possível empreendimentos hidrelétricos na região da bacia Amazônica.

A INFRAESTRUTURA GEODÉSICA BRASILEIRA

No Brasil, o arcabouço geodésico é materializado essencialmente por uma rede planimétrica, uma rede altimétrica e uma rede gravimétrica; esse conjunto de redes compreende o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (IBGE, 1999). Em que pesem iniciativas pioneiras promovidas por instituições de ensino e órgãos de pesquisa, com atividades nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, coube ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a missão de propiciar infraestrutura geodésica com abrangência nacional. Tais incumbências atualmente são traduzidas pela gestão, implantação e manutenção do SGB, de acordo com o disposto originalmente no Cap. VIII do Decreto-Lei n.º 243, de 28 de fevereiro de 1967 (BRASIL, 1967).

É possível afiançar então que a trajetória da Geodesia brasileira está atrelada ao longo caminho percorrido pelo IBGE desde o final da década de 1930. Contudo, no decorrer de todos esses anos, o IBGE não atuou sozinho na gestão do SGB. Diversas parcerias foram celebradas possibilitando relevantes conquistas para as atividades geodésicas nacionais e permitindo aportes significativos que têm ajudado ao IBGE a cumprir a sua missão institucional concernente ao SGB.

O planejamento e a execução de obras de infraestrutura dependem da precisão e da rapidez no posicionamento geodésico. Usualmente, tem sido empregado o posicionamento por satélites, a partir do uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que possibilitam um posicionamento tridimensional a qualquer momento, com rapidez e qualidade, conforme as características dos equipamentos e as técnicas empregadas. No entanto, a altitude proveniente desse tipo de posicionamento está referida ao elipsoide, figura matemática utilizada nos cálculos geodésicos e não relacionada ao campo de gravidade da Terra real. Dessa forma, transformações envolvendo alturas geoidais e altitudes geométricas, permitem obter as chamadas altitudes físicas. As alturas geoidais são obtidas por meio de modelagem matemática, a partir de dados de levantamentos gravimétricos terrestres, aéreos e marinhos, em conjunto com dados de satélites artificiais voltados ao mapeamento do campo de gravidade terrestre.

Ressalta-se que desde julho de 2018 o IBGE adota a altitude normal como sendo a oficial no país em substituição à altitude ortométrica (normal-ortométrica) (IBGE, 2018). Nesse contexto, a superfície geoidal é substituída pela superfície quase-geoidal e a ondulação geoidal (N) pela anomalia de altura (ζ). Embora a altitude normal seja oficialmente adotada no país, este trabalho utilizará o conceito de altitude ortométrica, uma vez que foi realizado anteriormente à alteração mencionada.

A gravimetria baseia-se na medição da aceleração de gravidade, seja na superfície física da Terra (nos continentes ou nos oceanos), bem como próxima a ela (aerogravimetria). Para o cálculo de um modelo geoidal é necessário contar com uma rede de pontos gravimétricos chamados de Estações Gravimétricas (comumente chamadas pelo IBGE de EEGG), com densa e homogênea cobertura espacial em todo o território a ser modelado. Face ao exposto, um primeiro ponto que justifica a realização desse trabalho é a necessidade de se ter uma rede gravimétrica adequadamente densa e homogênea, permitindo a geração de modelos geoidais, ou quase geoidais, compatíveis ao território nacional, com o objetivo de prover altitudes físicas com qualidade. Estas altitudes são essenciais para diversas obras de infraestrutura no país.

Após a modelagem das ondulações geoidais, é necessário realizar a validação do modelo; para tanto, no Brasil utilizam-se de estações da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) (MATOS et al., 2016). Nesse contexto, a maneira usual de se avaliar a qualidade de um modelo geoidal está relacionada com a comparação das alturas geoidais oriundas do modelo e aquelas obtidas diretamente pelas diferenças entre as altitudes elipsoidais, determinadas a partir de receptores GNSS, com as altitudes normais ortométricas das Referências de Nível (RRNN) da RAAP. Assim, para se calcular e validar um modelo de ondulações geoidais confiável, são necessárias duas redes que integram o SGB: a rede gravimétrica e a RAAP. Desde julho de 2018 a validação é conduzida a partir de altitude normais.

Vale destacar que a RAAP (Figura 1) se desenvolveu, até 1969, nas áreas de maior densidade populacional e desenvolvimento econômico. Nas décadas de 1970 e 1980 foi estendida para o interior do país a partir de medições nas principais estradas nacionais culminando com medições em regiões extremas do país como os estados do Acre e Roraima (LUZ et al., 2002).

Figura 1 – Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro



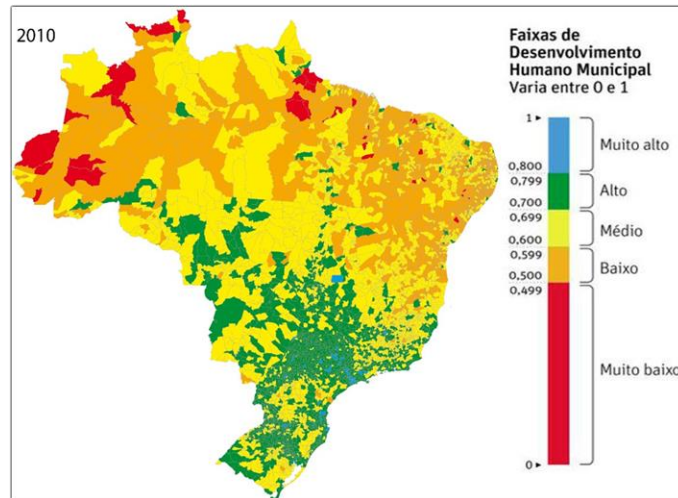
Fonte: IBGE (2018).

Verifica-se na Figura 1 que a rede altimétrica brasileira possui vazios, em especial na região amazônica, o que dificulta o transporte de altitudes, bem como a validação do modelo geoidal na referida região.

MATERIAL E MÉTODOS

A elaboração deste trabalho considerou toda a região continental do Brasil, uma área aproximada de 8,5 milhões de km². Segundo o censo demográfico de 2010, a população residente no Brasil era de 196,8 milhões de habitantes (IBGE, 2010). O Brasil é classificado em cinco regiões que se subclassificam em 27 unidades federativas. Estas, por sua vez, são classificadas em 137 mesorregiões, 558 microrregiões e 5570 municípios. Em relação ao IDH, o Brasil ocupou em 2019, a posição 76 entre 189 países, com um IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) de 0,761 (ONU, 2019). Desenvolvido em 1990, o índice retrata uma medida resumida do desempenho médio de um país em relação às dimensões-chave do desenvolvimento humano, tais como: expectativa de vida, educação e Produto Interno Bruto. O Brasil possui um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) que é uma medida composta de indicadores de três dimensões do desenvolvimento humano: educação, longevidade e renda. O índice também varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1, maior o desenvolvimento humano. As informações para o cálculo do índice são derivadas do Censo Demográfico do IBGE. O último resultado foi divulgado em 2010 e pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Representação cartográfica do IDH dos municípios brasileiros em 2010

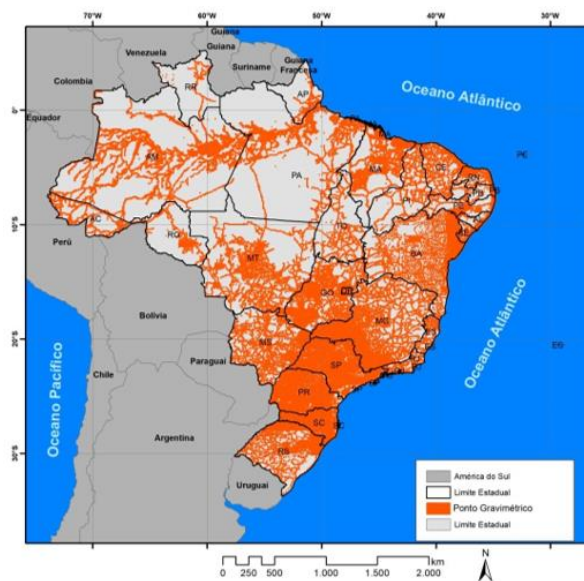


Fonte: PNDU (2019).

Para as análises empreendidas foi considerado o conjunto de estações gravimétricas terrestres implantadas no Brasil por diversas instituições, tais como IBGE, Universidade de São Paulo (USP) e Petrobras. Devido aos levantamentos de prospecção petrolífera, as regiões norte e nordeste possuem maiores quantidades de EEGG. No entanto esses pontos estão altamente concentrados em locais específicos de interesse da Petrobras, fazendo com que grandes áreas daquelas regiões estejam sem informações gravimétricas terrestres (MATOS et al., 2016).

O número de estações gravimétricas levantadas no Brasil e consideradas neste trabalho é de 450.589. Essas mesmas EEGG foram originalmente utilizadas no cálculo do MAPGEO2015, e suas coordenadas foram disponibilizadas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). A distribuição dessas EEGG pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição gravimétrica no país



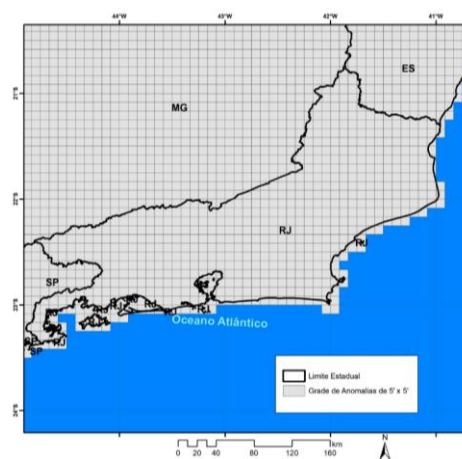
Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se na Figura 3 que os maiores vazios gravimétricos se concentram na região Amazônica. Há também vazios consideráveis nos estados da Bahia, do Maranhão, do Piauí e do Tocantins. Existem ferramentas que permitem a interpolação de valores de gravidade real (DREWES et al., 2002). Entretanto, em regiões com grandes áreas carentes de informações, a interpolação pode proporcionar resultados inadequados, sendo realmente necessário uma melhora na cobertura gravimétrica.

Para as análises espaciais elaboradas no âmbito deste trabalho, optou-se por utilizar como unidade territorial as mesorregiões brasileiras. Em 2017, o IBGE apresentou uma nova divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias (IBGE, 2017). A nova divisão atualiza a última versão, em termos de processos sociais, políticos e econômicos, publicada na década de 1990. Esse recorte permitiu uma considerável quantidade de unidades territoriais de análise, abarcando inclusive unidades com expressivas dimensões territoriais.

Outra unidade territorial utilizada nas análises empreendidas foi a grade com resolução espacial de 5' por 5' de arco de longitude e latitude. Grade com mesma resolução foi utilizada na determinação do MAPGEO2015. No caso do modelo brasileiro, houve interpolação dos valores de anomalia de gravidade de Bouguer para a geração da grade de 5'. Logo, em cada célula pode haver várias EEGG ou até mesmo nenhuma. Uma situação ideal para a elaboração de um modelo gravimétrico de ondulações geoidais seria a de se ter, pelo menos, um ponto gravimétrico em cada célula da grade. A título de exemplo, a Figura 4 ilustra a porção da grade de 5' por 5' de resolução espacial para parte da região sudeste brasileira.

Figura 4 – Exemplo de grade de anomalias gravimétricas, utilizada na modelagem do MAPGEO2015

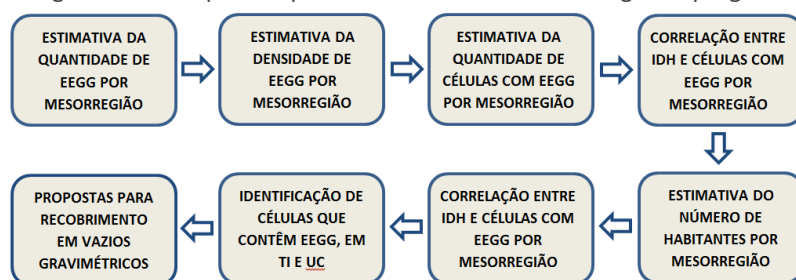


Fonte: Autoria própria (2019).

Foram considerados também os mapeamentos de áreas especiais, tais como Unidades de Conservação (UC) e Terras Indígenas (TI), onde geralmente não são realizados levantamentos gravimétricos terrestres e por isso possuem escassa cobertura gravimétrica. Nas regiões brasileiras localizadas mais ao sul e na faixa litorânea existem poucas dessas áreas. Entretanto, na região Norte e na porção central do Brasil, há uma maior ocorrência dessas áreas especiais, praticamente desprovidas de cobertura gravimétrica terrestre (Figura 3).

Na metodologia empregada analisou-se, inicialmente, a quantidade e densidade de pontos gravimétricos por mesorregião. Posteriormente foram evidenciadas quais células da grade que possuíam, pelo menos, uma EG. O próximo passo foi verificar a cobertura espacial dessas células com alguma estação gravimétrica nas mesorregiões brasileiras, considerando também a quantidade de população atendida, com base no mapa de setores censitários de 2010. Posteriormente, foi avaliada a correlação estatística entre o IDH médio e a cobertura gravimétrica existente em cada mesorregião. Finalmente, foram inventariadas as células da grade nas UCs e TIs, objetivando apresentar propostas para as áreas sem cobertura gravimétrica no Brasil. O fluxograma contido na Figura 5 sintetiza a metodologia aplicada. Salienta-se que o valor de densidade superficial é dado em EEGG/km².

Figura 5 – Principais etapas consideradas na metodologia empregada



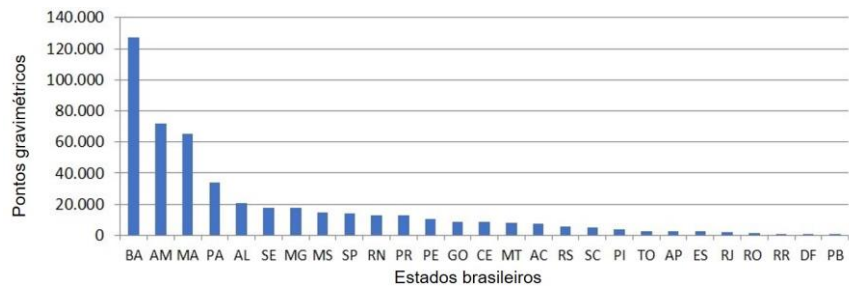
Fonte: Autoria própria (2019).

A partir de informações a respeito da validação do modelo geoidal de 2015 foi também avaliada a quantidade de população contemplada pelo recorte territorial correspondente ao modelo devidamente validado. Isso pode ser utilizado no processo de escolha de áreas prioritárias para a realização de futuros trabalhos de validação do MAPGEO2015, visando obter maior abrangência espacial do modelo. Finalmente, de posse de dados e informações do trabalho de Latrubesse et al. (2017), a respeito de Usinas Hidrelétricas (UHEs) que podem ser implantadas futuramente na Amazônia Legal brasileira, foi realizada uma análise do MAPGEO2015 para a região, apontando quais os possíveis impactos dessas grandes obras em termos de conflitos geopolíticos, ambientais e nas populações silvícolas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro resultado auferido retrata a quantidade de estações gravimétricas por unidade da federação. Na Figura 6 é possível observar que os estados da Bahia, Amazonas, Maranhão, Pará e Alagoas possuem 66,4% dos pontos gravimétricos brasileiros, enquanto a Paraíba é o estado com a menor quantidade, apenas 252 EEGG, menos de 0,06%. É importante considerar que, em determinadas unidades da federação, as informações gravimétricas terrestres podem estar concentradas em regiões específicas, ficando muitas áreas com pouquíssima densidade de estações. Matos et al. (2016), afirmaram que, apesar das regiões nordeste e norte possuírem muitos pontos gravimétricos, existem grandes áreas naquelas regiões com carência de cobertura gravimétrica homogênea.

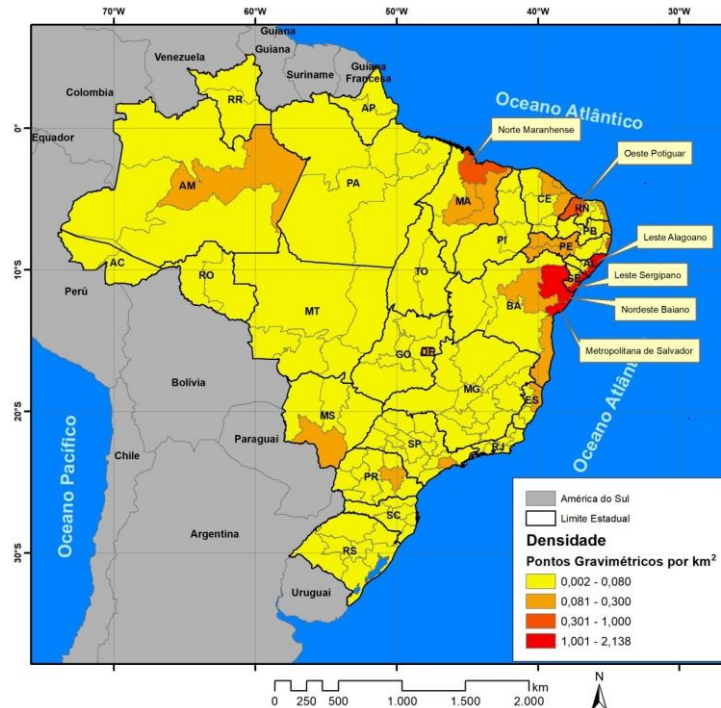
Figura 6 – Quantidade de estações gravimétricas nas unidades da federação



Fonte: Autoria própria (2019).

Em seguida foi realizada a análise em relação à distribuição de pontos gravimétricos por mesorregião, considerando a densidade de pontos por km². Observou-se que os locais de maiores densidades gravimétricas estão localizados nas mesorregiões litorâneas do nordeste brasileiro, mais especificamente no Norte Maranhense, Oeste Potiguar, Leste Alagoano, Leste Sergipano, Nordeste Baiano e na região Metropolitana de Salvador. A grande densidade de cobertura gravimétrica naquelas áreas se deve basicamente aos trabalhos de prospecção executados pela Petrobras. A prospecção geofísica também foi determinante na densidade de pontos gravimétricos do Centro Amazonense. Além dessas regiões, foram destacadas outras mesorregiões no estado de São Paulo (região Metropolitana de São Paulo), no estado do Paraná (Centro Oriental Paranaense), Mato Grosso do Sul (Sudoeste de Mato Grosso do Sul) e o Distrito Federal (Figura 7).

Figura 7 – Densidade de pontos gravimétricos nas mesorregiões brasileiras

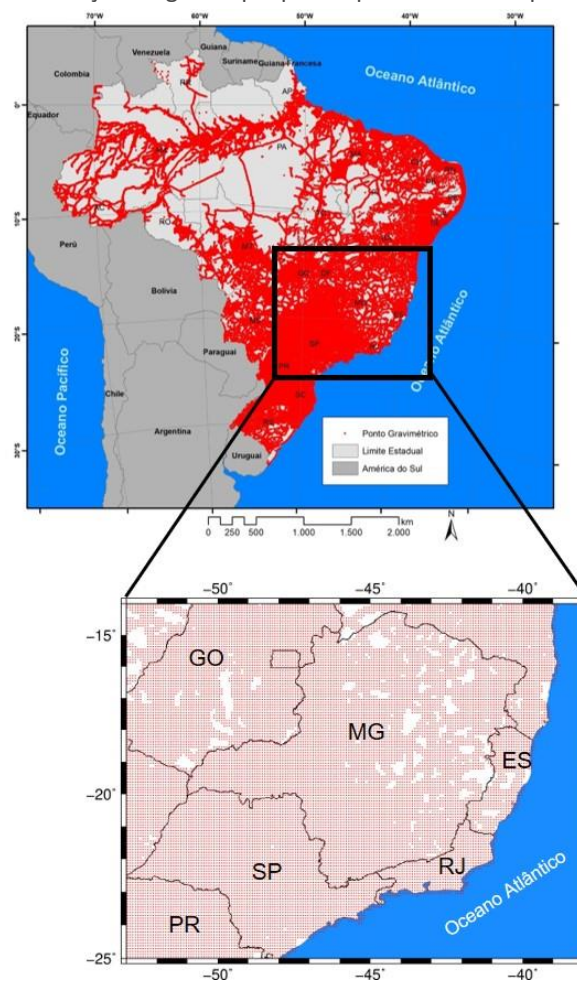


Fonte: Autoria própria (2019).

Os últimos modelos geoidais brasileiros da série MAPGEO possuem resolução espacial de 5' na longitude e na latitude (MATOS et al., 2016). Portanto, o ideal seria que a cobertura gravimétrica no Brasil ocorresse de tal forma que, em cada

célula de 5' por 5', estivesse presente pelo menos uma estação gravimétrica. Após a elaboração da grade cobrindo todo o território nacional com 103.739 células, utilizou-se o programa computacional de sistema de informações geográficas Qgis para selecionar as células onde existe pelo menos um ponto gravimétrico. Dessa análise resultaram 38184 células que contêm informações gravimétricas terrestres, ou seja, 36,81% do território brasileiro. Em contrapartida, 63,19% da área territorial brasileira não dispõem de EEGG terrestres, considerando a distribuição em grid de 5' x 5'. Na Figura 8 é ilustrada essa subdivisão em grades de anomalias para todo o Brasil. Embora haja semelhança com a Figura 3, que retrata a distribuição gravimétrica pontual, em função da escala, a subdivisão em quadrículas permite identificar melhor os vazios gravimétricos e apontar com maior clareza as necessidades de futuros levantamentos.

Figura 8 – Distribuição da grade que possui pelo menos um ponto gravimétrico

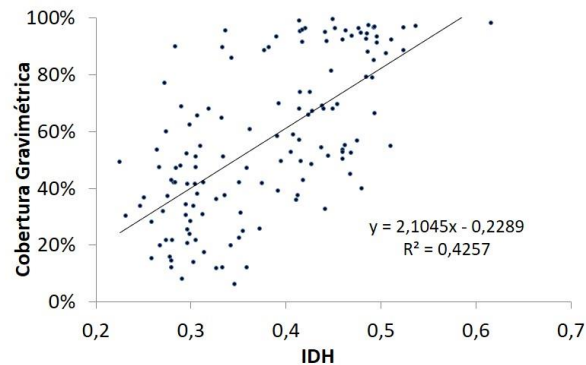


Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 8 é possível observar que os estados das regiões sul e sudeste do Brasil possuem uma boa cobertura de grades que possuem EEGG. A cobertura diminui de maneira expressiva nos estados da região Norte e em algumas áreas de dimensões notáveis no interior da região Nordeste. Foi aplicada uma ampliação na Figura 8, onde é possível visualizar a cobertura gravimétrica para uma grade de 5', em partes das regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Verifica-se que os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, bem como as regiões do Sul de Minas Gerais e Triângulo Mineiro, possuem uma cobertura quase que total.

Com o intuito de analisar a relação entre a cobertura da grade de anomalias gravimétricas e o IDH nas mesorregiões brasileiras, foi elaborado o gráfico de dispersão que pode ser observado na Figura 9. Apesar de apresentar uma expressiva dispersão, é possível notar que há uma tendência de correlação positiva entre a cobertura gravimétrica e o IDH nas mesorregiões brasileiras. Geralmente, os locais com maiores IDH são mais urbanizados, possuindo infraestrutura de energia, saneamento básico, transporte, entre outras facilidades disponíveis e, adicionalmente, maior cobertura gravimétrica.

Figura 9 – Relação entre o IDH e a cobertura gravimétrica das mesorregiões do Brasil



Fonte: Autoria própria (2019).

Conforme menção anterior, a mesma cobertura gravimétrica avaliada neste trabalho serviu de referência à última versão do modelo de ondulações geoidais para o Brasil, o MAPGEO2015. O modelo foi validado utilizando-se 592 Referências de Nível (RRNN) distribuídas em uma grande porção do território brasileiro (MATOS et al., 2016). Na Figura 10 é possível observar que as discrepâncias entre as estações GNSS e as estações RRNN tiveram valor máximo de 0,50 m. A área validada corresponde a 5.855 milhões de km² (68,88% do território brasileiro), atinge 5239 municípios (94,05% dos municípios) e atende a 89,72% da população brasileira. Na região Norte, apenas 10 estações foram utilizadas na validação.

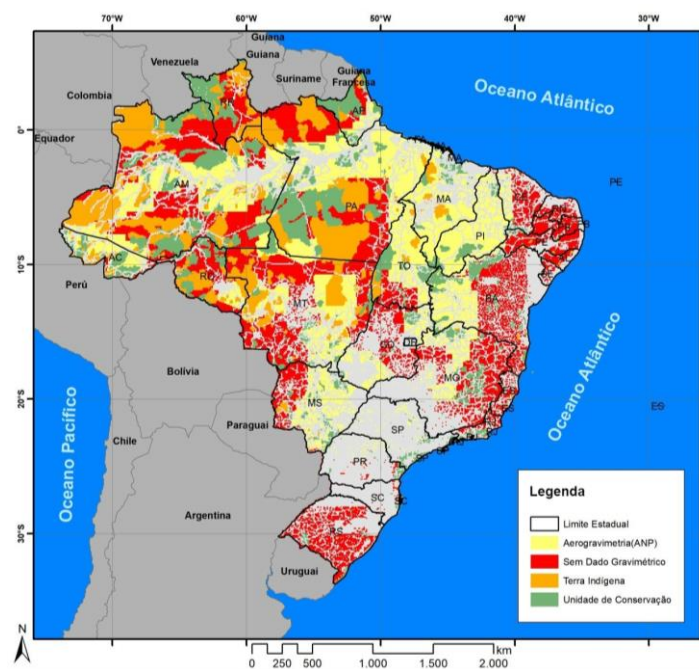
Figura 10 – Região onde o modelo de ondulações geoidais foi validado



Fonte: IBGE (2015).

Considerando no Brasil as células de 5' por 5' que não possuem estações gravimétricas e que, portanto, não puderam contribuir diretamente na modelagem de ondulações geoidais, foi possível elaborar a Figura 11. É importante esclarecer que uma expressiva quantidade dessas células possui dados gravimétricos obtidos por mensurações aéreas (aerogravimetria), com fins específicos de prospecção geofísica, cujo acervo pertence à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Esses dados ainda não foram considerados na elaboração de modelos geoidais nacionais, mas estão passando por um processo de validação na EPUSP com vistas a um possível aproveitamento futuro.

Figura 11 – Células da grade de anomalias sem pontos gravimétricos terrestres



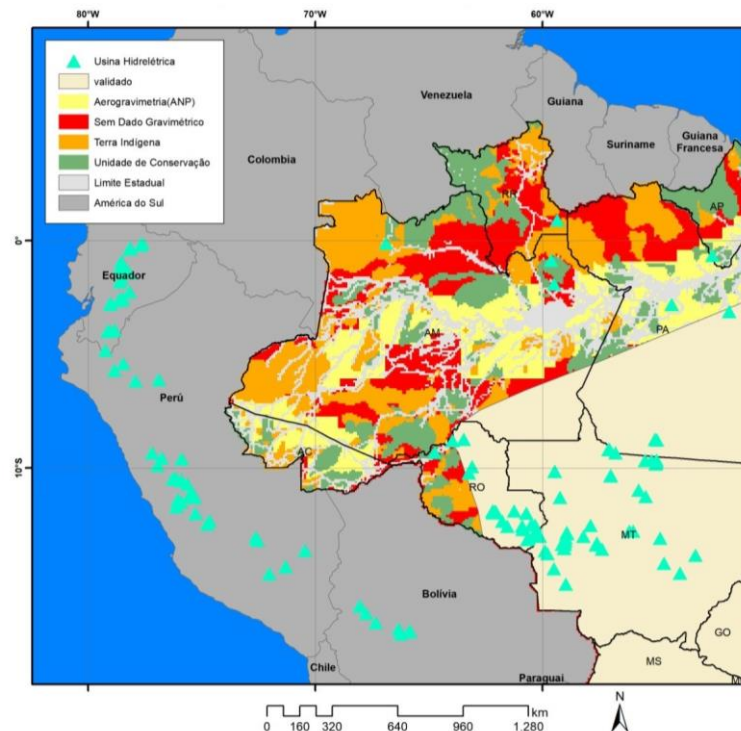
Fonte: Autoria própria (2019).

Cabe observar que várias regiões que não possuem medições gravimétricas são ocupadas por terras indígenas ou unidades de conservação da biodiversidade. O acesso a essas áreas normalmente é difícil e requer autorizações das instituições mantenedoras ou fiscalizadoras. Além disso, há outras regiões que não possuem qualquer tipo de dado gravimétrico. Neste caso, grande parte desses vazios gravimétricos possuem restrições de trafegabilidade, dificultando a adoção de soluções triviais que envolvam levantamentos gravimétricos terrestres. Vale salientar que 44,7% das áreas não cobertas por levantamentos gravimétricos, estão localizadas na porção do território brasileiro que não possui validação para o MAPGEO2015. Destaca-se ainda na Figura 11, que as áreas em vermelho deveriam ser consideradas prioritárias e indicadas para futuros trabalhos de densificação. Para tanto, seria necessário investigar as condições de acessibilidade, isto é, se há cursos d'água, caminhos, estradas e rodovias que permitam a execução dos levantamentos.

Latrubesse et al. (2017), mencionaram 431 Usinas Hidrelétricas (UHes) existentes e planejadas na bacia amazônica, sendo algumas delas localizadas no Brasil e outras nos demais países amazônicos (Figura 12). Sendo assim, torna-se

relevante discutir com os países que fazem parte da bacia amazônica, alternativas geodésicas conjuntas para se adotar os mesmos sistemas de referência e minimizar os possíveis impactos ambientais e socioeconômicos.

Figura 12 – Distribuição das usinas hidrelétricas existentes e planejadas na bacia amazônica



Fonte: Autoria própria (2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais, com grandes áreas de difícil acesso e de alta vulnerabilidade ambiental, isto é, regiões que são susceptíveis a sofrerem danos quando expostas a uma determinada ação, ainda não possui uma abrangência gravimétrica integral, ou seja, uma cobertura homogênea de todo o território nacional. Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram que a cobertura espacial da rede gravimétrica apresenta relação estatística com o desenvolvimento humano brasileiro. Além disso, 89,05% da população brasileira residem em locais onde o atual modelo de ondulações geoidais está validado. Verificou-se que os estados mais desenvolvidos da federação são os que apresentam maior cobertura gravimétrica. O estado de São Paulo possui mais de 95% de sua área coberta de medições gravimétricas. Desconsideradas as áreas de UCs e TIs, procurou-se nesse trabalho indicar os locais prioritários para a densificação gravimétrica (áreas em vermelho da Figura 11).

Por outro lado, apesar dos esforços institucionais na realização de levantamentos gravimétricos, ainda é expressiva a quantidade de áreas no Brasil sem cobertura gravimétrica e que também não têm validação para o atual modelo de ondulações geoidais. Essa falta de validação é explicada, principalmente, pela carência de RRNN da RAAP com conexões GNSS, em diversas regiões do país. As áreas sem validação ocorrem em porções importantes da Amazônia Legal

Brasileira, onde já existem implantadas algumas UHEs e se planeja a construção de novos aproveitamentos hidrelétricos. Logo, ficou evidenciada a necessidade de uma cobertura gravimétrica mais densa e homogênea em algumas áreas, suficiente para gerar modelos geoidais ou quase geoidais adequados em todo o território nacional e que poderão servir de apoio para as desejáveis obras de infraestrutura.

Vários países sul-americanos localizados na bacia amazônica também planejam construir UHEs. Tal peculiaridade sugere que essas nações vizinhas busquem alternativas eficazes para contemplar a região com cobertura gravimétrica, considerando a possibilidade de que sejam aproveitados os levantamentos aerogravimétricos e satelitais. Em paralelo, recomenda-se que os países amazônicos promovam prioritariamente o adensamento das correspondentes redes gravimétricas, bem como a expansão e conexões das respectivas Redes Altimétricas Nacionais, visando alcançar um consistente Sistema Vertical de Referência naquela região.

The gravimetric network distribution in Brazil and the national infrastructure development

ABSTRACT

In Brazil and other countries, it is possible to observe the spatial correlation between the level of soil occupation and installed infrastructure. This paper aims to investigate the relationship between the current territorial occupation and the spatial coverage of the Brazilian gravimetric network. In addition, an analysis is proposed about the gravimetric distribution and possible hydroelectric projects in the Amazon basin region. From gravimetric framework and the Brazilian Altimetric Network (RAAP) the validation of the official geoid model, MAPGEO2015, was executed. As a result, there is a coverage of 68.88% of the Brazilian territory where MAPGEO2015 is properly validated, where are located 94.05% of the counties and where 89.72% of the national population lives. The portion not validated by the geoid model is in the center-northwest of the Legal Brazilian Amazon, where there are plans of implementation of some hydroelectric plants.

KEYWORDS: Gravimetry. Infrastructure. Borders. Geoid.

REFERÊNCIAS

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; GUIMARÃES, G. N.; COSTA, S. M. A. O conceito atual dos referenciais usados em Geodésia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 5, p.633-648, 2011.

BRASIL. Lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 2438, 28 fev. 1967.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L.; BLITZKOW, D.; FREITAS, S. Scientific Foundations of the SIRGAS Vertical Reference System. In: Drewes H., Dodson A.H., Fortes L.P.S., Sánchez L., Sandoval P. **Vertical Reference Systems**. International Association of Geodesy Symposia, v. 124. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, p.297-301. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_5

FERREIRA, N. C.; MIZIARA, F.; RIBEIRO, N. V. Preço da terra em Goiás: pressupostos e modelos. **Boletim Goiano de Geografia**, v.27, n.1, p. 47-62, 2007.

IAG. **Resolution nº 1**. Prague, July 2015. Disponível em: <https://ihrs.dgfi.tum.de/fileadmin/JWG_2011/IAG_Resolutions_2015.pdf>. acesso em 22 abr. 2019.

IAG. **Description of the Global Geodetic Reference Frame (GGRF)**. Position paper adopted by the IAG Executive Committee. 2016. Disponível em: <http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF_description_by_the_IAG_V2.pdf>. Acesso em 22 abr. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Noções Básicas de Cartografia** Rio do Janeiro. 1999. 130p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ManuaisdeGeociencias/Nocoos%20basicas%20de%20cartografia.pdf>>. Acesso em 18 mar. 2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico de 2010** - Características da população e dos domicílios: resultados do universo Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/resultados_do_universo.pdf>. Acesso em 18 mar. 2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015**. 2015. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/rel_mapgeo2015.pdf>. Acesso em 18 mar. 2017.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias 2017**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/> Acesso em 22 abr. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16283-rede-altimetrica.html?=&t=downloads>>. Acesso em 22 abr. 2019.

LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E.Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BAKER, V. R.; D’HORTA, F. M.; WIGHT, C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; BAKER, P.A.; RIBAS, C. C.; NORGAARD, R. B.; FILIZOLA, N.; ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; STEVAUX, J.C. Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature**, v. 546, p.363–369, 2017. <https://doi.org/10.1038/nature22333>.

LUZ R.T., GUIMARÃES V.M., RODRIGUES A.C., CORREIA J.D. Brazilian First Order Levelling Network. In: Drewes H., Dodson A.H., Fortes L.P.S., Sánchez L., Sandoval P. **Vertical Reference Systems**. International Association of Geodesy Symposia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_5.

MARTINS, J. S. O tempo da fronteira: retorno à controvérsia sobre o tempo histórico da frente de expansão e da frente pioneira. **Tempo Social**, v. 8, n. 1, p. 25-70, 1996. <https://doi.org/10.1590/ts.v8i1.86141>.

MATOS, A. C.C.; BLITZKOW, D.; MACHADO, V. C.; NUNES, M. A.; LENGROBER, N. V.; XAVIER, E. M. L.; FORTES, L. P. S. MAPGEO2015: O Novo Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.68, n. 10, p.1873–1884, 2016.

MIZIARA, F. Condições estruturais e opção individual na formulação do conceito de fronteira agrícola. In: SILVA, L. S. D. **Relações cidade-campo: Fronteiras**. Goiânia: Ed. UFG. 2000. p.273-288.

MIZIARA, F. **Expansão de fronteiras e ocupação do espaço no Cerrado: o caso de Goiás**. In: DANIEL, M. A.; DAL’LARA, L.; ANACLETO, T.C. S. (Org.). **Natureza Viva: Cerrado**. Goiânia: Ed. da UCG, 2006.

ONU. UNITED NATIONS. **Human Development Report 2019**. Inequalities in Human Development in the 21st Century Briefing note for countries on the 2019 Human Development Report. 2019. 10 p.

PLAG, H.P., PEARLMAN, M. **Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020**, Springer Verlag, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02687-4_3

PNDU. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – BRASIL. **O que é o IDHM?** Disponível em: <<https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/conceitos/o-que-e-o-idhm.html>>. Acesso em 18 mar. 2017.

SOUZA, M. A. A. O novo Brasil urbano: Integração ou fragmentação? In: GONÇALVES, M. F. **O novo Brasil urbano: impasses, dilemas, perspectivas**. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1995. p.65-71.

VELHO, O. G. Frentes de expansão e estrutura agrária: estudos do processo de penetração numa área da Transamazônica. 1ª ed. Rio de Janeiro: Zahar, 1972. 504p. <https://doi.org/10.7476/9788599662915>

Recebido: 02 jul. 2020

Aprovado: 28 out. 2020

DOI: 10.3895/rbgeo.v9n1.12680

Como citar: CASTRO Júnior, C. A. C.; FERREIRA, N. C.; GUIMARÃES, G. N. A distribuição da rede gravimétrica no Brasil e o desenvolvimento da infraestrutura nacional. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 003-020, jan./mar. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Gabriel do Nascimento Guimarães

Rod. LMG 745 S/N, CEP 38500-000, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

