

## **DESASTRE EM SÃO SEBASTIÃO-SP: MAPEAMENTO DOS PROCESSOS DE MOVIMENTOS DE MASSA DEFLAGRADOS EM FEVEREIRO DE 2023**

*Rodrigo Augusto Stabile<sup>1</sup>; Pedro de Paiva Youssef<sup>2</sup>; Thales Sehn Körting<sup>3</sup>; Julio Cesar Lana<sup>4</sup>; Laércio Massaru Namikawa<sup>3</sup>; Tullius Dias Nery<sup>1</sup>; Alisson Cleiton de Oliveira<sup>3</sup>; Tèhrrrie König<sup>3</sup>*

**Palavras-Chave** – Desastres Naturais, Mapeamento Geomorfológico, Movimentos de Massa.

### **INTRODUÇÃO**

Os desastres naturais relacionados a eventos de movimentos de massa de grande magnitude têm sido cada vez mais comuns no Brasil. Entre a noite e madrugada dos dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 fortes chuvas atingiram o litoral paulista, especialmente a costa sul do município de São Sebastião, deflagrando movimentos de massa generalizados e inundações, causando impactos severos, entre eles 65 mortes confirmadas e mais de duas mil pessoas desabrigadas ou desalojadas. As áreas mais afetadas foram os morros litorâneos localizados entre a Barra do Una, Jaquehy, Barra do Sahy, Praia da Baleia, Camburi e Boiçucanga, voltadas para sul junto ao Oceano Atlântico. Nestes locais, os pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden registraram quase 600mm precipitados em um período de cerca de 8 horas de chuva mais intensa entre 21 horas do dia 18 e 05 horas do dia 19.

Logo após o desastre, a Defesa Civil Nacional, por meio do Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD, requisitou a ativação da Carta Internacional Espaço e Grandes Desastres (International Charter Space and Major Disasters, [www.disasterscharter.org](http://www.disasterscharter.org)), um acordo de cooperação internacional entre agências espaciais, para disponibilização rápida de imagens de satélite em situações de grandes desastres, para auxiliar na coordenação das ações de resposta. No Brasil, a Carta Internacional é representada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Durante as ativações, as equipes de trabalho são compostas basicamente por voluntários, com diferentes atribuições. No caso do desastre de São Sebastião, houve uma cooperação interinstitucional composta por INPE, CENAD, Cemaden, Serviço Geológico do Brasil – SGB e Centro do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAN. Dentre os produtos e mapas confeccionados no âmbito da ativação nº 803 da Carta Internacional foi produzido um mapeamento dos movimentos de massa, em escala de detalhe, que permitiu reconhecer os principais processos deflagrados, assim como as áreas mais afetadas pelo desastre de fevereiro de 2023.

Neste contexto, considerando a importância do mapeamento dos movimentos de massa para a documentação do fenômeno, bem como para o seu uso posterior em análises de suscetibilidade, perigo ou risco, assim como em estudos sobre seus fatores deflagradores e evolução da paisagem, o objetivo deste artigo é apresentar o mapeamento dos movimentos de massa deflagrados em fevereiro de 2023 em São Sebastião, explorar a metodologia de elaboração dentro do contexto da resposta ao desastre e também como subsídio para pesquisas futuras, tendo em vista a importância de informações tão atuais e detalhadas estarem disponíveis sem tardar à comunidade técnica, acadêmica e todos aqueles que estão envolvidos na gestão de risco a desastres no Brasil.

1) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden - [rodrigo.stabile@cemaden.gov.br](mailto:rodrigo.stabile@cemaden.gov.br); [tullius.nery@cemaden.gov.br](mailto:tullius.nery@cemaden.gov.br)

2) Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD - [pedro.youssef@mdr.gov.br](mailto:pedro.youssef@mdr.gov.br)

3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - [thales.korting@inpe.br](mailto:thales.korting@inpe.br); [laercio.namikawa@inpe.br](mailto:laercio.namikawa@inpe.br); [alisson.oliveira@inpe.br](mailto:alisson.oliveira@inpe.br); [tehrriekonig@gmail.com](mailto:tehrriekonig@gmail.com)

4) Serviço Geológico do Brasil – SGB - [julio.lana@sgb.gov.br](mailto:julio.lana@sgb.gov.br)

## METODOLOGIA

O mapeamento dos movimentos de massa foi realizado por fotointerpretação a partir de imagens do satélite Pleiades (sensor HiRI – High Resolution Imager) registradas entre 23 e 31 de fevereiro de 2023 e com resolução espacial de 0,5 metros. As feições de movimentos de massa foram mapeadas por meio de polígonos no software QGIS 3.16 na escala 1:1.000, portanto um mapeamento em escala de detalhe (Guzzetti et al., 2012). Os processos foram mapeados como uma estrutura contínua, ou seja, desde as áreas de deflagração dos movimentos de massa a montante até a sua deposição, buscando-se os critérios e as chaves de interpretação apropriados para diferenciá-los (Quadro 1). Também foram mapeadas feições de inundação e debris floods (Church, 2010; Church; Jakob, 2020).

Além das chaves de interpretação particulares a cada feição, utilizou-se o Modelo Digital de Terreno JAXA/Alos PALSAR com resolução espacial de 12,5 metros como apoio na identificação dos movimentos de massa através da topografia, representada durante o mapeamento pelas curvas de nível, mas também por parâmetros como o mapa de declividades e a curvatura das vertentes.

Tabela 1 – Feições mapeadas e principais chaves de interpretação

Feição	Imagem (escala 1:3.000)	Forma/Dimensões	Textura/Cor	Localização na paisagem
Escorregamento		Cabeceira suavemente côncava para baixo (coroa), por vezes irregular quando há cicatrizes coalescentes. Contornos laterais também suavemente arredondados. Largura desde poucos metros (~15m) até dezenas de metros no caso de escorregamentos coalescentes.	Lisa com frequentes feições lineares sentido montante-jusante provavelmente relacionadas ao escoamento da água dentro da cicatriz ou ao arraste de partículas maiores quando da deflagração do escorregamento	Vertentes de alta declividade ( $\geq 40\%$ ), comumente atingindo áreas próximas aos interflúvios
Área de arraste ( <i>runout</i> )		Contornos laterais retilíneos com diminuição progressiva da largura da cicatriz a jusante	Lisa com frequentes feições lineares sentido montante-jusante provavelmente relacionadas ao escoamento da água dentro da cicatriz ou ao arraste de partículas maiores quando da deflagração do escorregamento	Vertentes de alta declividade ( $\geq 40\%$ ), a jusante de alguns dos escorregamentos
Canal erodido por fluxo de detritos (ou fluxo de lama)		Contornos estreitos e contínuos com centenas de metros de extensão. Estão a jusante de escorregamentos ou áreas de arraste	Lisa a rugosa com uma linha esbranquiçada centralizada relacionada ao talvegue e/ou ao escoamento perene da drenagem	Vales confinados com declividade moderada a alta ( $\geq 10\%$ )
Outras rupturas		Pequenas feições lineares (ravinas) ou arredondadas (abatimentos)	Rugosa, com um ou mais lineamentos escuros sentido montante-jusante	Taludes antrópicos
Depósito de escorregamento		Contornos aumentam de largura sentido jusante na forma de um lóbulo. Apresentam área muito variada dependendo da magnitude do(s) escorregamento(s) a montante	Lisa ou pouco rugosa, com colorações variadas quando há diferentes materiais depositados (restos de vegetação, troncos de árvore ou matacões)	Terço inferior das vertentes em declividades de até 40%

Depósito em cone associado a fluxo de detritos (ou fluxo de lama)		Contornos na forma de cones/leques com aumento abrupto de largura sentido jusante. Apresenta centenas de metros de extensão e dezenas de metros de largura em suas porções distais.	Rugosa, principalmente nas porções distais e laterais onde se concentram grandes quantidades de troncos de árvores. No centro das feições é comum haver uma mancha clara que se ramifica a jusante relacionada aos principais eixos de passagem do escoamento durante e após o evento	A jusante de vales confinados, no contato com a planície flúvio-marinha, em declividades de até 25% no início da deposição
Depósito grosseiro em canal (fluxo de detritos ou debris flood)		Contornos estreitos (poucos metros de largura) e alongados, não necessariamente contínuos	Granulada e coloração clara, indicando a presença de sedimentos com granulometria grosseira (ex. calhaus ou matacões), podendo ser bem ou mal selecionados	Canais confinados com declividade moderada ( $\geq 5\%$ ou $10\%$ ). Podem estar, mas não necessariamente logo a jusante de canais erodidos por fluxos de detritos
Depósito de lama ou misto (fluxo hiperconcentrado)		Forma larga e amorfa, com dezenas de metros de extensão e largura	Muito lisa, com coloração avermelhada, indicando a deposição predominante de sedimentos finos	Planície flúvio-marinha, a jusante dos cones de fluxo de detritos
Depósito fino (inundação)		Contornos estreitos e contínuos, acompanhando a curvatura da linha de drenagem	Lisa e cor clara quando provavelmente predominam sedimentos arenosos e granulada e cor clara quando provavelmente predominam granulometrias maiores (ex. seixos ou calhaus)	Margens convexas de canais em planícies fluviais meândricas de baixa declividade ( $\leq 5\%$ ou $10\%$ )

## RESULTADOS

O mapeamento dos movimentos de massa deflagrados em fevereiro de 2023 em São Sebastião e outras feições associadas (Figura 1) permitiu um entendimento inicial da atuação dos processos na paisagem, assim como o esboço de uma interpretação da dinâmica envolvida com base nos principais aspectos teóricos dos estudos que pretendem classificar e explicar os movimentos de massa. O mapeamento completo está disponível em diversos formatos no portal de informações geográficas da Defesa Civil Nacional, por meio do endereço <https://geoserver.mdr.gov.br> ("Deslizamentos em São Sebastião - SP - Fevereiro de 2023 - Disasters Charter Activation nº 803").

Os escorregamentos, caracterizados por uma zona de fraqueza (plano de ruptura) entre o material mobilizado e o material subjacente mais estável (Varnes, 1958; 1978; Guidicini; Nieble, 1984), não foram diferenciados quanto à forma do plano de ruptura (escorregamento translacional raso ou escorregamento rotacional). Aparentemente sua magnitude (área) foi maior nas áreas mais atingidas (morro entre a Barra do Sahy e o Juquehy) do que nos locais onde a densidade de escorregamentos foi menor. Isso pode indicar tanto a influência da chuva na magnitude destes processos (Stabile; Colângelo, 2024), como também que a densidade de escorregamentos foi tão grande que muitos deles se coalesceram em grandes rupturas que mobilizaram a cobertura superficial de vertentes inteiras. Alguns destes escorregamentos apresentam uma base mais larga quando junto aos canais de drenagem atingidos por fluxos de detritos, sugerindo um provável papel da remoção dos sedimentos da base das vertentes na sua instabilização. Cabe ressaltar, portanto, que várias das áreas mapeadas como escorregamento podem se tratar, na verdade, de movimentos de massa secundários deflagrados por influência da passagem da instabilização inicial.

Assim como proposto por estudos anteriores (Hack; Goodlett, 1960; Dietrich; Dunne, 1978; Benda; Dunne, 1987; Benda; Cundy, 1990; Fernandes *et al.*, 2001; Stabile *et al.*, 2013) parece evidente a importância das convergências topográficas superficiais e canais de drenagem na deflagração de escorregamentos e sua mobilização em fluxos de detritos. Além da remoção dos sedimentos dos canais pelos fluxos de detritos, eles parecem ter sido alargados e aprofundados durante o processo, propiciando um aumento substancial no volume do movimento de massa desde a origem até a deposição (Hack e Goodlett, 1960; Cruz, 1974; Dietrich; Dunne, 1978; Benda, 1990; Hungr *et al.*, 2001; Stock; Dietrich, 2003).

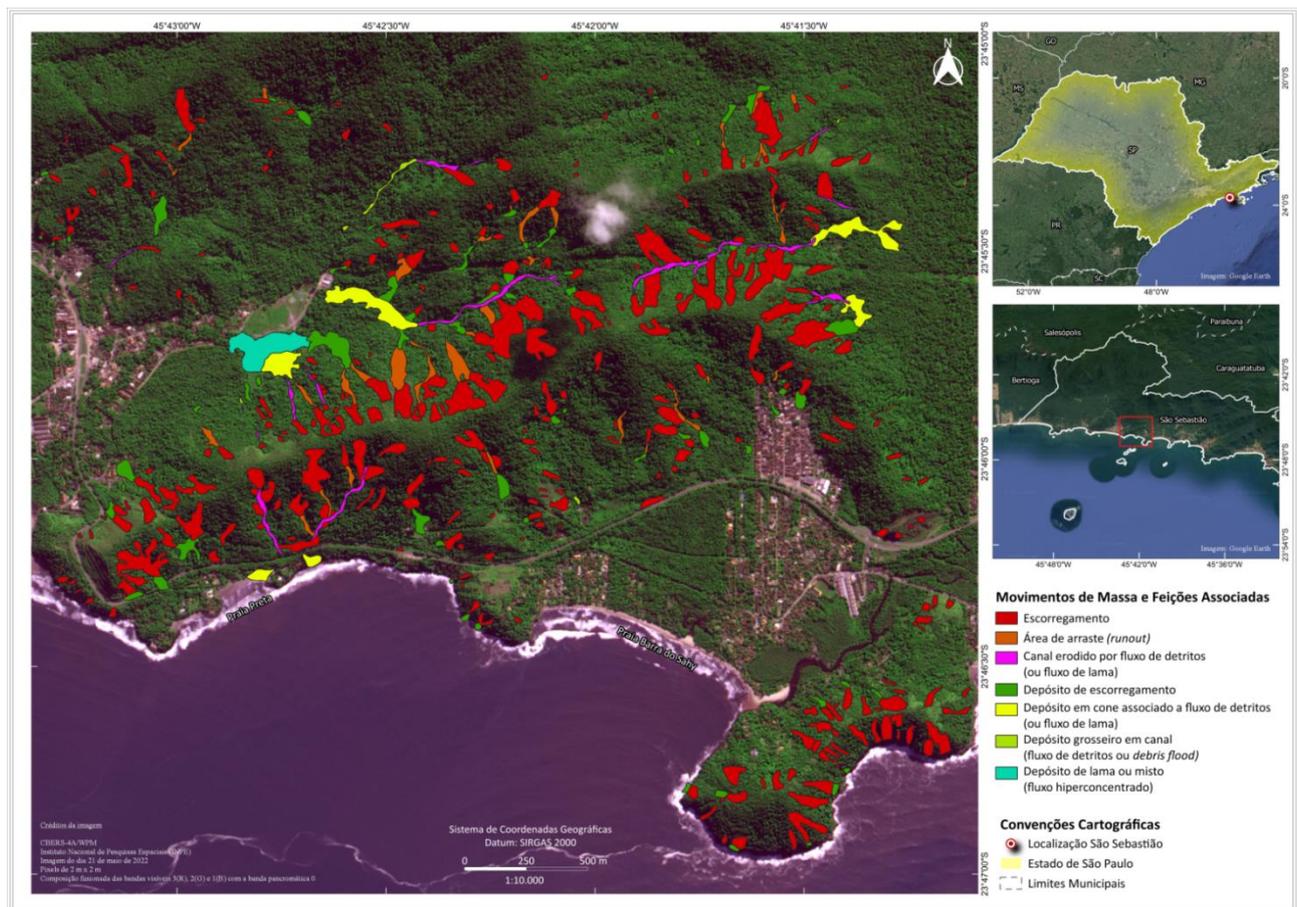


Figura 1 – Mapa dos movimentos de massa e feições associadas deflagrações em fevereiro de 2023 em São Sebastião-SP. Este layout contempla a região do Sahy, a mais afetada pelo desastre. O mapa completo pode ser acessado no link citado no texto.

É notório que a maior parte das grandes feições deposicionais mapeadas não parecem ser compostas de detritos grosseiros, mas sobretudo de sedimentos mais finos, de modo que é plausível que muitos dos processos mapeados como fluxos de detritos na verdade tratem-se de fluxos ou corridas de lama. A diferenciação entre fluxos de lama e fluxos de detritos é normalmente feita por critérios granulométricos específicos (Varnes, 1978; Hungr *et al.*, 2001) e sabe-se que a granulometria pode influenciar a reologia do movimento, sobretudo quanto a sua diluição em água e, portanto, no seu alcance (Costa, 1984; Hungr *et al.*, 2001). Apesar disso, a distinção entre fluxos de lama e fluxos de detritos não é de importância primária no que tange às suas características morfológicas ou comportamentais (Hungr *et al.*, 2001), dificultando sua interpretação apenas pelo sensoriamento remoto. Mesmo assim, no caso de São Sebastião, as áreas distais destes depósitos apresentam textura mais grosseira do que as áreas proximais, não representadas predominantemente por blocos rochosos, mas por troncos de árvores.

Os depósitos grosseiros identificados no mapeamento são muito menores em área e restringem-se à calha de canais confinados e adjacências. Como descrito no método, eles podem estar à jusante de

canais erodidos por fluxos de detritos, mas nem sempre há essa correspondência. Como pela imagem não é possível identificar as características sedimentológicas dos depósitos como gradação, imbricação, concentração de sedimentos entre outros aspectos (Wilford et al, 2004; Church; Jakob, 2020), mantivemos na denominação a possível origem por um processo de *debris flood*, ou seja, inundações ricas em sedimentos que ocorrem em canais íngremes e são capazes de mobilizar os maiores clastos do leito rochoso, com potencial de desestabilizar os leitos e margens (Church, 2010; Church; Jakob, 2020). A coloração e a textura destes depósitos indicam a predominância de sedimentos grosseiros (calhaus e matacões) sugerindo predominância de sedimentos com origem nas vertentes, mas em diversos casos eles se apresentam na imagem bem selecionados fortalecendo a hipótese de sedimentos originados no próprio canal.

Diferentemente daqueles, os depósitos de lama (ou mistos) provavelmente representam uma transição entre os fluxos de detritos e a inundação “comum”, podendo ser avaliados também como depósitos de fluxos hiperconcentrados (Costa, 1988; Pierson, 2005), com alta taxa de sedimentos suspensos. Ao contrário dos depósitos de inundação que têm coloração mais clara devido à alta reflexibilidade dos grãos areno-quartzosos, eles têm coloração mais avermelhada resultante da deposição de sedimentos finos (siltes e argilas). Estes depósitos provavelmente se formaram a partir da diluição do fluxo de detritos pelas águas fluviais (Reneau; Dietrich, 1987; Costa, 1988). Os fluxos hiperconcentrados representam uma situação intermediária entre o fluxo de detritos e o escoamento fluvial, mas apresentam características reológicas, geomorfológicas e sedimentológicas particulares como depósitos pouco espessos e com sedimentos de menor calibre que os fluxos de detritos (Costa, 1988; Pierson, 2005).

Já os depósitos localizados em planícies fluviais, classificados como depósitos finos são supostamente compostos por grãos arenosos que apresentam coloração mais clara na imagem. Contudo, por vezes eles apresentam textura mais grosseira nas margens convexas dos meandros podendo indicar a remobilização de seixos provenientes de depósitos de fundo ou marginais ou até mesmo sugerindo uma transição com um processo de *debris flood*.

## CONCLUSÕES

O mapeamento dos movimentos de massa deflagrados em fevereiro de 2023 em São Sebastião e outras feições associadas (Figura 1) permitiu um entendimento inicial da atuação dos processos na paisagem, assim como o esboço de uma interpretação da dinâmica envolvida com base nos principais aspectos teóricos dos estudos que pretendem classificar e explicar os movimentos de massa.

Finalmente, é fundamental levar em consideração que o mapeamento aqui proposto, assim como sua legenda, pretendeu representar a continuidade dos processos na paisagem. Sabe-se que qualquer classificação acaba por suprimir a complexidade dos processos naturais, mas é necessária para o entendimento dos seus principais aspectos reológicos e dinâmicos. Apenas um reconhecimento detalhado de campo, incluindo a avaliação de aspectos geológicos, geomorfológicos e sedimentológicos pode corroborar as hipóteses e classificações aqui propostas, a fim de subsidiar pesquisas futuras tais como análises de suscetibilidade, perigo ou risco, assim como estudos evolução da paisagem por processos de grande magnitude.

## REFERÊNCIAS

BENDA, L. “*The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon Coast Range, U.S.A*”. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 15, p. 457–466, 1990.

CHURCH, M. “*Mountains and montane channels.*” In: BURT, T.; ALLISON, R. (Eds.). *Sediment cascades: an integrated approach*. John Wiley & Sons, 2010. p. 17-53.

CHURCH, M.; JAKOB, M. “*What is a debris flood?*” *Water Resources Research*, v. 56, n. 8, 2020.

- COSTA, J. E. “*Physical geomorphology of debris flows.*” In: COSTA, J. E.; FLEISHER, P. J. (Eds.). *Developments and applications of geomorphology.* Berlin: Springer-Verlag, 1984. p. 268–317.
- COSTA, J. E. “*Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows.*” In: BAKER, V. R.; KOCHER, R. C.; PATTON, P. C. (Eds.). *Flood geomorphology.* New York: John Wiley & Sons, 1988. p. 113–122.
- DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. “*Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain.*” *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. Suppl. 29, p. 191–206, 1978.
- FERNANDES, N. F. et al. “*Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis.*” *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 2, n. 1, p. 51–71, 2001.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. “*Estabilidade de taludes naturais e de escavação*”. São Paulo: Editora da USP, 1984.
- HACK, J. T.; GOODLETT, J. C. “*Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians*”. *Geological Survey Professional Paper*, v. 347, p. 77, 1960.
- HUNGR, O. et al. “*A review of the classification of landslides of the flow type*”. *Environmental & Engineering Geoscience*, v. 7, n. 3, p. 221–238, 2001.
- PIERSON, T. C. “*Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds*”. Vancouver (WA): United States Geological Survey (USGS), 2005.
- RENEAU, S. L.; DIETRICH, W. E. “*The importance of hollows in debris flow studies; Examples from Marin County, California*”. In: COSTA, J. E.; WIECZOREK, G. F. (Eds.). *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation.* Boulder (CO): Geological Society of America, 1987. v. VIIp. 165–180.
- STABILE, R. A. et al. “*Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos*”. 14o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Anais...Rio de Janeiro (RJ): Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE), 2013
- STABILE, R. A. ; COLÂNGELO A. C. “*Environmental controls on landslide size distribution in the Paraitinga River basin, SE Brazil*”. *Landslides* 21:371-378, 2024.
- STOCK, J. D.; DIETRICH, W. E. “*Valley incision by debris flows: evidence of a topographic signature*”. *Water Resources Research*, v. 39, n. 4, p. 1089–1114, 2003.
- VARNES, D. J. “*Landslide types and processes*”. In: ECKEL, E. B. (Ed.). *Landslides and engineering practice.* Washington: US National Research Council, 1958. p. 20–47.
- VARNES, D. J. “*Slope movement types and processes.*” In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Eds.). *Landslides: analysis and control.* Washington: Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, 1978. p. 11–33.
- WILFORD, D. et al. “*Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics*”. *Landslides*, v. 1, p. 61-66, 2004.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao “The International Charter”, assim como às agências espaciais e operadores de sistemas espaciais ao redor do mundo que contribuem com a iniciativa.