

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**Termo de Execução Descentralizada**

**COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM  
ESCALA NACIONAL**

entre

Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA)

e

Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS)

Subprojeto

**Modelo Digital do Terreno para América do Sul**

Documento

**Revisão teórica sobre  
Modelos digitais de elevação e de superfície para aplicações hidrológicas**

Equipe:

Anderson Ruhoff  
Bruno César Comini de Andrade  
Leonardo Laipelt  
Antonia Homrich da Silva  
Frederico Carlos Reichert

**Resumo:**

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) desempenham um papel crucial em uma variedade de aplicações, especialmente em estudos hidrológicos e hidrodinâmicos. No entanto, os principais conjuntos de dados globais de elevação disponíveis atualmente são afetados pela cobertura da vegetação, o que pode comprometer a precisão dos modelos na representação precisa da superfície do terreno. O lançamento de sensores LIDAR (*Light Detection And Ranging*) possibilitaram o desenvolvimento de técnicas para remover esses efeitos e obtenção de modelos digitais de terreno (MDTs). Este documento visa levantar a bibliografia disponível acerca do assunto, a fim de subsidiar o desenvolvimento de um MDT para a América do Sul. Acredita-se que este trabalho irá contribuir para a melhoria de estudos hidrológicos e demais aplicações que demandam informações topográficas de alta acurácia.

**Palavras-chave:** modelo digital de elevação; modelo digital de terreno; altura da vegetação.

**1. Introdução**

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) representam a altitude da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, como cobertura vegetal e edificações. O Modelo Digital do Terreno (MDT) representa a superfície do terreno, enquanto o Modelo Digital de Superfície (MDS) representa a elevação, incluindo o topo da vegetação e edificações. MDEs são amplamente utilizados em estudos hidrológicos e de recursos hídricos, geologia, geomorfologia, projetos de engenharia e infraestrutura, inventário de vegetação, estudos ambientais e relacionados a desastres naturais como inundações e movimentos de massa. A acurácia desta informação é de grande relevância para os estudos derivados.

Existem diversos MDEs com cobertura quase global. Durante as duas últimas décadas, o MDE global mais popular correspondia ao SRTM DEM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr et al., 2007), desenvolvido com base em interferometria com

dados de radar de abertura sintética nas bandas C e X em um levantamento em Fevereiro de 2000 e com resolução espacial de aproximadamente 30 m e acurácia da ordem de 8 m (Rodríguez et al., 2006). Diversas versões foram desenvolvidas a partir do SRTM DEM original. O'Loughlin et al., (2016) desenvolveram o Bare Earth SRTM DEM, uma primeira versão do SRTM, onde os erros relacionados à vegetação foram removidos, fornecendo um MDT em escala global, com expressiva melhora na acurácia, principalmente em regiões de florestas como a Bacia Amazônica. Em tentativas mais recentes de desenvolvimento de um MDT global, Yamazaki et al. (2017) desenvolveram o MERIT DEM, e Hawker et al. (2022) desenvolveram o FABDEM.

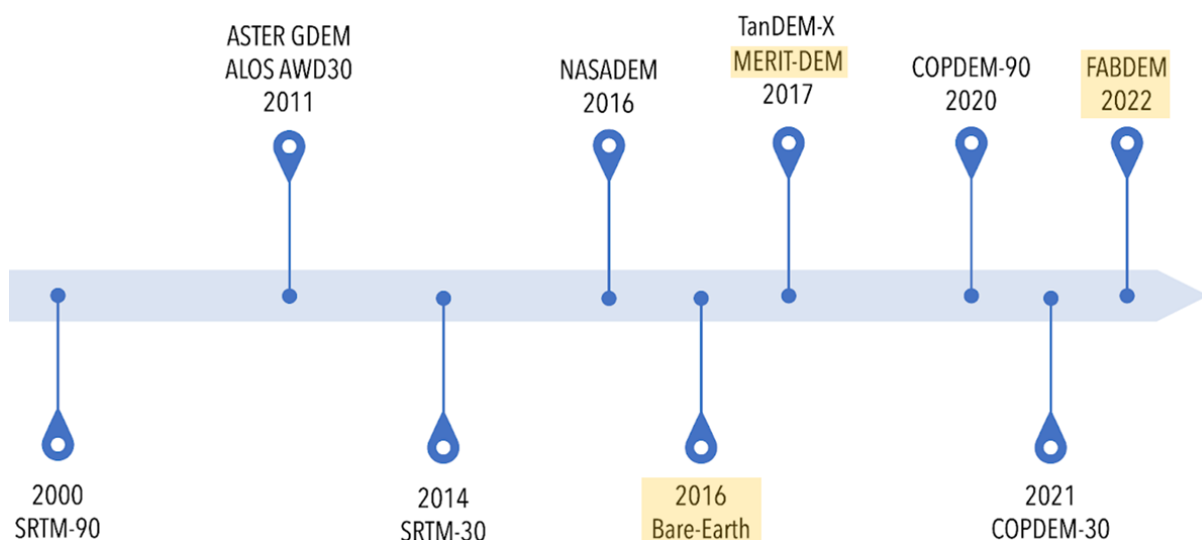
Além disso, existem iniciativas de desenvolvimento de produtos hidrológicos derivados de MDEs globais, como mapas de direção de fluxo do escoamento, área acumulada, rede de drenagem, bacias hidrográficas, descritor do terreno HAND, entre outros. Existem diversas técnicas para realização destes processamentos, tais como (i) o software IPH HydroTools (Siqueira et al., 2016) desenvolvido pelo grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala (HGE) do IPH/UFRGS e (ii) o conjunto de rotinas computacionais TerraHidro (disponível em [bit.ly/3UaKdyX](https://bit.ly/3UaKdyX)), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para aplicações hidrológicas, diversas iniciativas globais baseadas principalmente nos dados SRTM, permitiram o desenvolvimento de produtos derivados, como o Hydrosheds (Lehner et al., 2008) e o MERIT HYDRO (Yamazaki et al., 2019).

Atualmente não existe um MDE produzido especialmente para o Brasil ou a América do Sul aproveitando o estado da arte em termos de técnicas de processamento e mapeamentos globais e informações locais. Nesse contexto, busca-se desenvolver um MDE com foco em aplicações hidrológicas, para o domínio da América do Sul com resolução espacial de 30 m, considerando bases de dados globais atualmente disponíveis, além de técnicas avançadas de processamento atualmente disponíveis. O desenvolvimento do presente relatório de revisão teórica sobre o estado da arte dos modelos digitais de elevação inclui:

- revisão sobre os principais modelos digitais do terreno e de elevação, incluindo as principais limitações dos modelos globais atualmente disponíveis;
- revisão sobre aplicações derivadas de modelos digitais de elevação em hidrologia;
- revisão sobre as principais técnicas de remoção de ruídos em modelos de elevação;
- revisão sobre as principais bases de dados auxiliares para aplicações em modelos digitais de elevação e determinação da altura da vegetação.

## 2. Principais modelos digitais de elevação em escala global

AS últimas duas décadas foram marcadas por avanços que possibilitaram a geração de MDEs com cobertura global, a partir de dados obtidos em satélites orbitais (**Figura 1**). Este item descreve os principais modelos globais disponíveis publicamente. Dentre os MDEs disponíveis definimos como MDTs aqueles que consideraram a remoção dos efeitos da vegetação. Para simplificação, os outros MDEs foram agrupados como MDSs, mesmo que os erros associados à cobertura da vegetação não correspondam exatamente à superfície terrestre.



**Figura 1.** Linha temporal dos principais modelos digitais de elevação em escala global. Nomes destacados representam os modelos digitais de terreno, enquanto os outros são modelos de superfície.

### a. SRTM

Lançada em 2000, a *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma missão conduzida pela Agência Aeroespacial do Estados Unidos (NASA) em colaboração com diversos parceiros internacionais. A missão adquiriu dados topográficos de alta resolução da superfície terrestre usando sensores radar a bordo da espaçonave Endeavour (**Figura 2**), que adquiriu dados da superfície por 11 dias.

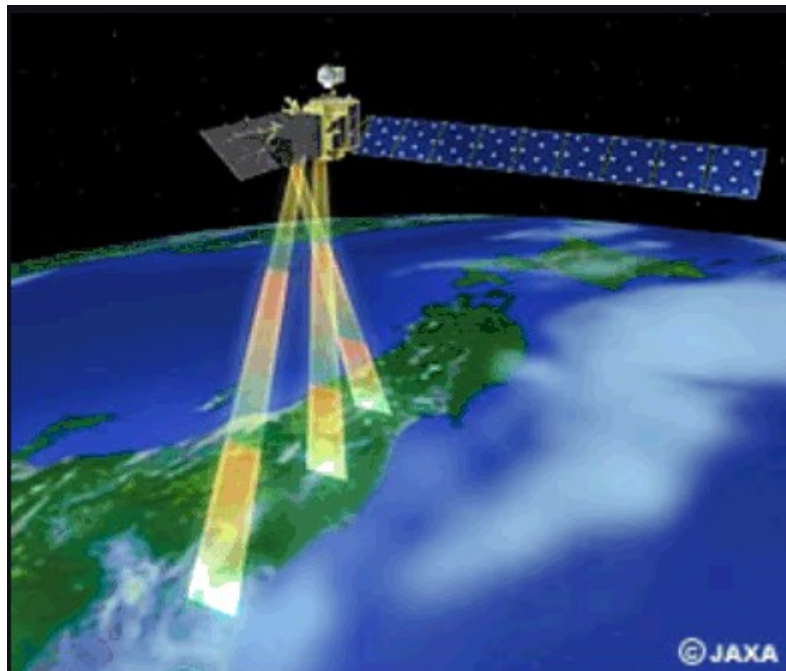
A partir das informações geradas por essa missão, foi gerado o MDE SRTM em 2004 (Farr *et al.*, 2007). O MDE SRTM cobre cerca de 80% da Terra, com dados entre 56° S e 60° N. Inicialmente, os dados eram disponibilizados com 30 m de resolução espacial no território dos Estados Unidos, e com resolução reduzida (90m) para o resto do planeta. Em 2014, uma nova versão do modelo foi desenvolvida (SRTM plus ou SRTM V3), com resolução espacial de 30 m para outras áreas, correção de artefatos e preenchimento de falhas (NASA JPL, 2013).



**Figura 2.** A missão SRTM realizou o primeiro levantamento em escala global da superfície terrestre, utilizando sensores acoplados na nave espacial Endeavour. Fonte: NASA.

## b. ALOS AW3D

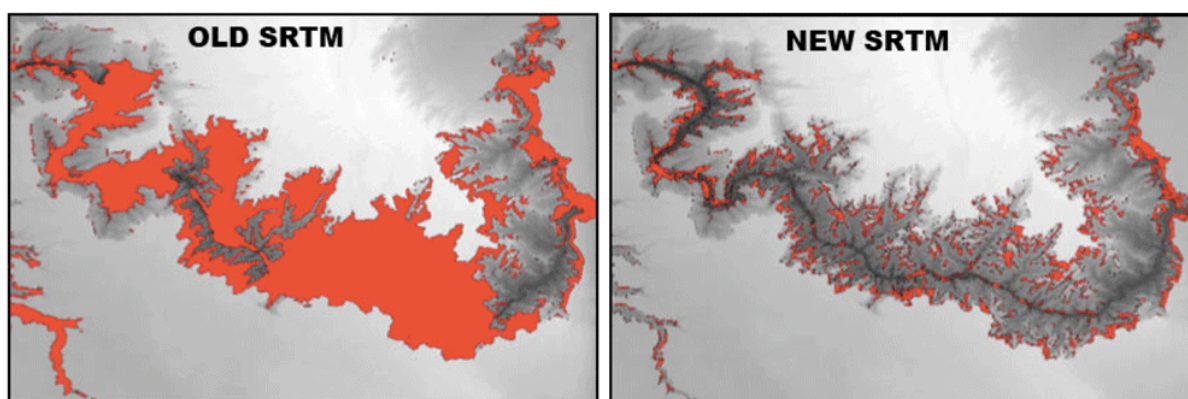
O MDS ALOS AW3D foi desenvolvido a partir de dados obtidos pelo sensor PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) (**Figura 3**). A elevação da superfície terrestre foi estimada por meio de técnicas de estereoscopia com os dados do sensor pancromático obtidos entre 2006 e 2011 para diferentes direções ao longo da passagem do satélite. Com esse método, foi possível obter um produto tridimensional de elevada acurácia (latitude, longitude e elevação), com resolução espacial de 5 m (Tadono et al., 2014). O ALOS AWD30 disponibiliza um MDS com cobertura terrestre global e resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m, a depender da latitude) (Takaku et al., 2014). O modelo tem passado por melhorias recorrentes, e em 2023, uma nova versão (versão 4.0, desenvolvida em abril de 2023) foi desenvolvida ([eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30\\_e.htm](http://eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm), acessado em maio de 2023), com melhorias na detecção e correção de valores anômalos, definição de limites da superfície terrestre, e espaçamento entre pixels, especialmente em áreas de latitudes elevadas.



**Figura 3.** Dados do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) são utilizados para a produção do modelo AW3D a partir de técnicas de estereoscopia. Fonte: JAXA.

### c. NASADEM

O NASADEM surgiu a partir do reprocessamento dos dados brutos gerados pela missão SRTM (Crippen et al., 2016). Os métodos de processamento usados no MDE original foram melhorados nesta nova versão, e também foram incorporadas informações de instrumentos como os *Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite* (ICESat) *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) e *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). Essas melhorias propiciaram redução de falhas e artefatos (Figura 4), e conseqüentemente, redução de erros.



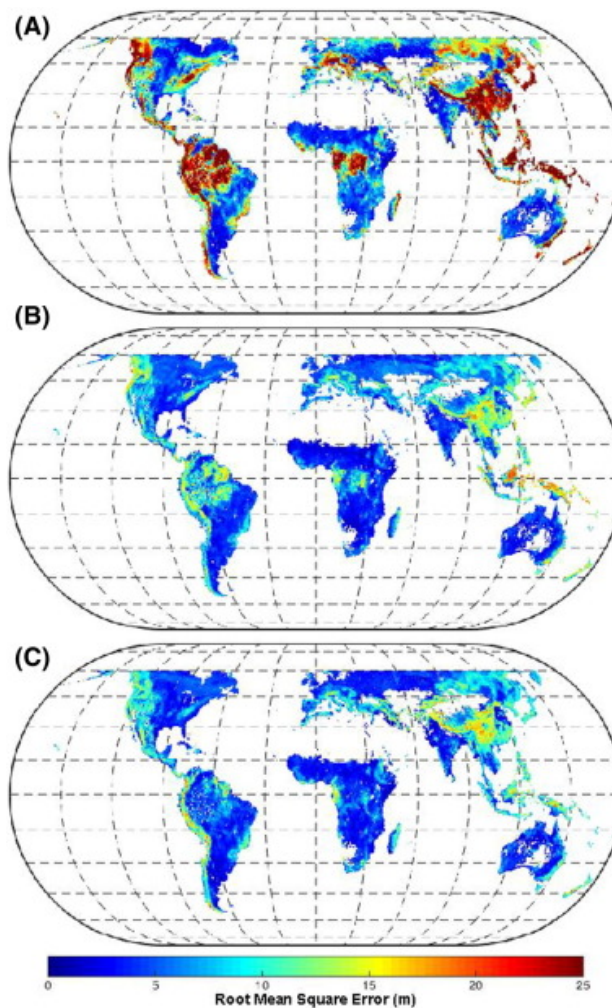
**Figura 4.** Dados ausentes (vermelho) no SRTM original e no NASADEM. Grand Canyon, EUA. Fonte: Crippen et al. (2016).

### d. Bare-Earth

O Bare-Earth (O'Loughlin et al., 2016) foi o primeiro MDT global desenvolvido a partir do SRTM, por meio da remoção do viés causado pela vegetação. Neste trabalho, o viés da vegetação foi determinado como a diferença entre dados do MDS SRTM e os dados pontuais de elevação do solo providenciados pelo produto ICESat. Para remover esse viés, foi aplicada uma função potencial da Fração de Cobertura da Vegetação (FCV) e da altura da vegetação (H). Os dados de FCV foram obtidos da base de dados MODIS *Vegetation Continuous Field*, com 250 m de resolução espacial; enquanto H foi obtido do trabalho realizado por Simard et al., (2011), com resolução de 1 km.



Os resultados do Bare-Earth estão disponíveis publicamente, com cobertura equivalente à do SRTM original e resolução espacial de 90 m. Embora os autores tenham obtido sucesso em reduzir significativamente o viés causado pela vegetação, o Bare-earth apresenta limitações devido à resolução espacial dos dados de entrada e à metodologia aplicada (**Figura 5**).



**Figura 5.** Mapa do resultado de raiz do erro médio quadrático (RMSE) em áreas vegetadas para o (a) SRTM, (b) SRTM com correção e (c) Bare Earth. Fonte: [O'Loughlin et al. \(2016\)](#).

#### e. TANDEM-X

Iniciada em 2010, a missão *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement* (TANDEM-X) teve por objetivo uma nova coleta de dados de elevação por meio de sensores radar a bordo de dois satélites em órbitas semelhantes, sendo o segundo



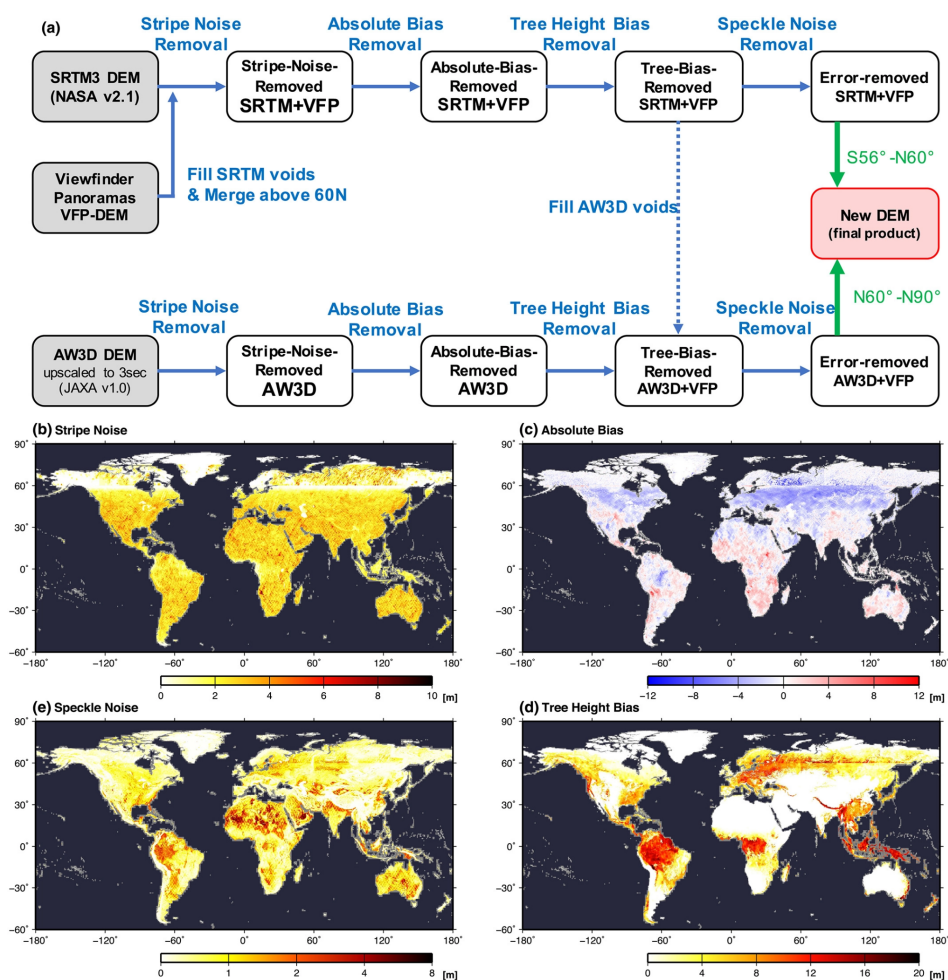
lançado em 2010. Foi resultado de uma parceria público-privada entre o Centro Aeroespacial Alemão e a *AirBus Defence and Space* e resultou na geração de um MDS chamado WorldDEM (Zink et al., 2014), com resolução espacial de 12 m e cobertura global (entre 60° S e 60° N). Os satélites ainda se encontram operacionais em 2023, obtendo dados topográficos continuamente, com tempo de revisita de aproximadamente 11 dias, o que possibilita o monitoramento da superfície terrestre.

#### f. MERIT-DEM

O *Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM* (MERIT DEM) (Yamazaki et al., 2017) foi elaborado como uma nova proposta de modelo global de elevação do terreno de alta acurácia. O modelo se baseou em uma série de correções para a remoção do viés ocasionado pela vegetação, erros oriundos de ruídos na aquisição dos dados (ruídos dos tipos *stripe* e *speckle*), entre outros existentes nos produtos SRTM e AW3D. Também foram utilizadas informações do VFP-DEM (*Viewfinder Panoramas DEM*) para preenchimento em áreas em que ambos os demais MDS's não possuíam informação. Além disso, dados de altimetria do ICESat foram utilizados como referencial da elevação no solo para estimativa do erro atribuído pela vegetação.

A remoção dos erros se deu, de forma geral, em quatro etapas (**Figura 6**): (1) ruídos *stripe*; (2) erros absolutos; (3) viés da altura da vegetação e; (4) ruídos *speckle*; O erro associado ao *speckle* ocorre devido a variabilidade da superfície em áreas planas, influenciando aleatoriamente nos valores de um número reduzido de pixels e em comprimentos de ondas muito curtos. Já os erros gerados pelo *stripe* no produto SRTM ocorreram, principalmente, devido a inconsistências na aplicação da interferometria, enquanto no AW3D os erros de ruídos *stripe* estão associados com a inclinação das elevações. Os erros absolutos de elevação são identificados como mudanças de elevação inconsistentes dentro de uma área de domínio (> 20 km), os quais podem ser observados em ambos modelos de interferometria e estereometria. Por fim, o viés ocasionado nas elevações devido à vegetação ocorre em ambos os modelos (SRTM e AW3D), visto que nenhuma das metodologias é capaz de obter informações da elevação do solo abaixo do dossel.

Para remoção dos ruídos *stripe*, aplicou-se um filtro 2D de transformada de Fourier. O erro absoluto foi removido a partir da diferença entre as elevações apresentadas pelos MDEs e as elevações do ICESat. A remoção do viés da vegetação foi posteriormente estimada como uma função da densidade da vegetação e da altura da vegetação utilizando dados ICESat, banco de dados de cobertura global de florestas e comparando ambos os DEMs utilizados. Na última etapa, o ruído *speckle* foi removido por meio de um filtro de suavização (*smoothing filter*). Por fim, é realizado a junção entre o produto resultante da aplicação das quatro correções no SRTM e AW3D para obtenção do resultado final do MERIT DEM.

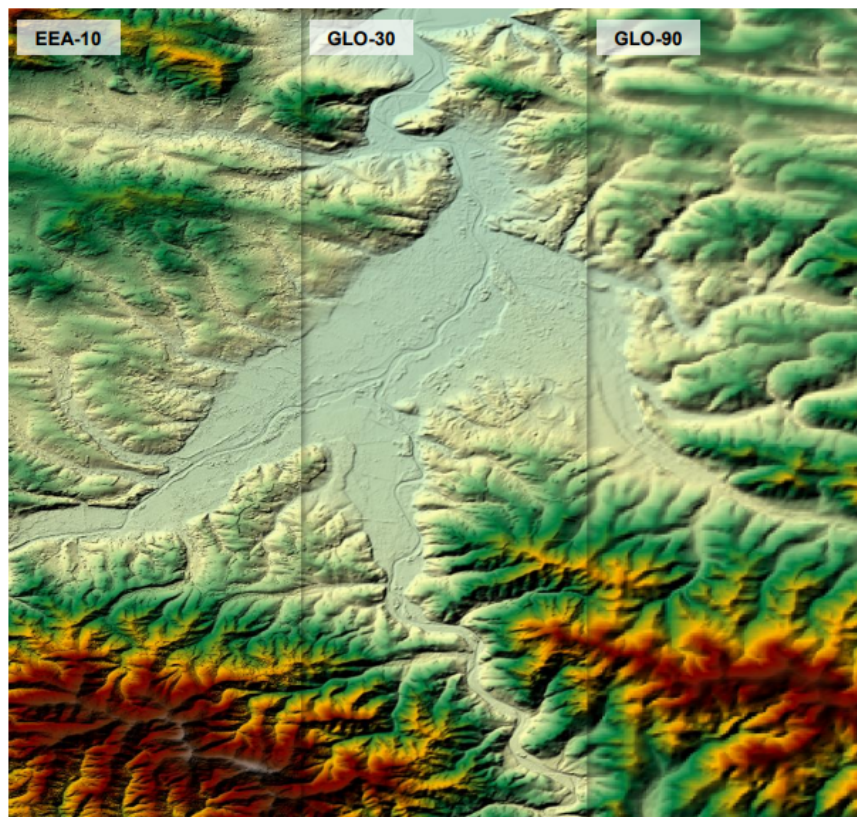


**Figura 6.** Esquematisação das etapas aplicadas para a remoção dos erros presentes no SRTM e no AW3D (Yamazaki et al. 2017).

### g. COPDEM

O MDS Copernicus GLO-30 (COPDEM) é uma versão derivada do MDS WorldDEM, com dados coletados entre 2011 e 2015, que foi disponibilizado a partir de 2016 (Airbus, 2020). O COPDEM propõe melhorias em relação à base de dados original, com processamentos adicionais de consistência dos valores de elevação de corpos hídricos, além de correções de elevações anômalas.

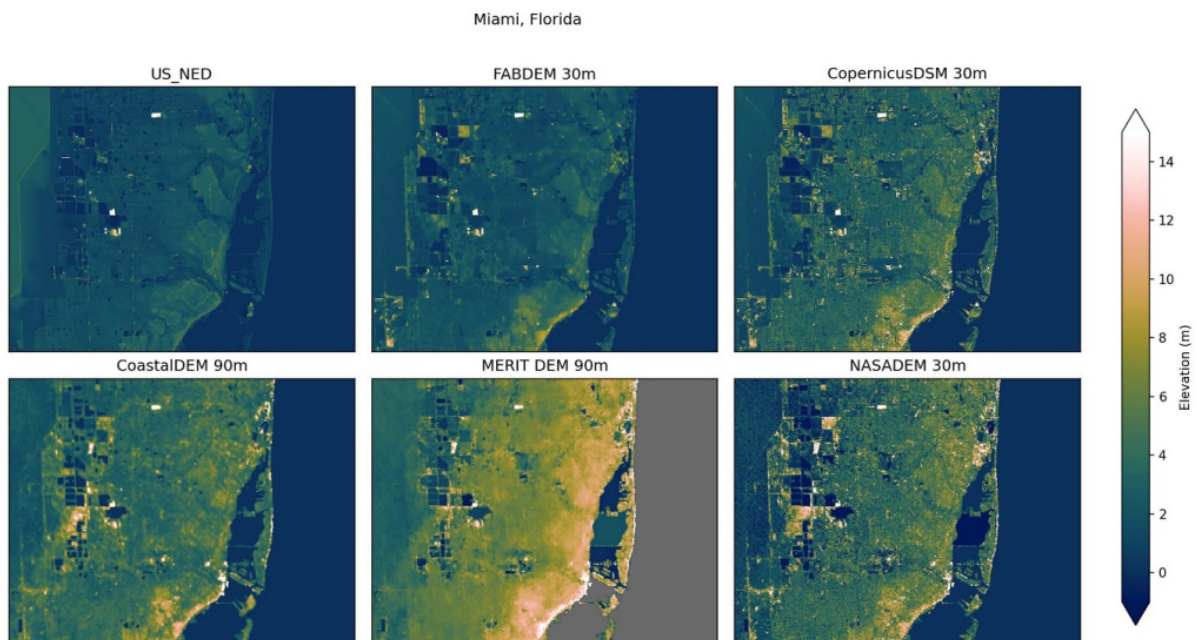
A versão global é disponibilizada pela ESA em resolução de 30 m (GLO-30), havendo também uma versão global de 90 m (GLO-90), além da versão de 10 m restrita a algumas regiões (Figura 7).



**Figura 7.** Comparação entre as diferentes versões do COPDEM disponíveis. As versões globais são disponibilizadas com resoluções de 30 e 90 m (GLO-30 e GLO-90), sendo também disponibilizado uma versão restrita à europa, com 10 m de resolução (EEA-10). Fonte: ESA.

## h. FABDEM

O FABDEM (*Forest And Buildings removed Copernicus DEM*) é um MDT (**Figura 8**) que se baseou em técnicas de *machine learning* para aplicar a remoção do viés da vegetação e de perímetros urbanos da base os dados de elevação do COPDEM (Hawker *et al.*, 2022). Os autores desenvolveram dois modelos *random forest* separados (**Figura 9**), um para estimativa de viés causado pela vegetação, e outro para estimar o viés causado por áreas urbanas. Ambos os modelos foram alimentados por dados de sensoriamento remoto, sendo que os dados de altimetria LIDAR do produto GEDI foram utilizados como referência altimétrica relativa ao solo.

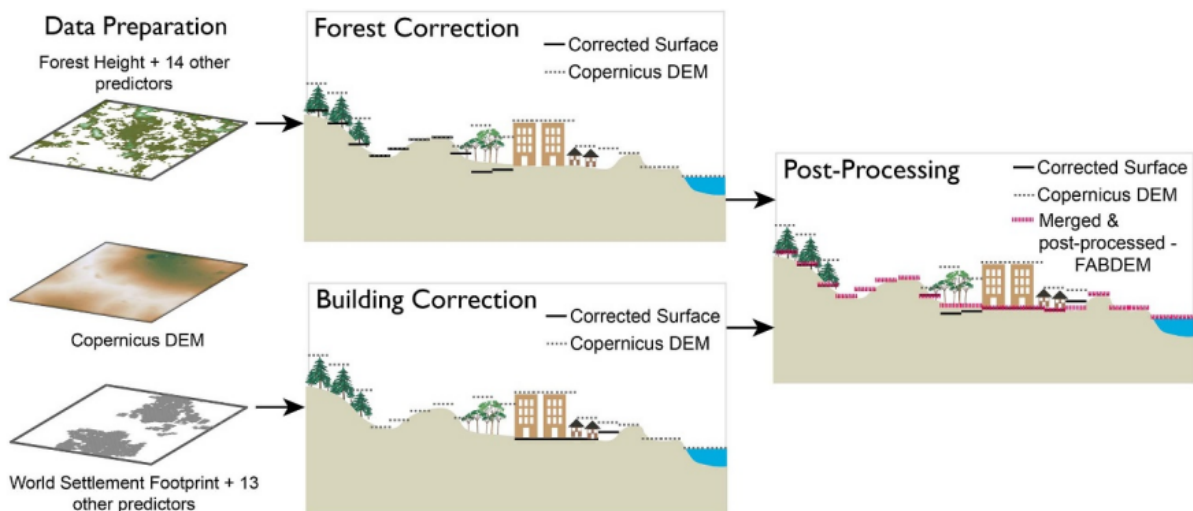


**Figura 8.** Comparação de diferentes MDEs em uma região da Flórida, incluindo os MDTs MERIT e FABDEM.

A remoção do efeito da floresta foi assumida como diferença entre a elevação do COPDEM com os dados de elevação no nível do solo do GEDI. As correções foram realizadas para os pixels em que a altura da vegetação foi maior do que 3 m e percentual de cobertura da vegetação maior do que 10%.



Para a remoção do viés de edificações, utilizou-se informações das diferenças entre o COPDEM e dados de elevação do solo do GEDI para áreas urbanas. Como dados de entrada do modelo, foram coletadas informações de densidade da população (WorldPop), luzes noturnas, footprint de edificações (*World Settlement Footprint*) e informações socioeconômicas como percentual de áreas construídas per capita.



**Figura 9.** Representação esquemática das etapas de geração do FABDEM.

Após a correção do viés da vegetação e de áreas urbanas no MDE, foi realizado o pós-processamento para reduzir valores inconsistentes e também para a redução do ruído. O preenchimento de depressões foi realizado para os pixels modificados pela correção dos viés. Para remoção de ruídos nos resultados da modelagem, foram utilizadas ferramentas de filtragem disponíveis no programa *Whitebox-Tools*.

### 2.3. Relevância dos MDEs para aplicações hidrológicas

MDEs fornecem informações topográficas indispensáveis para várias áreas do conhecimento, incluindo demografia, ecologia, geomorfologia, glaciologia, ciências do solo, agricultura, vulcanologia, climatologia e hidrologia. No âmbito da modelagem hidrológica, os MDEs são essenciais para delinear bacias hidrográficas e sua rede de drenagem, caracterizar propriedades de fluxo de superfície, modelar

propagação de vazões, dimensionar e avaliar a segurança hidrológica de reservatórios (Shamsi, 2001). Além disso, os MDEs também auxiliam na análise de transporte de sedimentos e nutrientes, bem como no desenvolvimento de modelos de qualidade da água.

Nas últimas décadas, a disponibilidade de MDEs, combinada com avanços em sistemas de informações geográficas, em sensoriamento remoto e na análise de macrodados (*big data*), tem melhorado a precisão e o detalhamento da representação da topografia da superfície. Consequentemente, a modelagem hidrológica tem se beneficiado dessas melhorias em termos de precisão, acurácia e operacionalidade (Choudhury, 2023). No entanto, MDEs introduzem incertezas na representação do terreno, um fator frequentemente negligenciado pelos usuários. Abordar essa incerteza é de suma importância para estudos hidrológicos e para a comunidade hidrológica em geral. Apesar do uso generalizado de MDEs em hidrologia, sua qualidade e os algoritmos utilizados para processamento podem impactar significativamente os resultados. Questões como vieses causados por árvores e construções nos MDEs podem representar desafios, especialmente em aplicações hidrológicas onde artefatos no MDE podem modificar os caminhos de escoamento superficial (Wise, 2000; Wechsler, 2007).

Para superar esses desafios, esforços consideráveis têm sido dedicados ao desenvolvimento de algoritmos e ferramentas que aprimoram a resolução e a precisão dos MDEs para análise hidrológica. O reconhecimento da importância da representação do terreno, especialmente em aplicações como modelagem de inundação, tem enfatizado ainda mais a necessidade de modelos aprimorados (Hawker et al., 2022). Globalmente, os DSMs predominam em relação aos DTMs, dada a dificuldade de se obter informações sobre o terreno sob a vegetação. Há, portanto, uma demanda por DTMs de alta resolução e precisão, que podem fortalecer aplicações e modelos que requerem informações de terreno globais de alta qualidade.

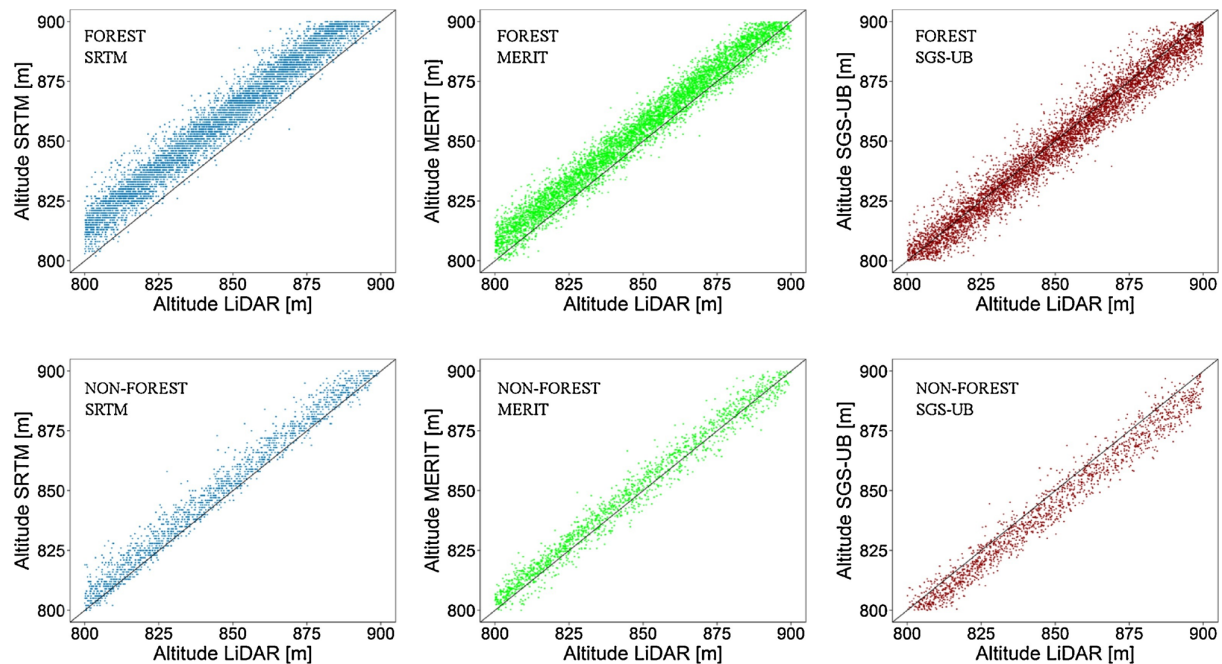
### 2.3. Limitações dos modelos globais

Apesar da grande gama de aplicações de MDEs globais, sua resolução espacial grosseira é impeditiva para estudos que demandam uma representação detalhada da superfície terrestre. Em estudos de propagação hidrodinâmica de cheias, por exemplo, o uso de diferentes MDEs pode resultar em uma diferença na previsão de vazões de cerca de 10%, devido insensibilidade dos MDEs globais às estruturas do relevo que controlam o escoamento (Kenward et al., 2000; Shumann, 2014). Além disso, a dificuldade de se determinar o grau de penetração na vegetação do sinais emitidos pelos sensores a bordo dos satélites resulta em erros verticais presentes em muitos modelos. Esses erros, quando não corrigidos, inserem artefatos em na determinação de redes de drenagem e em modelos hidrodinâmicos (Bielski et al., 2023), o que pode muitas vezes inviabilizar seu uso para elaboração de documentos importantes para gestão de risco, como os Planos de Ações Emergencias de Barragens. Dessa forma, para tais estudos, costumam ser utilizados levantamentos altimétricos locais, comumente feitos a partir de dados obtidos por sensores a bordo de aeronaves, o que envolve altos custos e pequena cobertura espacial, mas fornecem alta acurácia, resolução espacial e remoção dos erros associados à vegetação.

Tentativas de remoção dos erros visam melhorar os MDEs disponíveis a partir de dados de sensoriamento remoto. Uma importante informação sobre altura e densidade da vegetação é fornecida por sensores LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Dados LIDAR podem ser associados a outras informações obtidas por sensores remotos, como índices de vegetação e albedo, para corrigir os MDE e aproximá-los de um MDT. Embora essas práticas apresentem resultados promissores, são derivadas de relações altamente empíricas, o que pode resultar em grande incerteza para algumas regiões e condições específicas, como a sobre correção do viés em áreas não florestadas pelo modelo Bare Earth (**Figura 10**). Por exemplo, a primeira versão do FABDEM, mais recente MDT gerado a partir do COPDEM, apresentou artefatos resultantes da subdivisão do globo em uma grade para aplicação da técnica de aprendizado de máquina. Além disso, o modelo passou por uma etapa de pós-processamento que buscou uma otimização global do modelo, que pode ter negligenciado sua performance em lugares específicos, como o Brasil.



Outra importante limitação dos MDEs globais é a sua idade. O SRTM é de 2000, enquanto o COPDEM foi gerado a partir de dados entre 2011 e 2015. Suas informações estão desatualizadas em áreas que alteradas por ações geomorfológicas ou por influência de atividades humanas, como mineração, agricultura e desmatamento (Shumann & Bates, 2018).



**Figura 10.** Gráficos de dispersão mostrando a relação entre a elevação na resolução de 90 m derivada do SRTM (esquerda e azul), MERIT(meio e verde) e Bare Earth (direita e vermelho), respectivamente, e a elevação derivada de LIDAR. A linha superior de figuras mostra áreas florestadas, enquanto as figuras inferiores mostram áreas não florestadas. A linha contínua indica a relação 1:1. Células com elevação de 800 m a 900 m foram selecionadas como exemplo representativo. Fonte: Moudrý et al., 2018.

## 2.4. Técnicas avançadas para estimativas de altura da vegetação

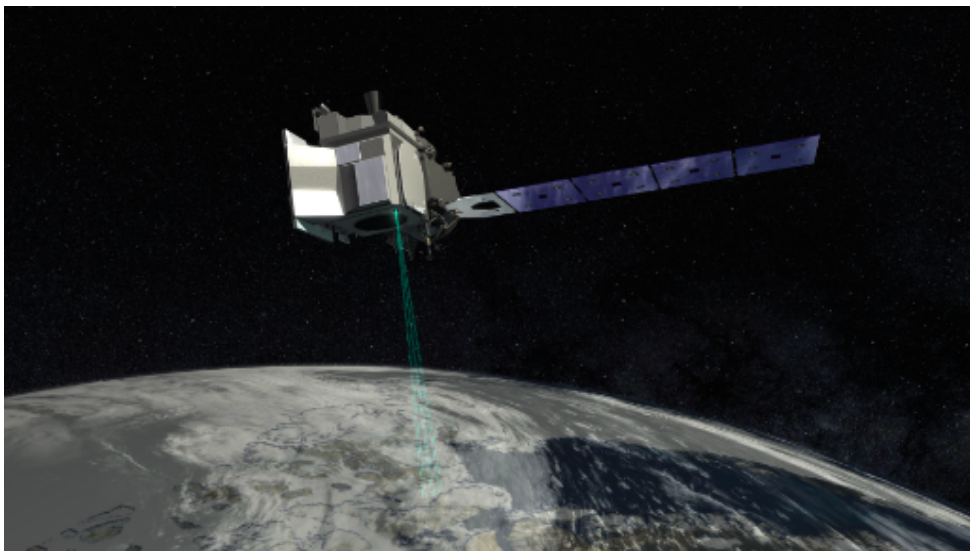
### a. Principais bases de dados para estimativas de altura da vegetação

#### i. ICESat

O satélite ICESat (*Ice, Cloud and Land Elevation Satellite*) com o sensor GLAS (*Geoscience Laser Altimeter System*), desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), foi o primeiro a obter medições de altimetria a laser do tipo

LIDAR de forma global (Schutz et al., 2005). Entre 2003 e 2009, o ICESat-1 adquiriu observações globais da superfície com um *footprint* de aproximadamente 65 metros, para cada 172 metros, no traçado realizado pela sua órbita (600 km). Os dados da missão ICESat-1 visam auxiliar nos estudos relacionados a variações espaciais e temporais da espessura das camadas de gelos, contribuir para estudos em relação às estruturas de nuvens e aerossóis, além de permitir estimativas da vegetação e da superfície terrestre.

A continuidade da missão ICESat veio em 2018 com o lançamento do segundo satélite (ICESat-2) (Figura 11) e a utilização do sensor ATLAS (*Advanced Topographic Laser Altimeter System*) (Abdalati et al., 2010). Entre os avanços apresentados pelo sensor ATLAS, está o aprimoramento na obtenção das medições, e o aumento significativo no número de medições ao longo da órbita do satélite. Ainda, o *footprint* passou para aproximadamente 14 metros, enquanto o intervalo de medição foi reduzido para cada 90 metros.



**Figura 11.** ICESat-2 (*Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2*) lançado em Setembro de 2018 pela NASA.

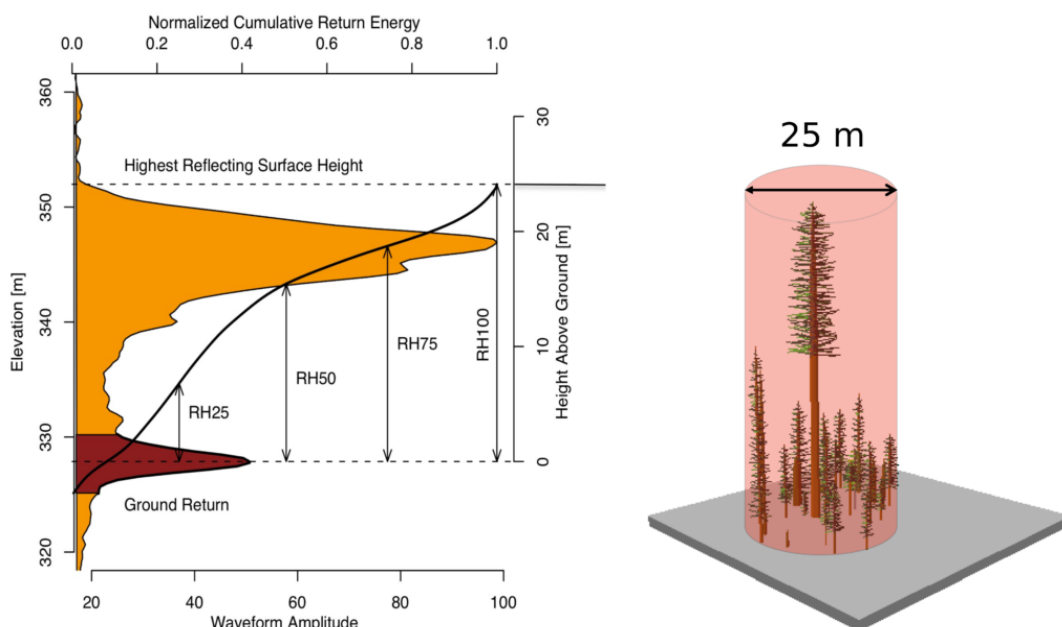
Fonte: NASA.

## ii. GEDI

O instrumento GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*) (Coyle et al., 2015), também de responsabilidade da NASA, possui um sistema LIDAR composto por 3 lasers que permitem a obtenção de dados em diferentes trajetórias. Cada medição possui um *footprint* de 25 m, intercalados entre 60 m ao longo da passagem.

Assim como outros sensores LIDAR, o GEDI obtém informações da altura da vegetação, para diferentes patamares (**Figura 12**), de acordo com o retorno da energia refletida em diferentes níveis acima da superfície terrestre.

O GEDI esteve acoplado na estação espacial internacional (*International Space Station* - ISS) desde 2018 até início de 2023 (4 anos de aquisição de dados), encontrando-se atualmente em manutenção, e deve retornar novamente à atividade a partir de 2024. Seu desenvolvimento ocorreu com o propósito de auxiliar estudos da vegetação e biodiversidade (Liu et al., 2021), com a disponibilização de dados precisos de altura da vegetação e de elevação terrestre, e permitir análises de processos do ciclo do carbono, como estimativas de biomassa (Albinet et al., 2019).



**Figura 12.** Resultados obtidos para cada footprint (25 m) do GEDI. As informações de altura da vegetação e ponto de referência da altura do terreno são obtidas a partir do retorno da energia refletida em diferentes níveis.

### **b. Métodos de estimativa de altura da vegetação**

Devido à relação entre altura e densidade da vegetação e os erros observados em MDEs, uma das mais importantes etapas na análise de MDEs e processamento de MDTs é a estimativa da altura da vegetação. Embora as bases de dados geradas pelo ICESAT e pelo GEDI forneçam valiosas informações, sua distribuição espacial é

insuficiente para sua utilização na remoção dos efeitos da vegetação em MDEs. Entretanto, elas são comumente utilizadas como referência para o desenvolvimento de mapas de altura da vegetação a partir de outros dados de sensoriamento remoto.

Devido à alta complexidade associada a esse desenvolvimento, muitos estudos lançam mão de métodos de aprendizado de máquinas (Simard et al., 2011; Potapov et al., 2021; Wang et al., 2021; Hawker et al., 2022; Lang et al., 2022). Tais métodos utilizam grandes quantidades de dados de entrada e alto poder de processamento para encontrar relações entre os dados de entrada e uma informação de referência. O aprendizado de máquinas (*machine learning*) engloba um conjunto de métodos que é largamente utilizado em casos onde modelos desenvolvidos por humanos são incapazes de explicar as nuances de um fenômeno e performam de maneira irregular.

Um dos métodos mais comumente utilizados neste contexto é o *random forest regression* (RFR), que utiliza o resultado médio de vários modelos estimadores (árvores). Em cada árvore do modelo são ajustadas funções para sub-amostras dos dados de entrada e de referência. Cada estimador encontra a melhor aproximação para a sub-amostra designada a ele. A adoção do resultado médio entre os estimadores aumenta as chances de um resultado robusto e que pode ser generalizado para uma ampla gama de configurações. A principal limitação do aprendizado de máquinas é a sua natureza empírica, que impede sua extrapolação a condições fora da sua amostra de dados de entrada. Dessa forma, para o sucesso de aplicações como RFR, deve-se levantar o maior número de dados possível, representando todas as possibilidades de cenário associado a um fenômeno. Há alguns anos, essa limitação era impeditiva para a aplicação em larga escala desses métodos, mas com acesso a sistemas de computação em nuvem como o Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>), usuários podem desenvolver e compartilhar algoritmos com capacidade de processamento de um grande número de dados.

### 3. Considerações Finais

O presente levantamento bibliográfico é uma importante etapa no desenvolvimento de um MDT para a América do Sul. Este documento irá subsidiar as próximas etapas do projeto, que envolve a seleção dos métodos e dos dados de entrada para a geração do MDT. Nele foram incluídas descrições dos principais MDEs existentes, bem como as mais recentes propostas de remoção do viés provocado pela vegetação e por edificações, para a geração de MDTs. Também foram descritos os principais dados LIDAR disponíveis, que possibilitam a aplicação dessas propostas em escala global. Com base nesta revisão, o método *random forest regression* se apresenta como melhor candidato para aplicação, devido à complexidade do fenômeno em estudo, além da sua capacidade de processar grandes quantidades de amostras e bases de dados.

### 4. Referências bibliográficas

Abdalati, W., Zwally, H.J., Bindenschadler, R., Csatho, B., Farrell, S.L., Fricker, H.A., Harding, D., Kwok, R., Lefsky, M., Markus, T., Marshak, A., Neumann, T., Palm, S., Schutz, B., Smith, B., Spinhirne, J., Webb, C., 2010. The ICESat-2 Laser Altimetry Mission. *Proc. IEEE* 98, 735–751. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2034765>.

Albinet, C., Whitehurst, A.S., Jewell, L.A., Bugbee, K., Laur, H., Murphy, K.J., Frommknecht, B., Scipal, K., Costa, G., Jai, B., Ramachandran, R., Lavalle, M., Duncanson, L., 2019. A Joint ESA-NASA Multi-mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP) for Biomass, NISAR, and GEDI. *Surv. Geophys.* 40, 1017–1027. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09541-z>.

AIRBUS. 2020 Copernicus DEM: copernicus digital elevation model product handbook *Report AO/1-9422/18/I-LG* (European Space Agency).

Bielski, C.; López-Vázquez, C.; Grohmann, C.H.; Guth, P.L.; the TMSG DEMIX Working Group (2023). DEMIX Wine Contest Method Ranks ALOS AW3D30, COPDEM, and FABDEM as Top 1” Global DEMs. [pre-print] *ArXiv*.

Chowdhury, M.S. (2023). Modelling hydrological factors from DEM using GIS. *MethodsX*. 2023 Feb 6; 10:102062. doi: 10.1016/j.mex.2023.102062. PMID: 36845367; PMCID: PMC9945793.

Coyle, D.B., Stysley, P.R., Poullos, D., Clarke, G.B., Kay, R.B., 2015. Laser transmitter development for NASA’s Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar, in: *Proc. SPIE*. p. 961208. <https://doi.org/10.1117/12.2191569>

Crippen, R.; Buckley, S.; Agram, P.; Belz, E.; Gurrola, E.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Lavalley, M.; Martin, J.; Neumann, M.; Nguyen, Q.; Rosen, P.; Shimada, J.; Simard, M.; and Tung, W. (2016) NASADEM Global Elevation Model: Methods and Progress. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*; XLI-B4, 125–128. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-125-2016.

Farr, T. G.; Rosen, P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. DOI: 10.1029/2005RG000183.

Hawker, L.; Uhe, P.; Paulo, L.; Sosa, J.; Savage, J.; Sampson, C.; Neal, J. (2022). A 30m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*. 17. 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

Kenward, T., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Fielding, E. (2000). Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions. *Remote Sens. Environ.* 74, 432–444. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00136-X.

Lang, Nico & Kalischek, Nikolai & Armston, John & Dubayah, Ralph & Wegner, Jan. (2022). Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles. *Remote Sensing of Environment*. 268. 112760. 10.1016/j.rse.2021.112760.

Liu, A., Cheng, X., Chen, Z., 2021. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sens. Environ.* 264, 112571. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112571>.

Moudrý, Vítězslav & Lecours, Vincent & Gdulová, Kateřina & Gabor, Lukas & Moudrá, Lucie & Kropáček, Jan & Wild, Jan. (2018). On the use of global DEMs in ecological modelling and the accuracy of new bare-earth DEMs. *Ecological Modelling* 383. 10.1016/j.ecolmodel.2018.05.006.

NASA JPL (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003.

O’Loughlin, F. E. R. C. D. Paiva, M. Durand, D. E. Alsdorf, and P. D. Bates (2016) A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sens. Environ.*, 182, 49–59. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.018.

Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C.E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J.B., Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165.

Rodríguez, E Morris, C. S and Belz, J. E. (2006) A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(3), 249–260. DOI: 10.14358/PERS.72.3.249.



- Schumann, G.P. Fight floods on a global scale. *Nature* 507, 169 (2014). <https://doi.org/10.1038/507169e>.
- Schumann, G.; Bates, P. (2018). The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science*. 6. 225. [10.3389/feart.2018.00225](https://doi.org/10.3389/feart.2018.00225).
- Schutz, B.E., Zwally, H.J., Shuman, C.A., Hancock, D., DiMarzio, J.P., 2005. Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.* 32. [https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005GL024009](https://doi.org/10.1029/2005GL024009)
- Shamsi, U. (2001). DEM Applications in Hydrologic Modeling. *Journal of Water Management Modeling*, 10.14796/jwmm.r207-12.
- Simard, M Pinto, N Fisher, J. B and Baccini, A. (2011), Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar, *J. Geophys. Res.*, 116, G04021, doi:10.1029/2011JG001708.
- Siqueira, V.A Fleischmann, A Jardim, P. F Fan, F. M & Collischonn, W. (2016) IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 274–287. DOI: 10.21168/rbrh.v21n1.p274-287.
- Tadono, T.; Ishida, H.; Oda, F.; Naito, S.; Minakawa, K.; Iwamoto H. (2014). Precise Global DEM Generation By ALOS PRISM, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.II-4, pp.71-76.
- Takaku, J.; Tadono, T.; Tsutsui, K. (2014). Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(4).
- Wang, Hui & Seaborn, Travis & Wang, Zhe & Caudill, Christopher & Link, Timothy. (2021). Modeling tree canopy height using machine learning over mixed vegetation landscapes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 101. 102353. [10.1016/j.jag.2021.102353](https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102353).
- Wechsler, S.P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1481–1500, [10.5194/hess-11-1481-2007](https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007),
- Wise, S. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, 14 (11-12), 1909–1929. [10.1002/1099-1085\(20000815/30\)14:11/12<1909::aid-hyp45>3.0.co;2-6](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<1909::aid-hyp45>3.0.co;2-6)
- Yamazaki, D D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O’Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates (2017) A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5844–5853. DOI: [10.1002/2017GL072874](https://doi.org/10.1002/2017GL072874).
- Yamazaki D D. Ikeshima, J. Sosa, P.D. Bates, G.H. Allen, and T.M. Pavelsky (2019) MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography datasets. *Water Resources Research*, vol.55, pp.5053-5073, 2019. DOI: [10.1029/2019WR024873](https://doi.org/10.1029/2019WR024873).



Zink, M.; Bachmann, M.; Brautigam, B.; Fritz, T.; Hajnsek, I.; Moreira, A.; Wessel, B.; Krieger, G. (2014). TanDEM-X: The New Global DEM Takes Shape. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2(2), 8–23. doi:10.1109/mgrs.2014.2318895.