

PARECER TÉCNICO Nº 11/2021/SRE
Documento nº 02500.016016/2021-61

Metodologia de estimativa de volume e altura de barramentos, para fins de preenchimento do SNISB.

1. O presente parecer técnico apresenta uma metodologia para estimar, de forma simplificada, a altura e o volume de barragens/reservatórios nos quais essa informação não é conhecida, para fins de segurança de barragens, preenchimento do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e classificação preliminar.
2. A Lei 12.334/2010 se aplica a barragens com mais de 15m de altura e/ou volume armazenado superior a 3 hm³, assim como Dano Potencial Associado médio ou alto, dado este que necessita da altura da barragem e do volume do reservatório para ser determinado. Portanto a identificação, mesmo que aproximada, destas duas características é necessária para a priorização de barramentos, ação do órgão fiscalizador e aplicação da lei de modo geral.
3. No entanto, na grande maioria dos empreendimentos, estas informações são desconhecidas. A base de massas d'água produzida pela SPR/ANA (versão 2019) apresenta um total de 174.526 massas d'água artificiais em todo país, sendo que o volume é conhecido somente em 3661 delas (2%) e a altura, em 3232 (<2%).
4. Assim, faz-se necessário identificar essa informação de maneira indireta e automática, através de variáveis explicativas ou outras informações disponíveis em escritório, sem que seja preciso vistoriar todas as barragens individualmente. A metodologia aqui proposta parte do modelo digital de elevação (MDE) do SRTM e de outras informações disponíveis no SNISB e na base de massas d'água, para estimar o volume armazenado e a altura do barramento.

Correlação área volume

5. Uma possibilidade metodológica comumente usada é a estimativa da capacidade de armazenamento a partir de uma regressão estatística, usando como variável explicativa a área inundada pelo reservatório. Como essa informação está disponível para todos os 170 mil empreendimentos, uma vez que se disponha de uma equação de regressão, esta pode ser aplicada para estimar seu volume.
6. Assim, optou-se por obter essa regressão, usando o conjunto de empreendimentos onde se conhece o volume, em três categorias de porte do reservatório: pequeno, médio e grande. Os limites de porte entre as categorias não foram definidos a priori, tendo sido testados diferentes limites até que se obtivesse regressões melhores em cada categoria. Para o porte pequeno, foram usados reservatórios com área inundada de até 5 hectares. Para o porte intermediário, foram considerados na regressão empreendimentos com

área inundada entre 1,6 e 50 hectares. E para o porte grande, foram considerados na regressão empreendimentos com área inundada superior a 20 hectares. Portanto, há sobreposição nas massas de dados usadas em cada categoria, sendo que os limites de aplicação serão definidos posteriormente, na intersecção das respectivas equações.

7. As regressões obtidas são mostradas nas figuras abaixo, em escala bi-logarítmica, bem como seus coeficientes de ajuste R² e os intervalos de confiança da predição, com 95%.

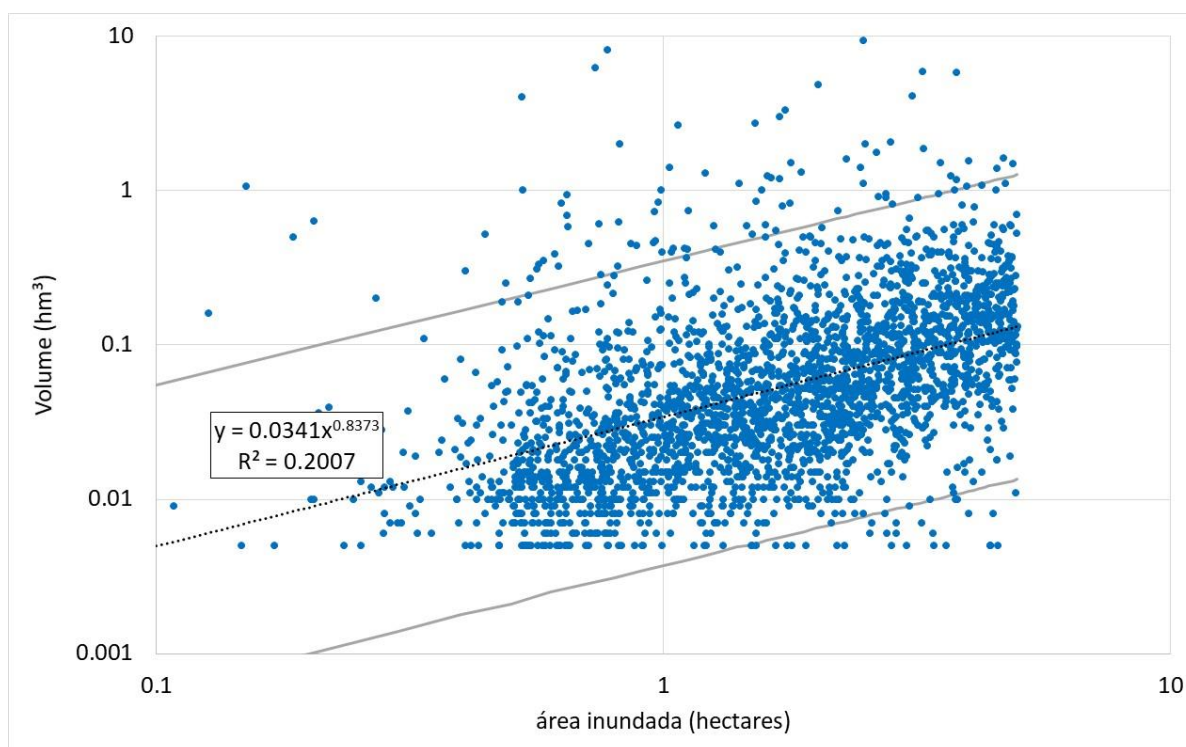


Figura 1. Regressão entre área inundada e capacidade de armazenamento para o porte pequeno



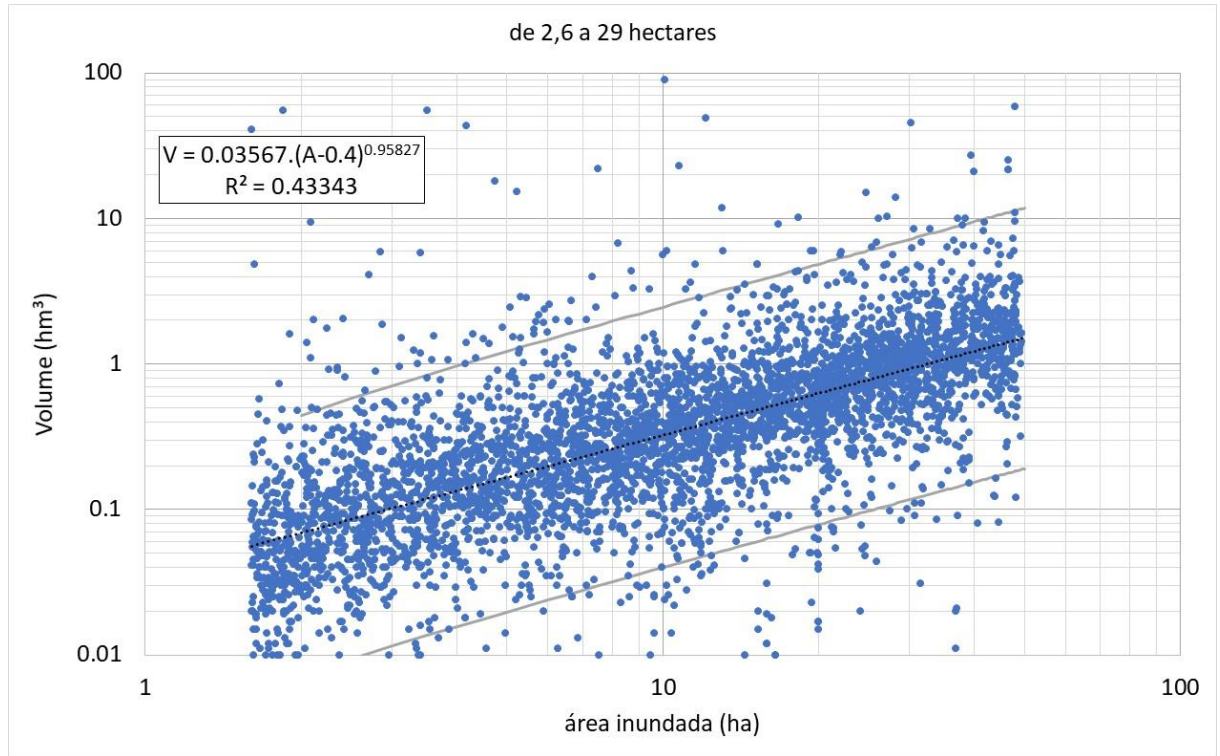


Figura 2. Regressão entre área inundada e capacidade de armazenamento para o porte médio

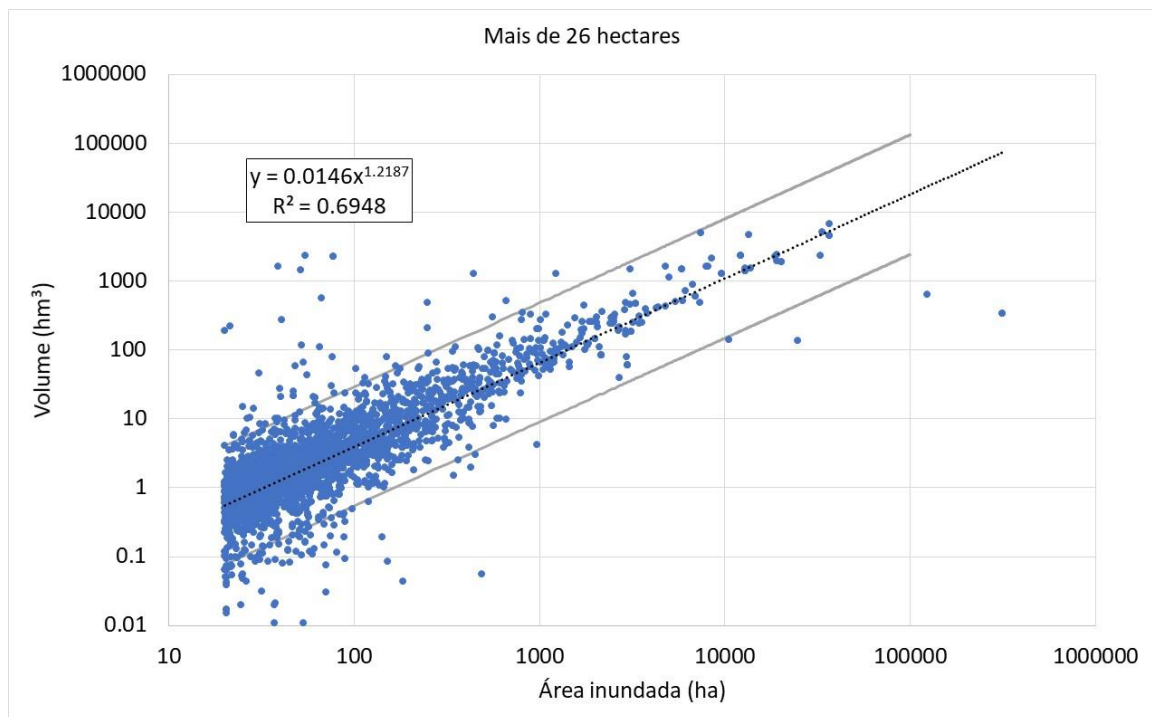


Figura 3. Regressão entre área inundada e capacidade de armazenamento para o porte grande

8. A equação para o porte pequeno é válida para áreas inundadas até 2,6 hectares, enquanto a equação para o porte grande é válida para áreas inundadas acima de 29 hectares. A equação para o porte intermediário é válida para valores entre esses limites.

9. A grande vantagem deste conjunto de equações é sua simplicidade, fazendo com que, na falta de outra informação melhor, sejam um ponto de partida para uma estimativa preliminar do volume de um grande número de reservatórios artificiais. Também se percebe uma melhora dos coeficientes de regressão à medida em que o porte aumenta.

10. Por outro lado, a apresentação dos resultados em escala bi-logarítmica, embora possua a vantagem de aproximar os extremos e mostrar o desempenho para uma grande faixa de variação, acaba por mascarar a grande dispersão dos resultados. Tomando-se a equação de porte médio, por exemplo, chega-se à conclusão que um reservatório com 10 hectares de área inundada tem um volume esperado de cerca de 0,3 hm³, mas considerando o intervalo de confiança, este pode ser de desde 0,04 hm³ até 2,5 hm³, ou seja, uma ordem de grandeza acima ou abaixo. A utilidade, para um tomador de decisão, de uma informação com tanta incerteza acaba sendo limitada.

11. Tal incerteza é esperada, uma vez que a área inundada, embora tenha relação direta com a capacidade de armazenamento, não é a única variável explicativa para sua estimativa. Um reservatório profundo ou situado em uma área inclinada terá um volume superior a outro situado em uma área mais plana, mesmo que ambos tenham a mesma área inundada.

Estimativa física com base no relevo – considerações gerais

12. Tendo em vista que o relevo também influencia na capacidade de armazenamento, uma alternativa seria sofisticar a correlação incluindo uma variável explicativa adicional, digamos a inclinação média do terreno no entorno do reservatório. No entanto, a inclusão dessa variável na regressão múltipla tem alguns inconvenientes. Em primeiro lugar, tornaria a estimativa menos parcimoniosa, e possivelmente com um número maior de casos/equações (da mesma forma que existem 3 equações para diferentes portes, caso a massa de dados fosse dividida em 3 classes de declividade, resultaria um total de 9 equações), dificultando sua aplicação posterior. Além disso, em espelhos d'água que já existiam na época da passagem da missão SRTM (fevereiro de 2000), a inclinação do terreno fica enviesada pela inundação causada pelo reservatório, não correspondendo à inclinação do terreno em si.

13. Uma vez que se pretende usar alguma expressão do terreno como variável explicativa, faz mais sentido utilizá-lo diretamente em uma estimativa física do volume, e não por meio de uma regressão estatística. O volume de um reservatório pode ser calculado diretamente por meio da multiplicação de sua área inundada (no NA máximo) pela profundidade média.



Assim, caso seja possível estimar essas duas variáveis, esse cálculo poderia ser feito diretamente. Da mesma forma, a altura da barragem, ou pelo menos a diferença de nível d'água a montante e a jusante, pode ser estimado aproximadamente a partir dos dados do relevo no reservatório e em seu entorno.

14. A partir de um modelo digital de elevação, a operação *Zonal Statistics as a Table* do Arcgis permite a estimativa do valor médio dos *pixels* contidos dentro de uma zona ou polígono (no caso, o contorno de cada área inundada). Essa operação também retorna o valor máximo, mínimo, a moda, entre outras estatísticas. Essa operação foi a base para as estimativas das variáveis geométricas necessárias para estimativa da altura e volume. A seguir apresenta-se como essas variáveis são obtidas.

Estimativa da altura

15. Como visto, a proposta é que a altura da barragem seja estimada pela diferença de nível d'água máximo de montante e o NA de jusante. A rigor, essa diferença corresponde à queda líquida, e não à altura da barragem, uma vez que esta sempre tem seu coroamento alguns metros acima do NA de montante. No entanto, como essa borda livre é variável, e as incertezas do relevo digital tendem a ser muito maiores do que esse parâmetro, considerou-se que não caberia qualquer correção ao valor estimado.

16. Como visto, a operação *Zonal Statistics* fornece o valor do pixel máximo e mínimo dentro de cada polígono de espelho d'água, assim a mera subtração desses valores já forneceria uma estimativa da altura. Entretanto, esta abordagem não traz bons resultados, por dois motivos. Em primeiro lugar, o valor máximo dos *pixels* acaba sendo muito influenciado pela topografia nas margens ou em ilhas interiores ao reservatório, não sendo representativo do nível d'água máximo em si. O nível mínimo, por sua vez, não pode ser adequadamente identificado a partir dos pixels contidos dentro do polígono, nos casos em que o reservatório já existia quando da passagem do SRTM.

17. Para contornar o primeiro problema, optou-se por estimar o NA máximo obtendo-se a média somente dos valores dos *pixels* situados no perímetro do espelho d'água (e não a todos os pixels internos ao polígono). Com isso, eventuais valores extremos de *pixels* acabam sendo filtrados. Esse resultado foi obtido aplicando-se a operação *Zonal Statistics* à polilinha equivalente ao perímetro (obtida da conversão do polígono em polilinha).

18. Já para estimativa do nível mínimo, aplicou-se um *buffer* aos polígonos das massas d'água, para que a consulta ao relevo abrangesse uma porção a jusante da barragem, e portanto contemplasse também pixels não inundados. Diferentes tamanhos de *buffer* foram testados para essa operação. Um *buffer* muito curto acarreta o risco de que a consulta não se estenda além dos limites da própria barragem (quando esta já existia em fev/200), resultando em pixels mínimos que não representam o NA de jusante. Um *buffer* muito extenso, por sua vez, pode retornar pixels mínimos muito baixos (sobretudo em regiões de maior declividade).



19. O melhor resultado foi obtido aplicando-se um *buffer* variável, de acordo com o tamanho do espelho d'água. Para espelhos com até 20 hectares, o *buffer* foi de 90m, correspondente a 3 *pixels*. Para espelhos com mais de 500 hectares, o *buffer* foi de 270m (9 *pixels*), e para espelhos intermediários, 180 metros (6 *pixels*). A figura abaixo mostra estes buffers para a barragem da UHE Emborcação, que é bastante alta e, conseqüentemente, larga. Observa-se que, caso fosse usado um *buffer* menor neste caso, a consulta não identificaria *pixels* mínimos condizentes com o NA de jusante, e portanto subestimaria bastante a altura desta barragem.

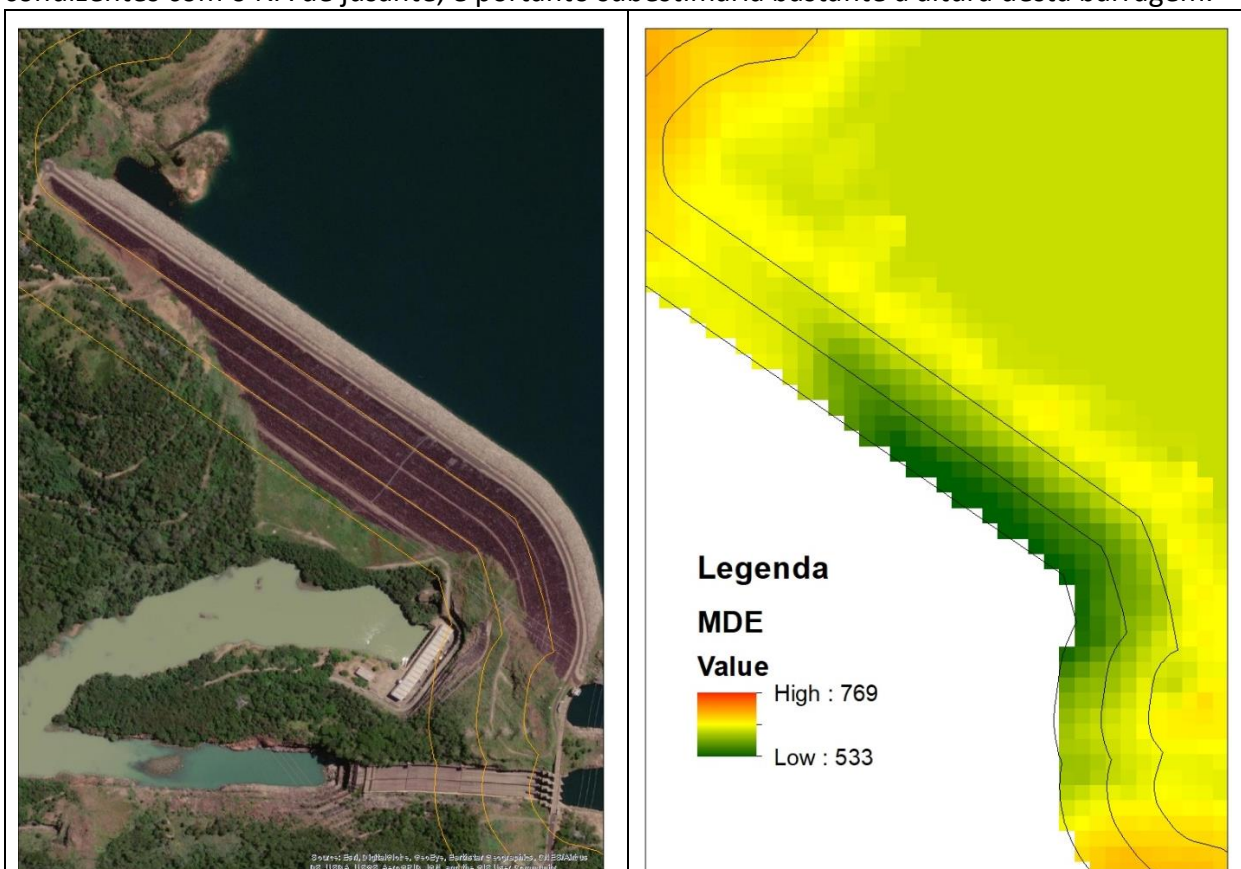


Figura 4. Buffers de 90, 180 e 270 metros em torno do espelho d'água da UHE Emborcação

20. Portanto, a altura da barragem é estimada aqui, de forma simplificada, pela seguinte equação:

$$h = \bar{Z}_{perim} - Z_{jus}^{min} \quad (\text{eq. 1})$$

onde \bar{Z}_{perim} é a altitude média dos pixels situados no perímetro do espelho d'água, em metros, e Z_{jus}^{min} é a altitude mínima dos pixels em um buffer em torno do espelho (de 90, 180 ou 270m, de acordo com a área inundada)

21. Essa metodologia foi validada em um conjunto de 1714 espelhos em que se conhece a altura da barragem, e o resultado é mostrado na figura abaixo. Como a variabilidade



de alturas possíveis é grande, optou-se por plotar os resultados em escala bi-logarítmica, para que os valores em diferentes ordens de grandeza possam ser melhor visualizados.

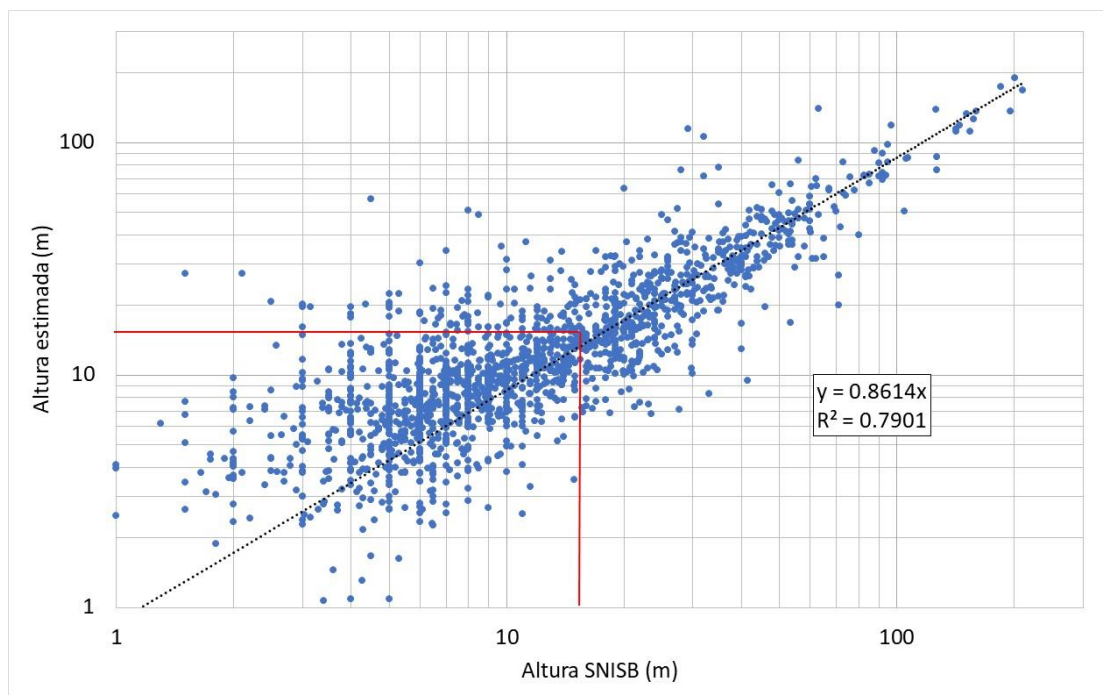


Figura 5. Validação da metodologia para estimativa de altura da barragem

22. Foi ajustada uma equação de reta com intercessão na origem, apenas como um guia geral da performance da estimativa, uma vez que neste caso não se pretende aplicar uma regressão, e sim a metodologia em si. O coeficiente angular inferior à unidade mostra que, em média, essa metodologia subestima a altura das barragens. Este resultado era esperado, por um lado devido à borda livre entre o nível d'água máximo e a cota de coroamento da barragem (que não está incluído na estimativa), e por outro lado devido à interferência de árvores e vegetação junto ao leito do rio, fazendo com que o nível de jusante frequentemente seja superestimado pelo SRTM.

23. Ainda assim, considera-se que os resultados apresentados são razoáveis, e podem ser usados como uma estimativa preliminar da altura, pelo menos para uma priorização inicial de empreendimentos a serem classificados e/ou vistoriados. Sobretudo para barragens com altura maior de 15m, que estão sujeitas à lei 12334/2010, a performance da estimativa torna-se gradativamente melhor.

24. Eventualmente, caso se deseje ser mais a favor da segurança, pode-se dividir o resultado da estimativa pelo coeficiente angular da regressão (0,8614), de forma a majorar a altura e compensar os fatores que causam subestimativa, mencionados acima. Com isso, um conjunto maior de barragens passaria a ser incluído na PNSB.



25. Em algumas situações, a metodologia tem uma imprecisão considerável devido a particularidades do arranjo e da topografia do reservatório/barramento. É o caso da barragem do Salto Curucaca (ESP_CD 8064), que possui somente 4,5m de altura, no entanto foi estimada como tendo 57m. A figura abaixo mostra uma captura do Google Earth® com a configuração desse empreendimento, para que se possa compreender o motivo da imprecisão.

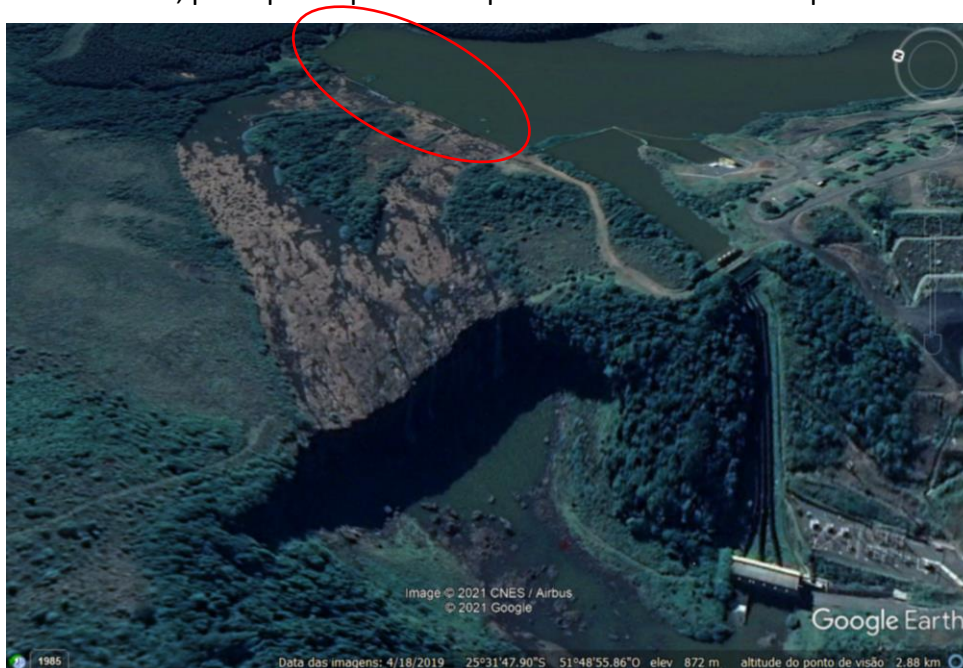


Figura 6. Configuração da UHE Salto Curucaca

26. Como se vê, essa hidrelétrica possui um pequeno barramento a montante de uma cachoeira bastante alta, apenas para elevar o nível e permitir a condução da água a uma casa de força separada da barragem, que restitui a água a jusante da cachoeira. Ao aplicar-se o buffer ao espelho d'água, acabou-se por identificar níveis mínimos também a jusante da cachoeira, e não no trecho entre esta e a barragem. Imprecisões como esta tendem a ocorrer em usinas hidrelétricas com arranjos similares, em que exista um trecho de vazão reduzida e uma casa de força separada da barragem. Entretanto, este problema é minimizado pelo fato de que a altura e o volume são conhecidos na maior parte dos empreendimentos hidrelétricos, de forma que esse tipo de situação não tende a ocorrer para as barragens em que se pretende aplicar a metodologia.

Volume

27. Para a estimativa do volume a partir das características do terreno sob o reservatório, é necessário distinguir, de alguma forma, se o reservatório existia, ou tinha água acumulada, durante a passagem do SRTM, em fevereiro de 2000. Em caso negativo, a estimativa



do volume é relativamente simples, resultando da multiplicação da área inundada pela profundidade média. A área inundada dos 175 mil espelhos d'água artificiais é conhecida, sendo um atributo do shapefile disponibilizado pela SPR. Esta área idealmente é delimitada em imagens de satélite em uma data em que o reservatório esteja cheio¹. Já a profundidade média pode ser obtida da subtração da altitude máxima (já obtida para estimativa da altura) pela altitude média do terreno sob a área inundada. A altitude média do terreno é obtida com uso da operação *Zonal Statistics as a Table* do Arcgis sobre os *pixels* contidos em cada polígono.

28. Em outras palavras, a equação para cálculo do volume de um reservatório seco ou inexistente em fev/2000 é:

$$V_{seco} = A_{max} \cdot (\bar{Z}_{perim} - \bar{Z}_{reserv}) \quad (\text{eq. 2})$$

onde A_{max} é a área inundada no NA máximo (em km²) e \bar{Z}_{reserv} é a altitude média do terreno dentro do reservatório, em m. O volume é dado em hm³.

29. Na situação em que o reservatório existia e tinha água acumulada em fevereiro/2000, a eq. 2 estima somente o volume seco, ou seja, o volume disponível entre o nível d'água naquela data e o NA máximo. Assim, para estimativa do volume total, é necessário calcular o volume molhado, abaixo do nível naquela data. Como o relevo nessa porção é desconhecido, essa porção do volume é calculada, de forma simplificada, como uma pirâmide invertida, conhecendo-se a área da base e a altura. A área da base corresponde à área inundada em fev/2000. E a altura da pirâmide corresponde à diferença de nível entre o NA em fev/2000 e o NA mínimo de jusante, já estimado para cálculo da altura da barragem. A estimativa da área inundada e do NA em fev/2000 serão detalhados mais adiante.

30. Portanto, a estimativa do volume acumulado em fev/2000 é dada por:

$$V_{molhado} = \frac{1}{3} \cdot A_{fev2000} \cdot (Z_{fev2000} - Z_{jus}^{min}) \quad (\text{eq. 2})$$

31. A figura abaixo mostra de forma esquemática a simplificação do cálculo do volume abaixo da área inundada em fev/2000, por meio do volume de uma pirâmide invertida.

¹ Naturalmente, nem sempre isso é possível, como será visto à frente



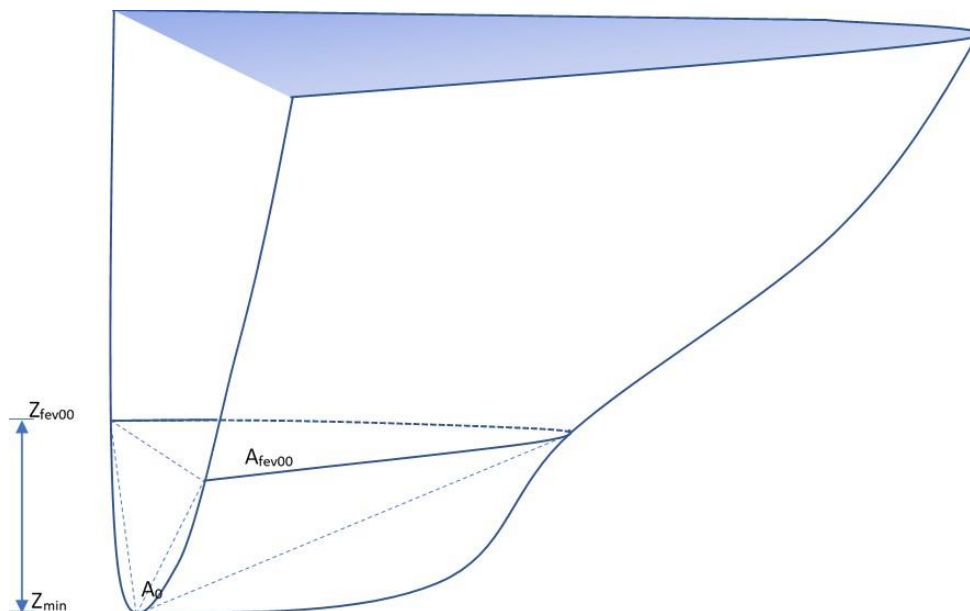


Figura 7. Representação esquemática da estimativa do volume molhado por uma pirâmide invertida

32. O esquema acima mostra que há uma maior incerteza no cálculo dessa porção, por simplificar uma topografia complexa de uma maneira linear. Assim, é de se esperar que haja uma imprecisão maior no cálculo do volume de reservatórios que se encontravam cheios durante a passagem do SRTM. O anexo I apresenta algumas considerações sobre as condições hidrológicas do Brasil naquele período.

33. Portanto, há um equacionamento para estimar o volume do reservatório em qualquer situação, seja ele anterior ou posterior à passagem do SRTM. Resta a questão de como definir, de forma automatizada, qual formulação deve ser usada para cada um dos espelhos d'água.

34. A diferenciação foi obtida a partir do histograma de variação das altitudes dos pixels internos ao espelho d'água. Para isso, foi elaborado um script em ArcPy, que gera esse histograma para um conjunto de espelhos d'água². Na figura abaixo são mostrados o modelo digital de elevação e o respectivo histograma para dois reservatórios, sendo um anterior ao SRTM (o Açude Tejuçoca-CE) e outro posterior (o reservatório Aécio Ferreira Cunha em MG).

² O ArcGis possui uma função similar (Zonal Histogram), porém essa possui algumas limitações de tamanho para o propósito do presente parecer



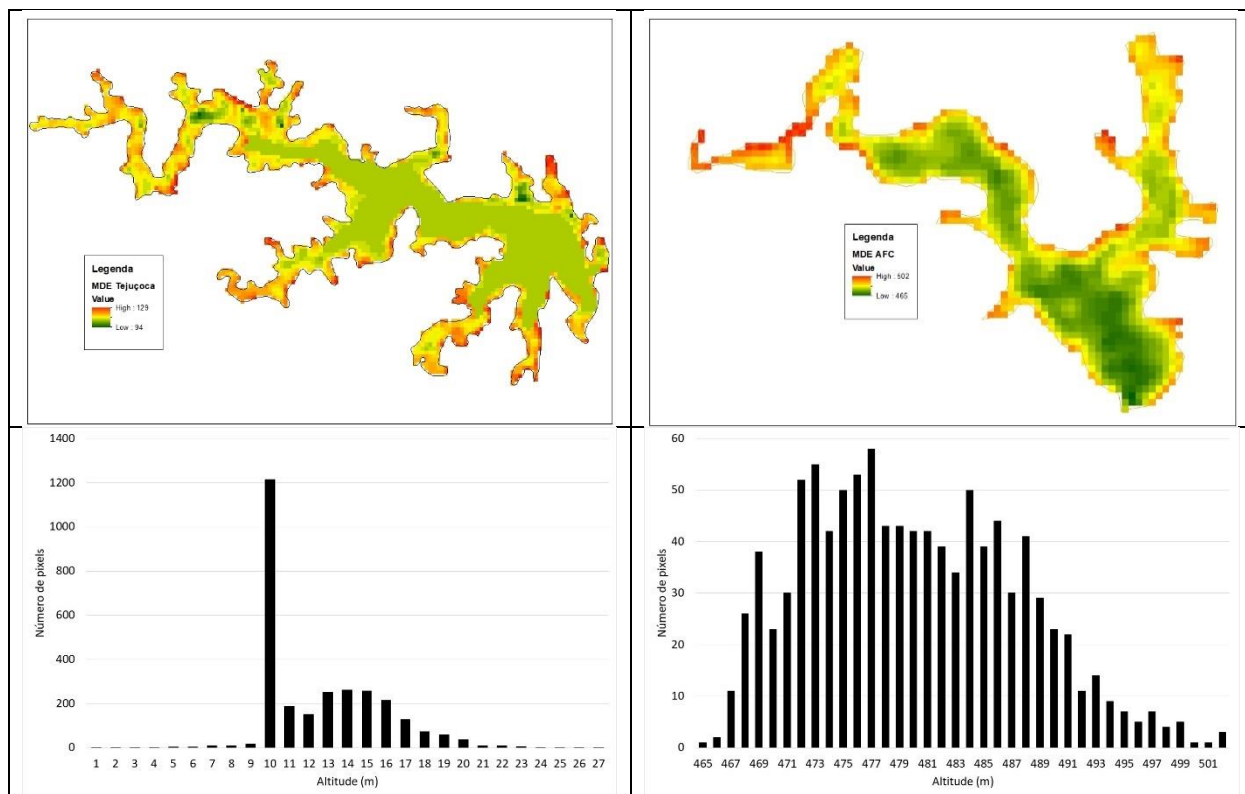


Figura 8. MDE e histograma de altitudes para o Açude Tejuçoca-CE (anterior ao SRTM, esquerda) e para o reservatório Aécio Ferreira Cunha-MG (posterior ao SRTM, direita)

35. A topografia natural em um talvegue é sempre variável, de forma que espera-se uma grande distribuição maior das altitudes em um histograma, como pode ser visto no segundo caso, em que o SRTM mediu efetivamente o relevo natural do terreno. No caso do Açude Tejuçoca, é possível observar, tanto no modelo de elevação quanto no seu histograma, que existe uma altitude que é muito mais frequente do que as demais, o que é indicativo da existência de um nível constante, e portanto de acumulação de água.

36. A partir desse histograma, foi necessário ainda definir um critério numérico para a definição de qual equacionamento a usar. Foram testados vários critérios, e o melhor resultado foi obtido para uma frequência relativa de 10%. Em outras palavras, sempre que a altitude mais frequente do histograma tem uma frequência relativa maior ou igual a 10% do total de pixels, considera-se que havia água acumulada em fev/2000, e o NA naquela data corresponde a essa altitude.

37. Adicionalmente, caso a altitude imediatamente seguinte representasse um percentual até 5% inferior ao do pixel mais frequente, considerou-se que este é o NA correspondente. Isso para levar em conta a imprecisão do SRTM, em que uma variação de 1m na altimetria é possível, bem como para levar em conta fatores como vento ou remanso. Por



exemplo, no caso do açude Tejuçoca, a altitude mais frequente (110m) responde por 42% dos pixels internos ao polígono do seu espelho. A altitude de 111m, por sua vez, representa somente 6%. Nesse caso, o NA em fev/2000 foi arbitrado em 110m. Caso a frequência correspondente à altitude de 111m fosse de 39%, digamos, o NA teria sido corrigido para 111m.

38. Para cálculo da área inundada correspondente, foi calculada a frequência relativa acumulada do histograma, correspondente a todas as cotas inferiores ao NA em fev/2000. No caso do Açude Tejuçoca, as cotas iguais ou inferiores a 110m representam 43% do total de pixels. Portanto, a área inundada nessa data é de 43% da área inundada no NA máximo (disponível na tabela de atributos dos espelhos). Para os fins do presente parecer, esse valor é denominado percentual de inundação.

39. Para cálculo automático dessas etapas (identificação da classe mais frequente do histograma, do percentual de inundação, estimativa do NA e da área inundada em fev/2000), foi elaborado um script em MATLAB. Esse script também define, em função do critério mencionado acima, qual equacionamento deve ser usado, se somente a equação do volume seco ou a soma deste com o volume molhado, e retorna o volume estimado para o reservatório.

40. Todo procedimento foi validado para um conjunto de 3661 espelhos onde se conhece o volume. O resultado geral é mostrado na figura abaixo. Novamente, é incluída uma reta de tendência com intersecção na origem, apenas para dar uma ideia da performance (idealmente essa reta deve ter coeficiente angular igual à unidade).

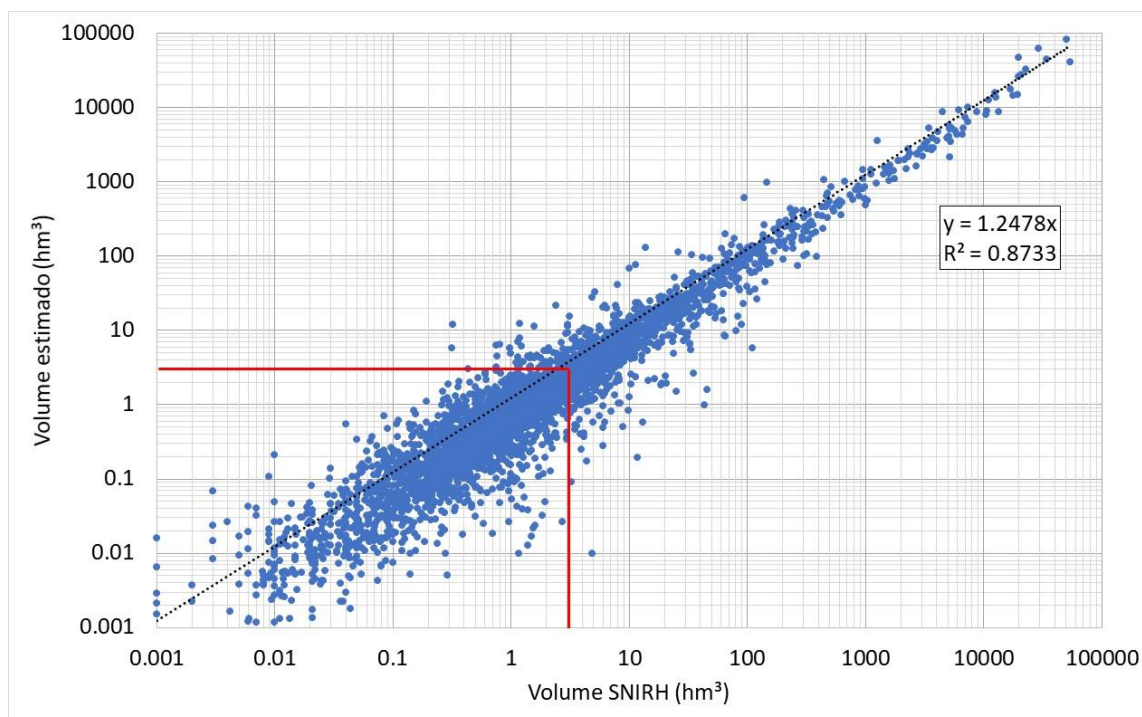


Figura 9. Validação da metodologia de estimativa de volume para 3661 reservatórios



41. Também nesse caso, observam-se resultados bem melhores do que aqueles obtidos com a regressão simples entre área e volume, tendo sido obtido um coeficiente R2 bastante satisfatório. Novamente, o resultado tende a ser melhor quanto maior for o volume do reservatório. Para volumes inferiores a 3 hm³ (destacado no gráfico), a dispersão é mais alta.

42. Chama a atenção que o coeficiente angular da reta de regressão tenha sido maior do que a unidade, o que indica que na média, a metodologia superestima em 25% o volume dos reservatórios. Esse resultado não era esperado inicialmente, uma vez que esperava-se que a simplificação do cálculo do volume molhado pelo tronco de pirâmide resultasse em uma subestimativa, e não o contrário.

43. Uma explicação possível é que tanto o R2 quanto o coeficiente angular são muito influenciados pelos reservatórios com maior volume, sobretudo aqueles com volume superior a 10 mil hm³. É possível que a altura da pirâmide nesses casos tenha sido superestimada (devido à necessidade de buffers mais amplos), compensando a subestimativa devida à simplificação.

44. Como a metodologia será aplicada predominantemente a reservatórios de pequeno e médio porte, optou-se por aferir a validação em um conjunto menor de reservatórios, excluindo-se aqueles com volume superior a 500 hm³ (embora, como dito, a metodologia seja única para qualquer porte). A figura abaixo mostra a validação para este conjunto.

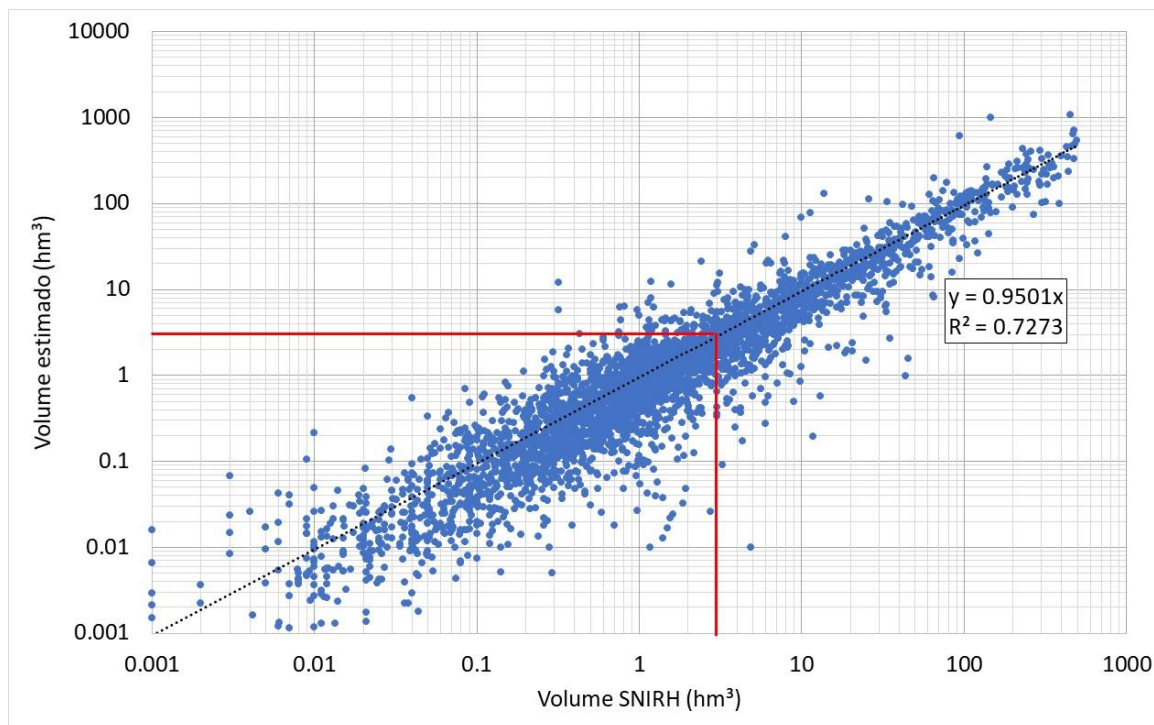


Figura 10. Validação da estimativa considerando somente reservatórios com volume inferior a 500 hm³



45. Ao considerar-se esse conjunto, a performance da estimativa diminui um pouco. Também o coeficiente angular passa a ser inferior à unidade, conforme esperado. A exemplo do caso da altura da barragem, esse coeficiente angular pode ser usado para majorar o resultado final da estimativa, caso desejado.

46. Um comentário deve ser feito a respeito de espelhos muito pequenos, que abrangem um número pequeno de pixels (digamos, menos de 10). Nestes casos, por definição, qualquer classe de altitude terá uma frequência igual ou superior a 10%, mesmo que a frequência absoluta seja de apenas um pixel. Nesses casos, o volume foi calculado diretamente pela fórmula da pirâmide, considerando a área inundada e a altura total, estimada pela eq. (1). Naturalmente, espera-se grande incerteza nesses casos.

Inconsistências que afetam a estimativa

47. Uma inconsistência que impede um melhor desempenho dessa estimativa é o fato de que a área inundada em alguns espelhos d'água não foi delimitada na condição de reservatório cheio, ao passo que o volume e altura informados correspondem ao dado de projeto, referente à capacidade máxima. Como o NA máximo é definido a partir da feição do espelho d'água, a altura acaba sendo subestimada. No caso do volume, essa inconsistência afeta duplamente, tanto pela subestimativa da área inundada quanto do NA máximo.

48. Não foi feita uma pesquisa exaustiva desse tipo de situação, mas observou-se que ocorreu em alguns açudes do semi-árido construídos após 2010, que não haviam vertido nenhuma vez até a data da digitalização de sua área inundada (a maior parte foi digitalizada até o ano de 2017), por exemplo o Açude Jenipapeiro II (ESP_CD 23095), no Ceará, construído em 2012 e que ainda não atingiu sua capacidade máxima. Nesse caso, a altura informada é de 23,2 m, enquanto a estimativa resultou em somente 7,5m.

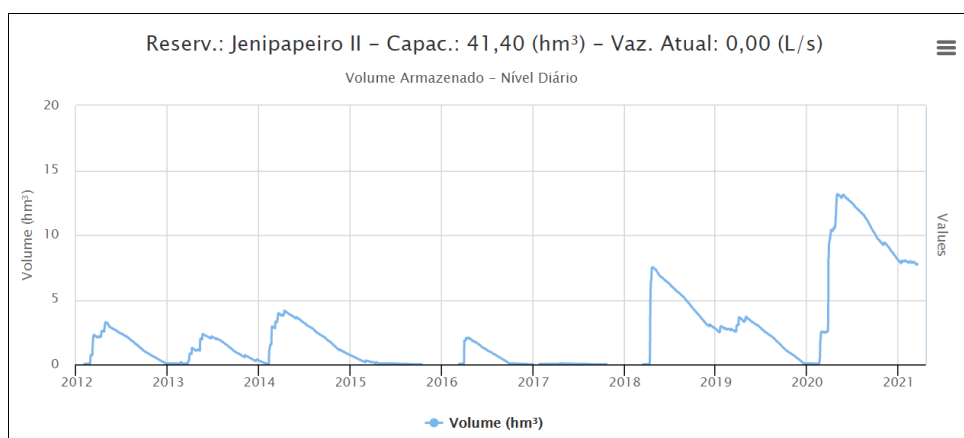


Figura 11. Histórico de níveis do açude Jenipapeiro II, sem ter vertido desde sua inauguração (Fonte: Portal de Monitoramento Hidrológico da COGERH)

49. É o caso, também, do açude Jatobá II (ESP_CD 215651), também no Ceará, inaugurado em 2012 e que veio a verter somente em 2019, posteriormente à digitalização da área inundada. Nesse caso, a altura informada é de 20,7m, enquanto a estimativa resultou em 8,6m.

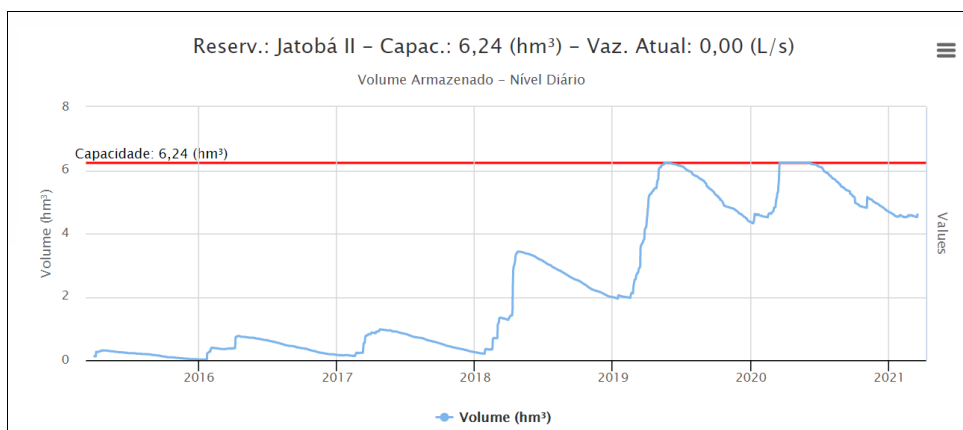


Figura 12. Histórico de níveis do açude Jatobá II

50. Outro espelho d'água em que a metodologia apresentou grande imprecisão devido a esse fator foi o Açude Canoas (ESP_CD 1190) na Paraíba. De acordo com a base de massas d'água, esse reservatório possui capacidade de 45 hm³ e área inundada de 30 hectares, valores que parecem ser incompatíveis entre si, uma vez que implicam em uma profundidade média de 150m, o que aparentemente não é realista. Provavelmente este açude também teve sua bacia hidráulica digitalizada em uma data em que não estava cheio. Em Marques de Melo (2004) consta que a bacia hidráulica desse açude é de 237 hectares, valor mais compatível com o volume informado.

51. Outros reservatórios que sabidamente nunca chegaram a verter são o açude Cedro (CE), ESP_CD 23941 e o açude Riacho do Paulo (BA), ESP_CD 5191. Eventualmente seja necessário, no caso destes, delimitar a bacia hidráulica com base em dados de projeto, ou do cruzamento da cota de vertimento com o modelo digital de elevação, e não com base em imagens de satélite.

52. Esses exemplos realçam a necessidade de que a metodologia seja aplicada a partir de uma base consistida de espelhos d'água, tomando-se o cuidado de certificar-se que todas as áreas inundadas tenham sido delimitadas quando o reservatório estava cheio, ou próximo disso. Do contrário, não se pode esperar que a metodologia apresente resultados satisfatórios.

53. Sugere-se envio do presente parecer para o SPR, para conhecimento e eventual correção das feições destes e de outros espelhos que porventura estejam na mesma situação.



Confiabilidade das estimativas

54. Ao longo do presente parecer, foram feitas diversas considerações sobre a incerteza das estimativas de altura e volume, decorrentes de limitações nos dados de entrada (resolução do MDE, vegetação, delimitação da área inundada), de simplificações da metodologia ou de particularidades no arranjo do reservatório/barragem. Estas incertezas realçam o fato de que as estimativas devem ser encaradas como um número preliminar, apenas para uma priorização inicial, tendo em vista o grande universo de barragens existentes. Ao aferir-se os números corretos no campo, podem-se esperar com frequência diferenças de 30%, e mesmo erros superiores a 100% também deverão ocorrer em casos pontuais.

55. Dentre os fatores de incerteza, dois foram destacados com mais ênfase ao longo do parecer, e podem ser levados em conta de alguma maneira no uso da informação gerada: o tamanho do reservatório, expresso por meio da área inundada, e o percentual de inundação em fev/2000. Quanto maior esse percentual, e menor a área total, mais incerteza é esperada.

56. A partir disso, pode-se criar uma espécie de ábaco de confiabilidade, que leva em conta estes dois fatores. Para exemplificar, a figura abaixo mostra a área inundada máxima (no eixo X) e o percentual de inundação (no eixo Y) para os 3661 espelhos usados na validação. A partir dessa nuvem de pontos, foram arbitradas 3 faixas de confiabilidade da estimativa (alta, média e baixa).

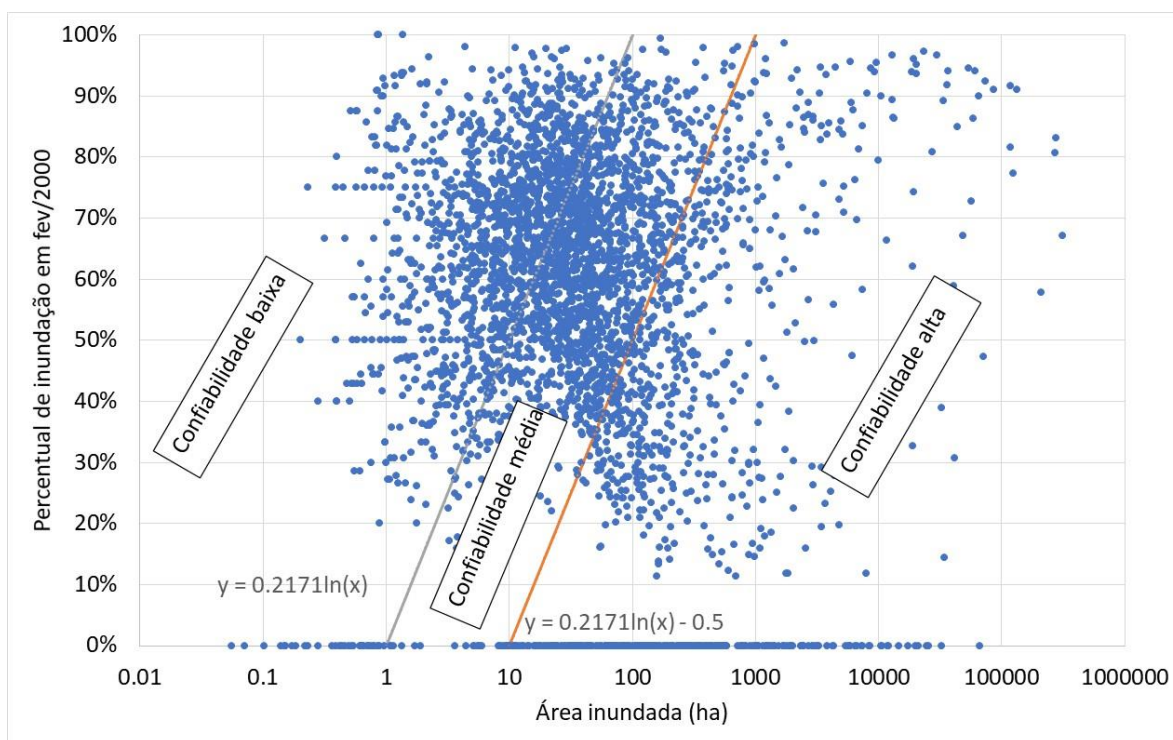


Figura 13. Ábaco de confiabilidade em função de área inundada e percentual de inundação

57. Os limites entre as faixas de confiabilidade foram definidos considerando dois critérios: em primeiro lugar, cada faixa de confiabilidade deveria ter um número similar de pontos, ou ao menos da mesma ordem de grandeza. Além disso, os limites são inclinados, para refletir o fato de que o volume de um espelho com uma dada área inundada pode ser estimado com maior ou menor grau de confiabilidade, dependendo do percentual de inundação.

58. Para uma validação dessas faixas de confiabilidade, o conjunto de dados disponível foi novamente plotado, separando-se os reservatórios de acordo com a classificação de confiabilidade.

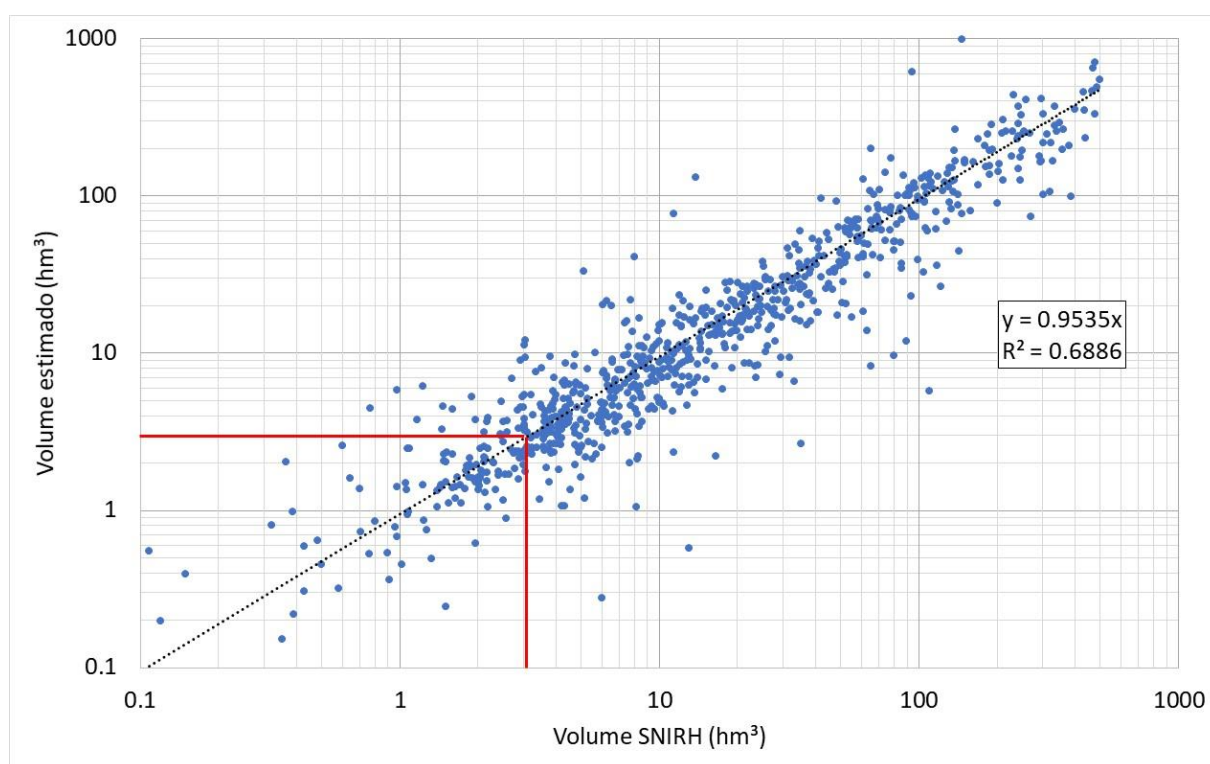


Figura 14. Validação para o conjunto de espelhos considerados de alta confiabilidade



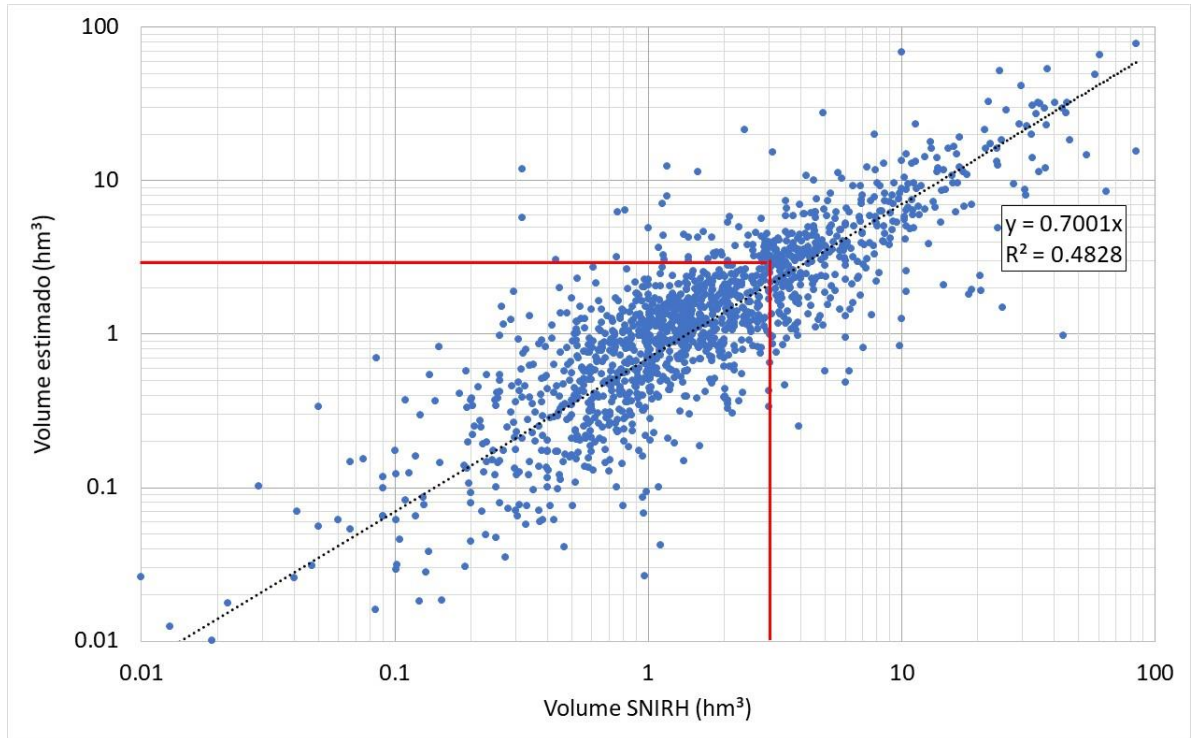


Figura 15. Validação para o conjunto de espelhos considerados de média confiabilidade

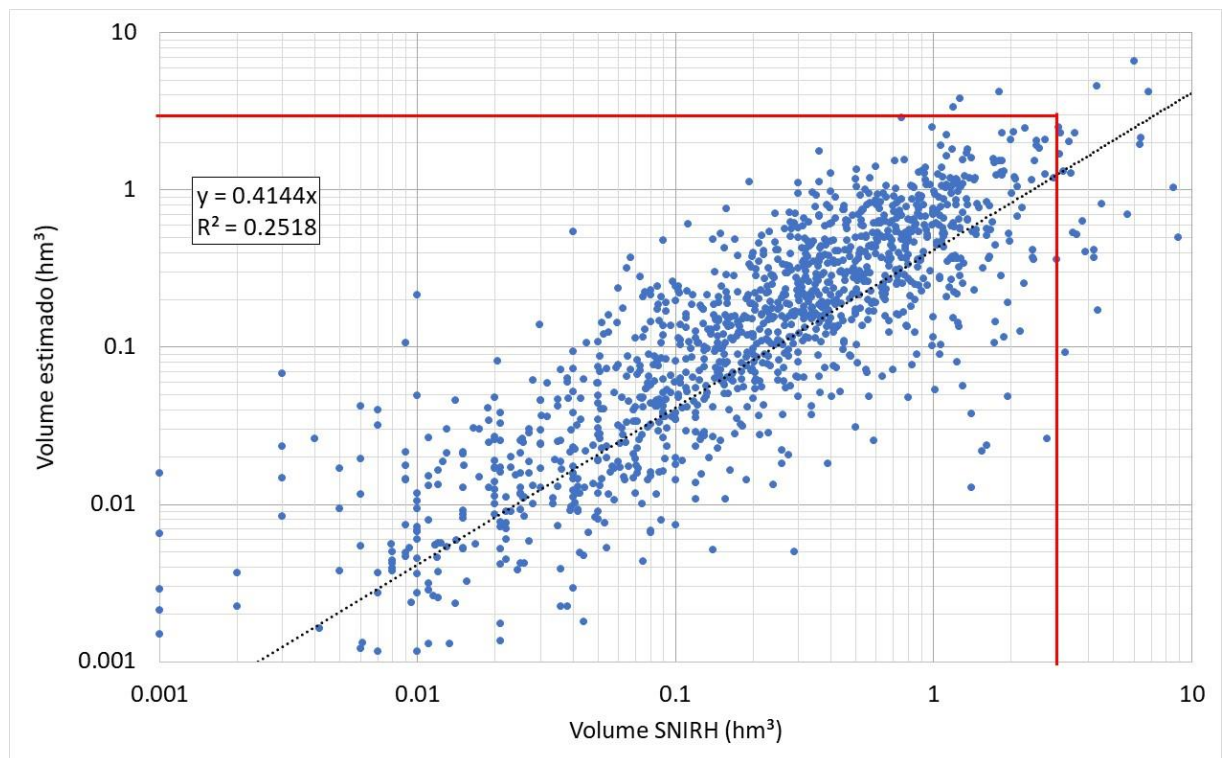


Figura 16. Validação para o conjunto de espelhos considerados de baixa confiabilidade



59. Como se vê, os coeficientes de performance resultantes dessa separação do conjunto de dados coincidem com a classificação quanto à confiabilidade. Assim, considera-se que esta classificação pode ser uma informação adicional útil quando as metodologias aqui apresentadas forem efetivamente aplicadas. Além do número em si, o usuário poderá estimar a confiabilidade da estimativa, e com isso decidir em que medida acredita na informação produzida. Em termos práticos, isso pode significar, por exemplo, a inclusão de barramentos com volume inferior a 3 hm³ em um elenco de empreendimentos a ser vistoriado, caso a confiabilidade da estimativa seja considerada baixa.

Aplicação aos empreendimentos fiscalizados pela ANA

60. Por fim, a metodologia apresentada foi aplicada a um conjunto de 611 espelhos d'água situados em rios de domínio da União, onde a informação de altura e volume ainda são desconhecidos. A maioria é de pequeno porte, uma vez que nos empreendimentos maiores já se possui a informação.

61. Do ponto de vista do volume, nenhum dos empreendimentos seria incluído na lei, uma vez que o maior volume estimado foi de 1,8 hm³. Já do ponto de vista da altura, somente 18 reservatórios foram estimados como tendo mais de 15m. Um enquadramento mais fundamentado só será possível após a classificação quanto ao DPA. Sendo o DPA médio ou Alto, a barragem está submetida à lei, mesmo com altura e volume inferiores a 15m e 3hm³. Cabe ressaltar que não foi aplicada nenhuma majoração aos resultados das equações de altura e volume. Somente três dos espelhos d'água tiveram confiabilidade classificada como alta para a estimativa, enquanto 578 têm baixa confiabilidade.

62. A estimativa é mostrada no anexo 2, em ordem decrescente de altura. Por parcimônia, são mostrados somente os empreendimentos com altura estimada superior a 10m.

Conclusões

63. No presente parecer, é proposta uma metodologia para estimativa de volume e altura de barragens, para fins de preenchimento preliminar do SNISB e priorização do trabalho. Por meio dela, é possível estimar essas características para as 170 mil massas d'água artificiais em que essa informação é desconhecida.

64. A aplicação do método, embora consista em uma estimativa física e direta das características, depende de algumas operações em ambiente de geoprocessamento, bem como de scripts desenvolvidos especificamente para esse fim. Ele foi validado em um conjunto de barragens onde esses dados são conhecidos, e a seguir usado para estimar volume e altura em 611 barragens fiscalizadas pela ANA onde não se conhecia seus valores.

65. Naturalmente, a estimativa possui incertezas, tanto devido ao método em si quanto a inconsistências eventuais nos dados de entrada, o que ressalta a necessidade de aperfeiçoamento destes, sobretudo os polígonos de espelhos d'água, que devem corresponder



à área inundada no NA máximo. As incertezas foram categorizadas de acordo com as características dos reservatórios, de forma que é possível ter uma classificação quanto ao nível de confiabilidade da estimativa que foi feita.

66. Como a fiscalização da maior parte dos 170 mil barramentos com características desconhecidas é de responsabilidade dos estados, sugere-se que esta metodologia seja apresentada a eles, para que se avalie em conjunto a forma de se apropriar dessa metodologia, caso julguem pertinente.

67. Sugere-se ainda envio do presente parecer à SPR para conhecimento e, se for o caso, providências quanto às áreas inundadas dos espelhos d'água mencionados com aparentes inconsistências.

É o parecer técnico.

Brasília, 26 de abril de 2021.

(assinado eletronicamente)

BRUNO COLLISCHONN

Especialista em Recursos Hídricos - Coordenador da Superintendência de Regulação

(assinado eletronicamente)

MÁRCIO BOMFIM

Especialista em Geoprocessamento

De acordo.

(assinado eletronicamente)

PATRICK THOMAS

Superintendente Adjunto de Regulação

(assinado eletronicamente)

RODRIGO FLECHA FERREIRA ALVES

Superintendente de Regulação



Anexo 1 – Considerações sobre as condições hidrológicas do Brasil em fevereiro de 2000

Como mencionado, espera-se uma relação inversa entre a precisão das estimativas aqui feitas com o volume acumulado pelo reservatório em fevereiro de 2000³, quando da passagem do SRTM. Em outras palavras, quanto mais seco o reservatório estava naquela data, maior é a precisão esperada. Por este motivo, é conveniente fazer algumas considerações sobre as condições hidrológicas das diversas regiões brasileiras naquele período, para que o eventual usuário final dessa informação possa avaliar a conveniência de seu uso.

Primeiramente, é pertinente lembrar que, em fevereiro de 2000, o Brasil se encontrava às vésperas do chamado “apagão”, decorrente de uma sequência de anos secos de 1997 em diante. Assim, é de se esperar que reservatórios de regularização plurianual de maior porte, como as grandes UHEs do SIN, se encontrassem relativamente vazios nesse período.

Do ponto de vista sazonal, o mês de fevereiro corresponde ao fim da estação seca no nordeste setentrional, de forma que também nessa região esperam-se reservatórios mais secos, e portanto melhor precisão. Por outro lado, na região sudeste e centro-oeste o período úmido inicia-se mais cedo, por volta de novembro, de forma que possivelmente reservatórios de menor porte nessas regiões encontrem-se mais cheios. É o caso, por exemplo, do polo de irrigação de Cristalina, onde já existiam alguns reservatórios para irrigação naquela época, os quais tem caráter intraanual, e portanto provavelmente estavam cheios nessa data.

Para uma visão geral, foram obtidos os acumulados de chuva estimados pelo satélite TRMM no período de 1º de janeiro a 15 de fevereiro de 2000, com resolução de 0,25º (cerca de 25km).

³ Especificamente, o vôo do SRTM durou 11 dias, sendo que o lançamento foi em 11 de fevereiro de 2000. Assim, não é possível definir a data precisa que o levantamento ocorreu numa área ou país específico, tendo ocorrido nesse período de 11 a 22 de fevereiro.



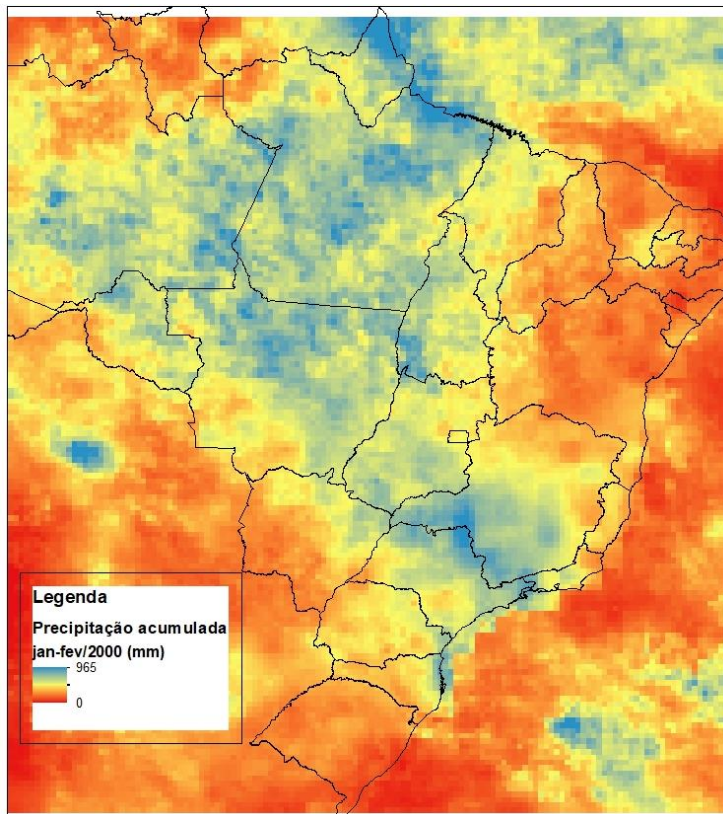


Figura 17. Precipitação acumulada em jan-fev/2000

O mapa mostra que a precipitação foi alta nas regiões norte e centro-oeste no período, de forma que pode-se esperar que os reservatórios de pequeno e médio porte nessas regiões estivessem cheios ou praticamente cheios quando da passagem do SRTM. Também a região do triângulo mineiro e sul de Minas Gerais teve acumulados expressivos. Por outro lado, a precipitação foi baixa em boa parte das regiões sul e nordeste.



Anexo 2 – Volume (hm³) e altura (m) estimados para os empreendimentos fiscalizados pela ANA, em que essa informação é desconhecida, e confiabilidade da estimativa (somente para alturas maiores do que 10m)

esp_cd	Nmoriginal	Altura	Volume	confiabilidade
243797		33,6	0,02	baixa
27472	Açude do Limão	31,8	0,61	alta
119773		30,2	0,07	baixa
29519		28,1	0,25	alta
139967		27,6	0,08	baixa
94861		27,0	0,08	baixa
227769		26,7	0,03	baixa
80306		24,0	0,10	baixa
84486		21,2	0,07	baixa
243563		18,3	0,01	baixa
186489		18,0	0,30	baixa
29371		17,8	0,21	baixa
243518		16,5	0,29	baixa
24550		15,5	0,68	baixa
57710		15,4	0,99	alta
196248		15,4	0,17	baixa
171999		15,1	0,01	baixa
147179		15,0	0,06	baixa
143330		14,6	0,03	baixa
237255		14,5	0,02	baixa
103465		14,0	0,18	baixa
26317		13,9	0,30	baixa
156735		13,9	0,01	baixa
202709		13,9	0,01	baixa
26519		13,5	0,21	média
138439		13,4	0,07	baixa
143743		13,2	0,01	baixa
120768		12,9	0,03	baixa
70517		12,6	0,13	baixa
84955		12,5	0,02	baixa
95003		12,4	0,18	baixa
230942		12,1	0,04	baixa
237597		12,1	0,03	baixa
48877		12,0	0,23	baixa
154464		12,0	0,04	baixa
82491		12,0	0,05	baixa
63844		11,9	0,83	baixa
104840		11,8	0,03	baixa
218719		11,7	0,02	baixa
68264		11,3	0,07	baixa
90103		11,2	0,09	baixa
93232		10,9	0,04	baixa
127461		10,8	0,09	baixa
223691		10,8	0,01	baixa
3353	Açude Fazenda Cajazeira	10,8	1,78	média
151852		10,8	0,02	baixa
150115		10,7	0,03	baixa
27958		10,7	0,32	baixa
224404		10,4	0,28	baixa
178229		10,3	0,01	baixa
115223		10,3	0,03	baixa
164029		10,2	0,03	baixa
130738		10,2	0,07	baixa
225105		10,1	0,03	baixa
60814	Rio Cotaxé	10,1	0,07	baixa
215879		10,1	0,04	baixa
236083		10,1	0,27	média
216631		10,0	0,02	baixa

