

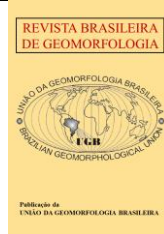


<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, n° 3 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2103>



Artigo de Pesquisa

As geoformas e a estrutura vertical das paisagens da Ilha da Trindade, Atlântico Sul

The landforms and vertical landscape structure of Trindade island, South Atlantic

Dyana Caroline Freitas¹, Fábio Soares de Oliveira², Caroline Delpupo Souza³, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer⁴, Rafael Gomes Siqueira⁵ e Igor Alex Santos Soares⁶

¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Brasil. E-mail. geodyana@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1052-5954>

² Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, Belo Horizonte, Brasil. E-mail. fabiosolos@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-7609>

³ Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Coordenadoria de Geografia, Ouro Preto, Brasil. E-mail. caroline.delpupo@ifmg.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5055-3963>

⁴ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Viçosa, Brasil. E-mail. carlos.schaefer@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7060-1598>

⁵ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Viçosa, Brasil. E-mail. rafael.geo.siqueira@gmail.com

⁶ Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Brasil. E-mail. igoralex_@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2779-136X>

Recebido: 03/2021; Aceito: 03/2022; Publicado: 01/07/2022

Resumo: Este estudo objetivou ampliar os conhecimentos sobre o relevo da Ilha da Trindade através da identificação, mapeamento e caracterização das geoformas, e da sua relação com o solo, substrato geológico e vegetação. Foi realizado um levantamento aerofotogramétrico com drone, confecção de mapas temáticos (declividade, curvatura vertical, etc), delimitação das geoformas nas imagens, coleta de pontos de controle em campo, classificação automatizada do relevo por *machine learning* e confecção de perfis geoecológicos. Foram identificadas 8 geoformas, sendo 4 erosivas (vertentes, cristas, platôs e necks) e 4 agradacionais (rampas em talus, cones aluviais, praias e dunas / lençóis de areia). Essas geoformas estão inseridas em quatro compartimentos (cimeira, transição, costeiro e cratera) e que, por sua vez, dividem a Ilha em duas faces, oriental e ocidental. Nas geoformas ocorrem feições lineares como escarpas, paleofalésias, ravinas e sulcos e canais de drenagem. As vertentes representam as geoformas de maior expressão espacial, ocupando mais de 60% da Ilha, e reiteram o importante papel da erosão na evolução do relevo de Trindade. A estrutura vertical das paisagens revela um controle dos platôs no desenvolvimento de solos intemperizados, e da erosão nas vertentes como condutores da formação de solos jovens e estabelecimento da vegetação herbácea.

Palavras-chave: Relevo insular; Mapeamento Geomorfológico; Perfis Geoecológicos; Pedogeomorfologia; Unidades de Paisagem.

Abstract: This study aimed to expand knowledge about the relief of Trindade island through the identification, mapping, and characterization of landforms, and their relationship with the soil, geological substrate and vegetation. An aerial photographic survey with drone was carried out; preparation of thematic maps (slope, vertical curvature, etc.), delimitation of landforms in the images, checkpoint control in the field, automated classification of the relief by machine learning technique, and

preparation of geocological profiles. Eight landforms were identified, being 4 erosive (slopes, ridges, plateaus, and necks) and 4 depositional/constructional (ramps in talus, alluvial cones, beaches and dunes / sand sheets). These landforms are inserted in four geomorphological compartments (summit, transition, coastal and crater), which, in turn, divide the island into two faces, eastern and western. In landforms there are linear features such as escarpments, paleovalleys, ravines and drainage channels. The slopes represent the landform with the greatest spatial expression, occupying 60% of the island, and reinforce the importance of erosion in the evolution of Trindade relief. The vertical structure of the landscapes reveals a control of the plateaus and alluvial fans in the development of weathered soils, and erosion in the slopes as drivers of the formation of young soils and herbaceous vegetation.

Keywords: Island relief; Geomorphological Mapping; Geocological profiles; Soil-geomorphology; Landscape Units.

1. Introdução

Trindade é uma ilha vulcânica no Atlântico Sul com idade máxima estimada de 3,9 Ma (PIRES et al., 2016), e representa o cimo erodido de uma montanha há mais de 5.000 m de profundidade. Pertence ao lineamento “Vitória-Trindade”, uma sequência de edifícios vulcânicos originados pela atividade extrusiva de um *hot-spot* (ALMEIDA, 1992; DUARTE; HORTA, 2012; GASPARINI, 2004). A Ilha constitui o vulcanismo mais recente do país, tendo sua última atividade vulcânica ocorrida há 0,25 Ma (PIRES et al. 2016). Trata-se do único local no território brasileiro onde ainda se reconhece parte de um cone vulcânico – a cratera do Vulcão do Paredão (ALMEIDA, 1961; 1992).

São muitos os fatores ambientais exóticos e exclusivos à Ilha da Trindade. Sua geologia é basicamente constituída por rochas vulcânicas alcalinas (ALMEIDA, 1961). Na Ilha ocorrem solos endêmicos (MACHADO et al., 2018), animais ameaçados de extinção, uma floresta de samambaias gigantes, e um relevo extremamente variado, com grande diversidade de paisagens numa área relativamente pequena (aproximadamente 13,6 km²). Trindade é a única ilha oceânica brasileira que possui drenagens e nascentes perenes de água doce (MARQUES et al., 2019). A conjugação destes fatores torna a Ilha um laboratório natural às pesquisas científicas de diversas áreas do conhecimento.

A geologia de Trindade foi inicialmente detalhada por Almeida (1961), e posteriormente estudada por Pires et al. (2013; 2016), Calliari et al. (2016) Biancini et al. (2016) Hackspacker et al. (2017) e Pasqualon et al. (2019; 2020), entre outros. Os solos de Trindade foram pioneiramente investigados por Velthein (1950), mas seu efetivo conhecimento foi ampliado a partir dos estudos de Clemente (2006), Firme Sá (2010), Machado (2016) e Mateus (2020). A vegetação, investigada por naturalista nos séculos XVIII e XIX (SILVA; ALVES, 2017; 2011), pôde ser mais bem conhecida a partir dos trabalhos conduzidos pelo Museu Nacional, destacando-se o ensaio geobotânico publicado por Alves (1998). De todos os componentes físico-naturais, o relevo é aquele com menor detalhamento. Almeida (1961) apresentou as primeiras considerações sobre a evolução do relevo e seus fatores controladores. Schaefer e Oliveira (2015) dividiram a ilha em sete domínios geomorfológicos. Angulo et al. (2017; 2018) ampliaram o conhecimento sobre a porção costeira e as variações do nível do mar durante o Quaternário. Marques et al. (2017) apresentou a caracterização da rede hidrográfica da Ilha. Nogueira et al. (2020) apresentaram um estudo morfológico, ampliando o conhecimento das formas através de seus parâmetros morfométricos.

Motivados pela necessidade de melhor compreender o relevo e sua relação com a evolução das paisagens da Ilha da Trindade, este estudo objetivou reconhecer e mapear as formas de relevo ou o modelado, aqui denominadas geoformas, caracterizando-as e analisando sua relação com outros componentes físico-naturais, como solo, substrato geológico e vegetação.

2. Área de Estudo

A Ilha de Trindade situa-se na extremidade oriental do território brasileiro, na latitude de Vitória – ES (20° 30'S e 29° 18'WG), a aproximadamente 1.140 km da costa (Figura 1).

Geologicamente, Trindade é constituída por rochas vulcânicas subsaturadas em sílica e acentuadamente sódico-alcálicas, incluindo fonolitos, olivina-nefelinitos (ankaratritos), tanbuschito, e diversas outras, referentes a cinco eventos vulcânicos: (i) Complexo Trindade; (ii) Sequência Desejado; (iii) Formação Morro Vermelho; (iv) Formação Valado; e (v) Vulcão do Paredão (ALMEIDA, 1961; PIRES et al., 2016). Além disso, Trindade apresenta ao longo da zona costeira sedimentos marinhos carbonáticos biogênicos (ALMEIDA, 1961; ANGULO et al., 2017), provenientes da fragmentação e remobilização de plataformas carbonáticas, e que, junto com sedimentos não biogênicos das rochas locais, compõem os depósitos holocênicos eólicos, de praias, aluviais e de encostas (CASTRO, 2010).

Pedologicamente, ocorrem Neossolos, Cambissolos e Organossolos (FIRME SÁ, 2010; CLEMENTE et al., 2011). Os Neossolos são predominante e ocupam 55 % do território, os Cambissolos 30% e os Organossolos aproximadamente 10%. A presença de solos ornitogênicos destaca o papel da avifauna no enriquecimento dos solos em fósforo pelo acúmulo de excrementos nas áreas de nidificação e seu entorno (MACHADO, 2016).

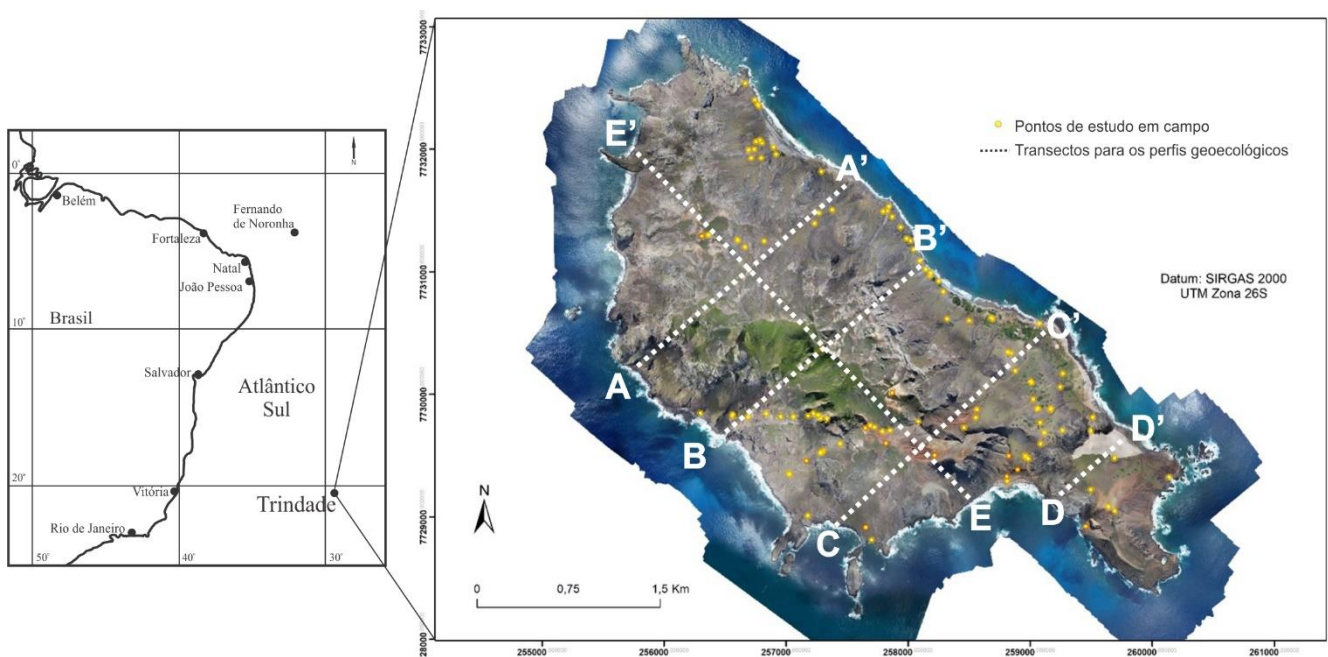


Figura 1. Localização da Ilha da Trindade, pontos de estudo em campo e transectos delimitados para elaboração dos perfis geoecológicos.

Do ponto de vista climático, Trindade apresenta clima oceânico tropical, amenizado por ventos alísios do Leste e Sudeste. A temperatura média anual é de 25 °C. As correntes marinhas que circundam a Ilha advêm da Corrente do Brasil, caracterizada pela alta salinidade e temperatura. Frentes frias da Antártica invadem a região periodicamente, mudando abruptamente as condições marinhas locais entre abril e outubro (GASPARINI, 2004).

A vegetação em Trindade inclui diversos tipos de briófitas e plantas vasculares. Cerca de 200 espécies ocorrem na Ilha, incluindo exóticas e nativas, sendo que dessas 15 são consideradas endêmicas (SILVA; ALVES, 2017). A vegetação de maior destaque é a floresta de samambaias gigantes (*Cyathea copelandii*), sendo que a espécie predominante no passado, a *Colubrina glandulosa*, que teria coberto cerca de 80% da ilha, teria sido devastada pela introdução de cabras (ALVES, 1998).

2. Materiais e Métodos

A realização deste estudo envolveu procedimentos metodológicos organizados na sequência gabinete – campo – gabinete. Uma primeira compartimentação do relevo foi realizada com bases cartográficas e de dados secundários (ALMEIDA, 1961; SCHAEFER; OLIVEIRA, 2015). Essa compartimentação contemplou os táxons 1 e 2 da proposta de Ross (1992). Após, foram realizados trabalhos de campo para o reconhecimento da área, levantamentos de fotografias aéreas e delimitação das unidades ou compartimentos morfológicos (táxon 3) e geoformas (táxon 4).

2.2.1 Bases cartográficas

Dentre as bases secundárias utilizadas, destacam-se: mapa geológico na escala 1:10.000 (ALMEIDA, 1961), refinado por Patrício (2012); mapa de solos (FIRME SÁ, 2010) na escala de 1:20.000 e mapas da vegetação (ALVES, 1998) na escala 1:20.000. Especificamente para este estudo, foi realizado o levantamento de imagens com resolução espacial de 50 cm, obtidas por sobrevoos com drone da marca DJI, modelo Phantom 4 Pro. A partir de um conjunto de 4396 imagens, foi elaborado um mosaico de toda a Ilha e através da extração de uma nuvem de 116.370.866 pontos foi confeccionado um mapa planialtimétrico com curvas de nível com equidistância de 2 m.

2.2.2 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo, que somaram 70 dias, envolveram o levantamento aerofotogramétrico e a identificação e catalogação das geoformas. A Ilha foi observada do seu ponto mais alto (600 m), e foram feitas todas as trilhas acessíveis para reconhecimento das geoformas. Também foi realizada uma expedição de bote ao redor da Ilha, o que possibilitou a observação de locais inacessíveis por trilha. Pontos de controle das geoformas foram coletadas pelo GPS Garmin (Figura 1), sendo também fotografadas e descritas. O trabalho de campo foi realizado com o apoio do Programa PROTRINDADE, sendo toda organização logística da Marinha do Brasil.

2.2.3 Delimitação e caracterização das geoformas

Foi realizada a compilação dos dados de campo e a plotagem dos pontos nas imagens. A partir da base planialtimétrica foi gerado o MDE (Modelo Digital de Elevação) hidrologicamente consistente e uma série de produtos cartográficos, como sistematizado na Tabela 1.

Tabela 2 – Produtos cartográficos e procedimentos para sua obtenção.

Produto	Procedimento	Input	Geoprocessamento
Curvas de nível	Extraídas da imagem de drone em alta resolução	Ortomosaico	<i>Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Contour</i>
MDE	Interpolação dos pontos cotados e curvas de nível, formando uma malha regular; Criação de uma Rede Triangular Irregular (TIN) e definição de classes de altitude;	Curvas de nível	<i>3d Analyst Tools > Data Management > TIN > Create Tin</i>
Rede de drenagem	Delimitação dos pontos mínimos em seções transversais alinhados em um única direção; os divisores de água são definidos pela relação inversa (pontos máximos alinhados entre as drenagens)	MDE	<i>Spatial Analyst > Hidrology > Flow Direction; Spatial Analyst > Hidrology > Flow Accumulation</i>
Declividade	Derivada do MDE através da elevação em relação à distância entre dois pontos	MDE	<i>3d Analyst Tools > Raster Surface > Slope</i>
Orientação de vertentes	Extração da direção dos fluxos de encosta considerando a direção do vetor correspondente ao gradiente de declividade	<i>Flow Direction; Slope;</i>	<i>Spatial Analyst > Surface > Aspect</i>
Curvaturas	Combinação do gradiente de declividade com a orientação de vertentes, gerando dois produtos: curvatura horizontal e vertical; classificadas em côncava, retilínea e horizontal	MDE	<i>Spatial Analyst > Surface > Curvature</i>
Mapa manual	Vetorização manual das unidades de relevo (ROSS, 1992) através da interpretação da imagem de drone e dos produtos cartográficos	Vetorização	<i>Editor > Start Editing > Create Features</i>
Estatísticas	Cálculo da média, desvio padrão, mínimos e máximos dos valores das morfometrias nas unidades de relevo	Raster (morfometria) > polígono (geoformas)	<i>Spatial Analyst > Zonal > Zonal Statistics as Table</i>

A delimitação das geoformas seguiu os seguintes procedimentos: 1) reconhecimento visual das geoformas nas imagens de drone a partir dos pontos de controle de campo; 2) reconhecimento visual no MDE; 3) delimitação manual das geoformas nas imagens de drone; 4) cruzamento das delimitações com os mapas temáticos de declividade, limite entre bacias, rede de drenagem e sombreamento do relevo para refinamento dos limites; 5) cruzamento da geoforma vertentes com os mapas de curvatura horizontal para delimitação dos tipos de vertentes (convexas, côncavas e retilíneas – táxon 5); 6) delimitação das feições lineares (táxon 6); 7) atribuição de cores e montagem da legenda.

O mapa convencional produzido manualmente foi utilizado como referência para produção de um segundo mapa, aqui denominado “mapa automatizado”, utilizando as técnicas de *machine learning*. O processamento foi realizado com o pacote Caret (KUHN, 2008) no software R (R Core Team, 2021). Foi utilizado o algoritmo Random Forest, que consiste em um modelo baseado em “*ensemble learning*” (BREIMAN, 2001). Para tal, cada árvore é treinada a partir da técnica conhecida como *bagging*, onde subconjuntos de amostras do conjunto de treinamento original são selecionados aleatoriamente. O resultado do algoritmo é o valor predito pela maioria das árvores. O *Random Forest* é contra ruídos e *overfitting*, e tem sido utilizado com sucesso para a classificação automática de geoformas em diferentes partes do mundo (VERONESI; HURNI, 2014; ZHAO et al., 2017).

Para treinamento e validação do algoritmo, foram coletadas 945 amostras a partir da amostragem aleatória estratificada. As amostras foram divididas aleatoriamente em conjuntos de treinamento e validação em uma proporção 3:1, usando a função *createDataPartition*. Dessa forma, 75% das amostras foram incluídas no conjunto de treinamento e 25% no conjunto de validação. Para predição, foram utilizados um conjunto de variáveis geomorfométricas derivadas do MDE, utilizando o pacote RSAGA (BRENNING, 2008). Os solos de Trindade foram adicionados como variáveis categóricas, totalizando 61 covariáveis preditoras. Tais variáveis foram mineradas e um conjunto ideal de covariáveis foi selecionado a partir da remoção de covariáveis com alto grau de correlação (>95%, função *findcorrelation*) e a partir da seleção executada pelo algoritmo *Recursive Feature Elimination* (RFE), de acordo com metodologia utilizada por Gomes et al. (2019). A validação da classificação foi feita utilizando os índices Kappa e Acurácia. Para minimização dos efeitos da variabilidade amostral, a classificação automática foi rodada 100 vezes separando aleatoriamente as amostras de treinamento e validação e o mapa geomorfológico predito final foi obtido com os valores da moda.

2.2.4 Interações geoformas-paisagem

Para compreender o papel das geoformas identificadas na evolução das paisagens da Ilha da Trindade, optou-se pela confecção de perfis geocológicos (MONTEIRO, 2001), considerando serem eles ferramentas capazes de revelar a estrutura vertical das paisagens (BEROUTCHACHVILI; RADVANYI 1978; MANOSSO, 2009; RAMOS et al., 2019). Foi considerada a interação das geoformas com o substrato geológico, solos e vegetação. Apesar da importância do clima, os dados existentes para Trindade são captados em apenas uma estação, sendo insuficientes para o detalhamento das variações dos elementos climáticos em diferentes partes da Ilha. A escolha dos transectos para a confecção dos perfis é apresentada na Figura 1. A interpolação entre as variáveis foi realizada no software Arcgis e o refinamento estético no software CorelDraw. Para evitar a confusão de cores semelhantes, não foram utilizadas as cores padrões propostas em manuais técnicos para cada componente (rochas, solo, vegetação), mas uma paleta de cores qualitativas com aplicação cartográfica disponível no ColorBrewer 2.0.

3. Resultados

3.1 O relevo da Ilha da Trindade

A taxonomia do relevo da Ilha da Trindade é apresentada na Figura 2, e os mapas gerados a partir da delimitação manual e automatizada, respectivamente, na Figura 3(a) e 3(b). A quantificação da área ocupada pelas geoformas e dos atributos morfométricos altitude e declividade é apresentada nas Tabelas Suplementares 1 (delimitação manual) e 2 (delimitação automatizada).

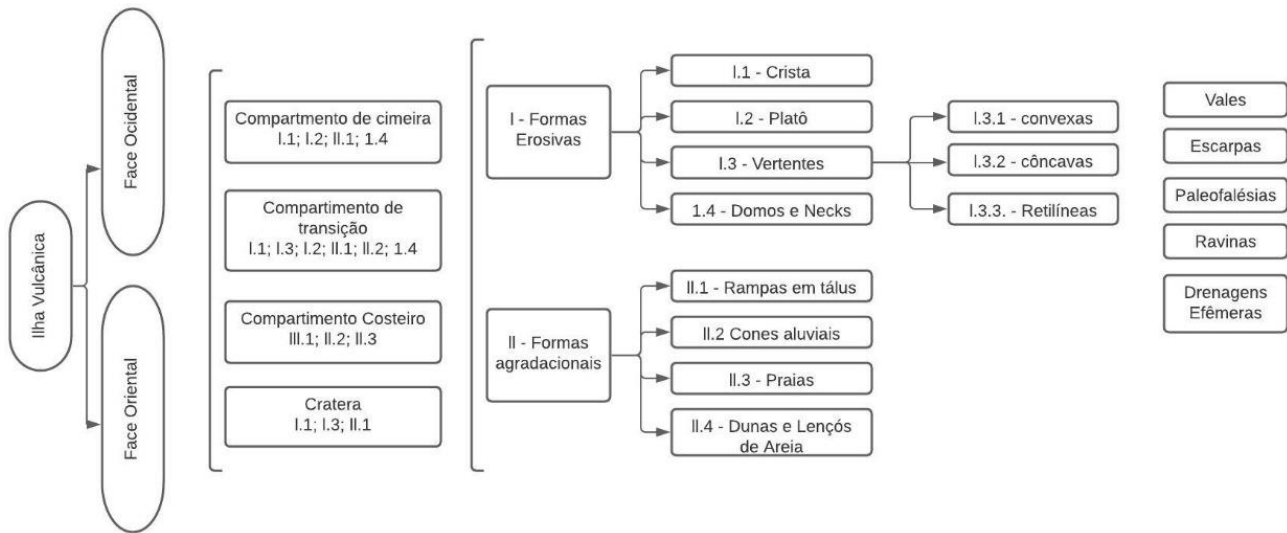


Figura 2. Fluxograma da organização taxonômica do relevo na Ilha da Trindade, Atlântico Sul.

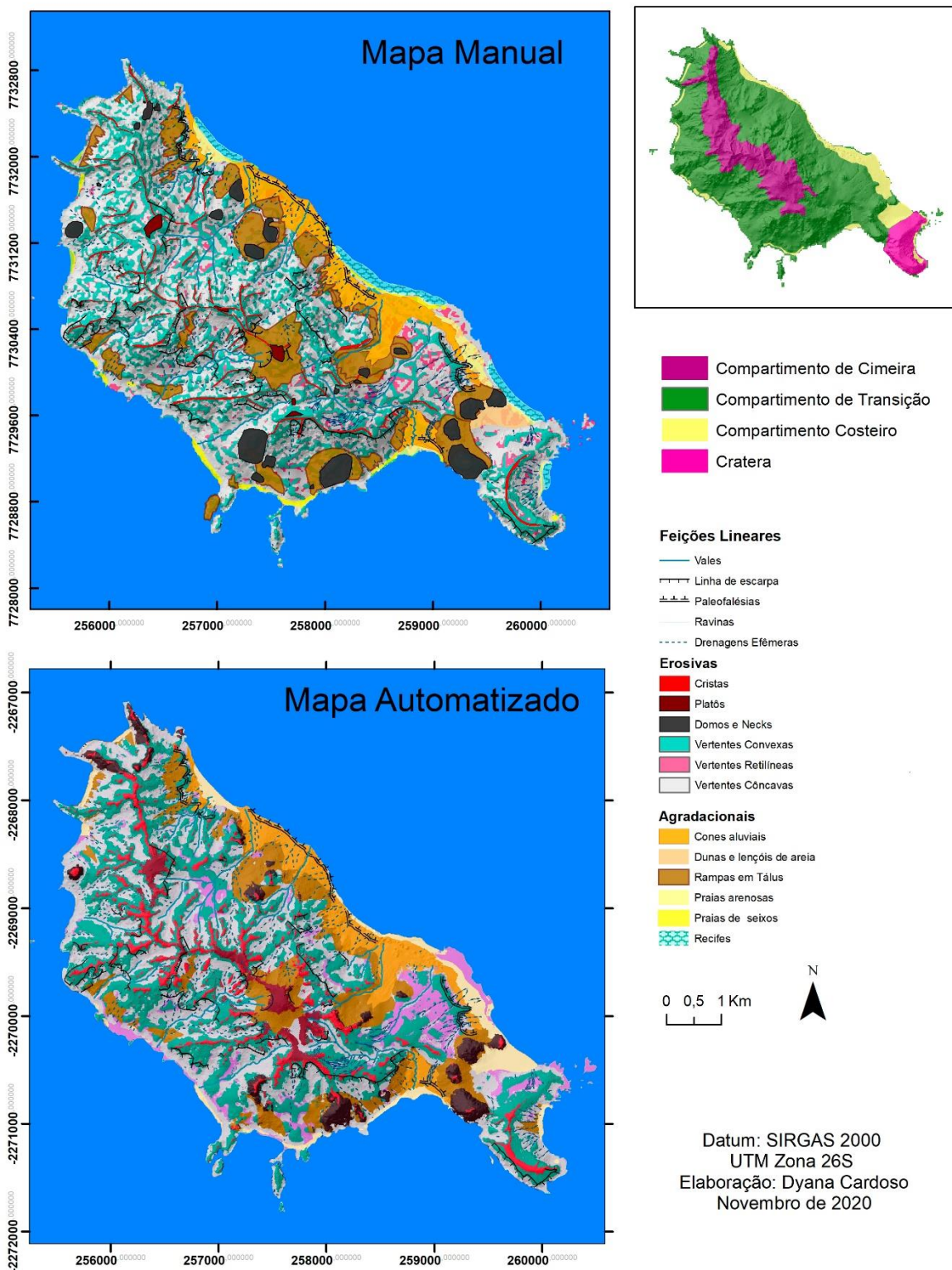


Figura 3. Mapas das geoformas da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, na escala de 1:20.000, elaborados pela compartimentação manual (a) e automatizada (b).

3.1.1 As unidades ou compartimentos morfológicos

Toda a estrutura do edifício vulcânico que constitui a Ilha foi considerada como uma única unidade morfoestrutural, e sua típica divisão em duas faces, uma voltada para sul-sudoeste (ocidental) e outra para norte-nordeste (oriental), como duas unidades morfoesculturais, táxons 1 e 2 (ROSS, 1992; Figura 2). No interior dessas, agrupam-se as unidades ou compartimentos morfológicos em nível do terceiro táxon. Como a diversidade de formas é grande, a delimitação de áreas com formas semelhantes é praticamente impossível e, por isso, optamos por considerar os agrupamentos de formas que caracterizam um domínio da paisagem semelhante. São eles: compartimento de cimeira, compartimento de transição, compartimento costeiro e cratera (Figuras 2 e 3).

O compartimento de cimeira constitui a porção mais central e elevada da Ilha, ocupando 1,65 km², 16,10% da área total. No extremo nordeste de Trindade, o compartimento se inicia a 56 m de altitude, onde as geoformas domos e cristas predominam. Atingindo 588 m de altitude no Pico Desejado - considerado o ponto mais elevado do Atlântico Sul (PIRES et al., 2016), o compartimento passa a incluir as cristas, escarpas e platôs. As principais litologias identificadas são os piroclastos da Sequência Desejado e piroclastos e rochas intrusivas fonolíticas do Complexo Trindade.

O compartimento de transição é o mais extenso da Ilha, ocupando 71% da área total, com 7,2 km². A altitude média é de 165 m, chegando a 457 m. É constituído por vertentes côncavas, convexas e retilíneas, incluindo também domos e necks. Na face ocidental as declividades são mais abruptas, atingindo 88%; enquanto a média das declividades na face oriental é de 33%. As vertentes são abruptamente interrompidas por paleofalésias na transição para o compartimento litorâneo. Geologicamente, predominam as rochas do Complexo Trindade, ocorrendo algumas porções também com ankaratritos da Formação Morro Vermelho.

O compartimento costeiro é composto por depósitos sedimentares holocênicos, tanto costeiros quanto marinhos. Nele ocorrem leques aluviais com sedimentos de origem vulcânica, recifes, lençóis de areia e dunas, praias arenosas e de seixos, ocupando um total de 0,79km², o que representa 7,7% da Ilha. A altitude média é de 7 m, com declividades médias em torno de 34%. As geoformas agradacionais predominam. Nas proximidades da Fm. Morro Vermelho, por exemplo, onde as rochas ankaratríticas se desfazem em sedimentos terrígenos de granulometria fina, ocorre o espriamento de sedimentos aluvionares na Praia dos Andradas – onde é possível observar o limite da intersecção dos materiais terrígenos com areias bioclásticas.

A cratera do Vulcão do Paredão foi considerada como um compartimento separado por representar uma unidade de relevo de valor científico e ambiental inestimável para o território brasileiro. Por ser o evento vulcânico mais recente da ilha, 0,25 Ma (Pires et al., 2016), os processos erosivos ainda não foram capazes de descaracterizar totalmente as estruturas originais construídas pela atividade vulcânica. A cratera é composta pelos restos de um cone vulcânico que hoje atinge 253 m de altitude, no extremo sudeste, numa área de 541 m² - 5% da área total. Trata-se de um anfiteatro de grandes dimensões, composto por vertentes com declividades médias de 34% entrecortadas por ravinas. Seu cone é formado por rochas vulcânicas diversas, cuja caracterização petrográfica realizada por Pasqualon et al. (2019) revelou a presença de sete litofácies, a partir das quais os autores concluem que a Formação Morro do Paredão teve uma fase freático-magmático, e posteriormente fases estromboliana e havaiana, sendo a última com fluxos de lava (PASQUALON et al., 2019).

3.1.2 As geoformas

No interior dos compartimentos morfológicos ocorrem as geoformas como um componente taxonômico em quatro nível. Essas geoformas foram agrupadas em erosivas (I) e agradacionais (II) (Figura 2). As primeiras evidenciam o predomínio da ação da morfogênese em detrimento da pedogênese. Destacam-se: cristas (I.1), platôs (I.2), vertentes (I.3), domos e necks (I.4) (Figuras 2 e 3). As geoformas agradacionais são predominantemente

formadas por sedimentos holocênicos, e representativas de ambientes de deposição eólicos, praias, aluviões e depósitos de encosta. Destacam-se: rampas em tálus (II.1), cones aluviais (II.2), praias (II.3) e lençóis de areia (II.4) (Figuras 2 e 3). Fotografias representativas das geoformas são apresentadas na Figuras 4 e 5.

3.1.2.1 Cristas

A linha de cumeeada que divide Trindade nas faces oriental e ocidental é composta por cristas (Figuras 3, 4a, 4b), por vezes interrompidas por platôs. Esta linha possui aproximadamente 4 km de distância, cortando a Ilha de norte a sul. As cristas têm média de 38 e 36% de declividade, respectivamente conforme mapeamentos manual e automatizado, e nessa mesma sequência altitude média de 339 e 350 m, atingindo sua altitude máxima na cota de 584 m – o Pico Desejado. A área ocupada por elas perfaz, respectivamente, 4 e 6% da área total de Trindade. Estão presentes em fonolitos e piroclastos diversos da Sequência Desejado, Complexo Trindade, Fm. Morro Vermelho e Fm. Vulcão do Paredão. Estas cristas irradiam em direção à costa nas duas faces, mas também ocorrem nos interflúvios das vertentes costeiras. Foram mapeadas manualmente 57 cristas, com dimensões entre 50 m e 1,15 km de comprimento contínuo. Boa parte das cristas correspondem ao topo de feições com controle estrutural de diques fonolíticos.

3.1.2.2 Platôs

Os platôs estão nas partes altas de Trindade (Figuras 3, 4c, 4d). Embora marcantes na paisagem da Ilha, perfazendo apenas 0,4% na delimitação manual e 2,7% na delimitação automatizada. Essa diferença se deve pela inclusão feita pelo algoritmo da porção superior do Morro Vermelho como platô, classificada como vertente convexa na delimitação manual. Nesta última, por uma questão de acuidade visual, apenas o platô associado às rochas da Sequência Desejado foi considerado. Tais diferenças implicam na variação de ocorrência da geoforma entre as cotas altimétricas 370 e 588 m de altitude para a delimitação manual, e 134 e 588 m para a delimitação automatizada. As declividades médias foram, respectivamente, de 9 e 19%.

3.1.2.3 Vertentes

As vertentes são geoformas de destaque em Trindade devido a sua extensa área de ocorrência (Figuras 3, 4e, 4f). Tanto na delimitação manual quanto automatizada, ocupam mais de 60% da área total da Ilha, majoritariamente no compartimento de transição. Considerando o mapeamento manual, as vertentes côncavas ocupam 38% de Trindade, as vertentes convexas 25,8% e as vertentes retilíneas 4,5%. No mapeamento automatizado, 29,5% são côncavas, 28% são convexas e 6% são retilíneas. As vertentes retilíneas apresentam menor declividade (24 ou 18%), enquanto as vertentes côncavas e convexas apresentam média superior a 30%, sendo ainda maiores nas vertentes convexas (36 ou 37%). A grande maioria das vertentes côncavas e convexas estão estruturadas pelas rochas do Complexo Trindade, enquanto na área de ocorrência da Formação Morro Vermelho predominam as vertentes retilíneas.

3.1.2.4 Domos e necks

Domos e necks são afloramentos rochosos que apresentam formato arredondado, semelhantes a pontões e pães de açúcar (Figuras 3, 4g, 4h). Um total de 16 feições foram mapeadas manualmente, atingindo 400 metros de altitude no Morro do Pico Branco, e 200 metros no Pico do Monumento. São elas majoritariamente compostas por fonolitos intrusivos do Complexo Trindade, e ocorrem especialmente no compartimento de transição. Ocupam aproximadamente 4% da área total da Ilha, tanto da delimitação manual quanto automatizada, respectivamente com declividade média de 57 e 54%.

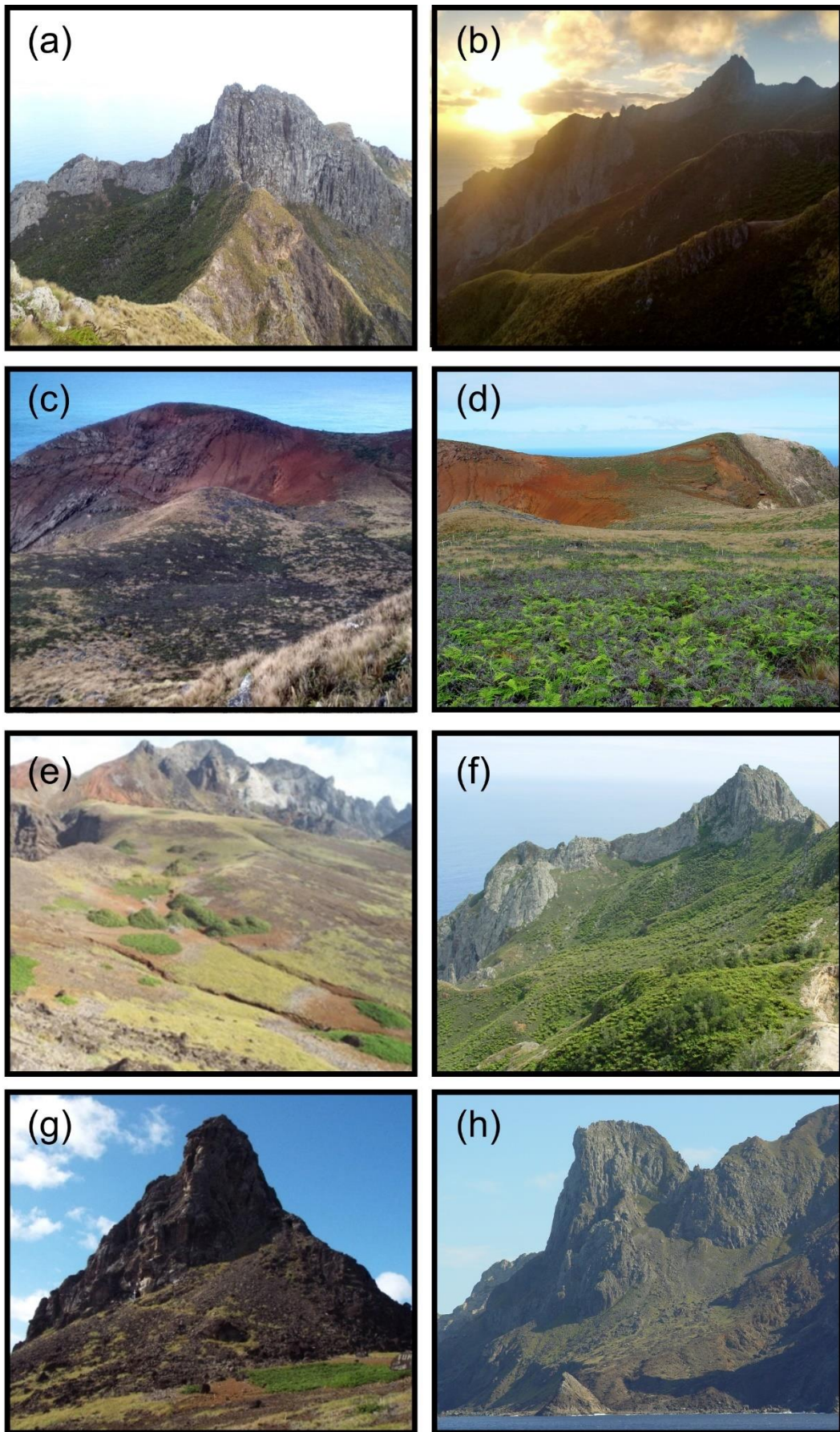


Figura 4. Fotografias representativas das geoformas erosivas da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, destacando as geoformas cristas (a) e (b), platôs (c) e (d), vertentes (e) e (f) e domos e necks (g) e (h).

3.1.2.5 Rampas em tálus

Os depósitos de tálus estão localizados na base dos domos e necks fonolíticos, formando uma espécie de “saia” de blocos rolados dos maciços rochosos pela ação da gravidade (Figuras 3, 5a, 5b, 5g). Perfazem cerca de 13% da área total da Ilha no mapeamento manual, e 11% no mapeamento automatizado. Grande diferença foi encontrada para as cotas altimétricas em que essa geoforma ocorre, sendo a cota mínima de 3 m na classificação automatizada e 393 m na manual. A declividade média, contudo, foi semelhante, com resultados, respectivamente, de 38 e 30%.

3.1.2.6 Cones aluviais

Situados majoritariamente no compartimento costeiro, os cones aluviais ocorrem no sopé dos taludes que interrompem as ravinas e vales estruturais das vertentes, numa altitude média de 46 ou 39 m, conforme delimitação manual e automatizada, respectivamente (Figuras 3, 5c, 5d). Quando os sedimentos são originados de rochas fonolíticas do Complexo Trindade, ocorrem matacões métricos com sedimentos mais finos, como areia. Na praia dos Andradas, as rochas ankaratríticas da Fm. Morro Vermelho se desfazem em sedimentos terrígenos de granulometria fina, transportados pelas ravinas e depositados na porção mais distal da praia. Na Praia do Príncipe, os depósitos aluviais do Córrego Vermelho foram depositados na margem esquerda do canal. Agora abandonados, formam uma longa rampa em direção ao litoral, cortada por ravinas. Os cones aluviais ocupam aproximadamente 7% da área total da Ilha, e declividade média próxima de 20%, tanto para o mapeamento manual quanto automatizado.

3.1.2.7 Praias, dunas e lençóis de areia

Ao todo são reconhecidas 10 praias em Trindade (Figuras 3, 5e, 5f), por vezes associadas a zonas com acumulação eólica de sedimentos, como na Praia dos Andradas e Tartarugas, constituindo típicos lençóis de areia e/ou dunas, respectivamente, sendo do tipo *climb* conforme Angulo et al. (2018). Na delimitação automatizada, tais geoformas foram identificadas em conjunto pelo algoritmo, e incluíram também áreas com atuais recifes de coral, perfazendo 4% da Ilha. Já na delimitação manual, elas foram separadas nas imagens, sendo 1,7% praias, 0,79% lençóis de areia e dunas e 1,9% recifes. A resolução espacial das imagens permite, ainda, a separação das praias em arenosas e de seixos. As 5 praias arenosas são classificadas pela cor da areia, sendo as claras formadas por sedimentos bioclásticos; as escuras por sedimentos de rochas vulcânicas, ricos em minerais pesados; e as de composição mista, com os dois tipos de sedimentos (DELPUPO, 2011). As praias arenosas ocupam uma área de 0,07% km², e representam 0,7% da extensão total da Ilha. Variam entre as cotas de 0 a 20 m de altitude, com declividades médias de 5%. As outras 5 praias são compostas por seixos rolados de rochas locais variadas, por vezes ocorrendo fragmentos coralinos, onde os blocos de rocha são transportados das vertentes e depositados nas praias. A declividade média nestas praias é de 7%, atingindo até 3,6 m de altitude.

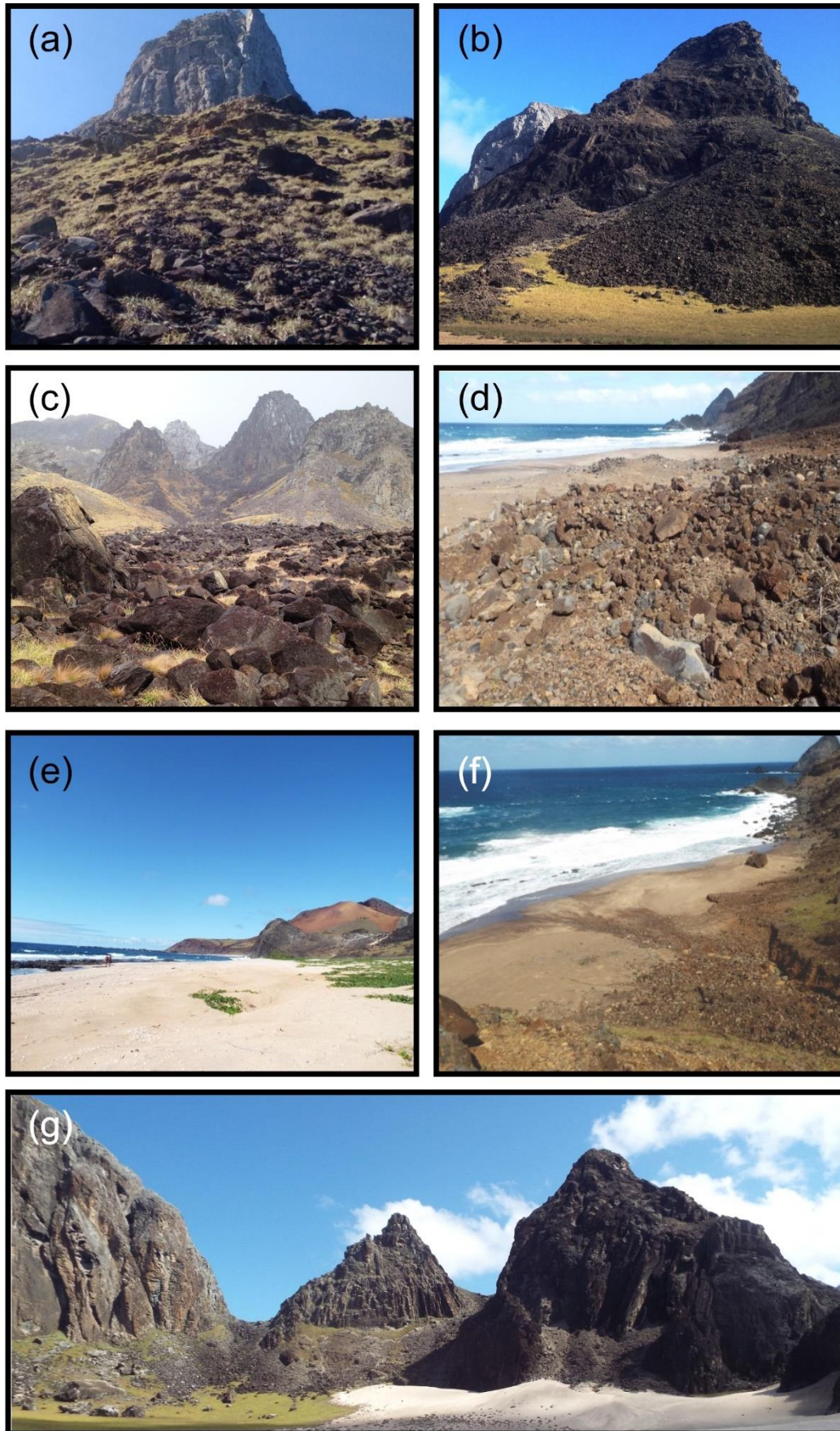


Figura 5. Fotografias representativas das geoformas agradacionais da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, destacando as geoformas rampas em tálus (a), (b) e (g), cones aluviais (c) e (d), praias (e) e (f) e dunas (g).

Os lençóis de areia e dunas estão localizados principalmente nas praias Andradas e Tartarugas, mas ocorrem também na praia dos Cabritos, variando entre as cotas de 0 a 52 m de altitude. Na Praia das Tartarugas a diversidade de ambientes eólicos é maior, registrando a mais espessa acumulação de sedimentos (Figuras 3, 5g). Transportados pela ação dos ventos de leste, estes sedimentos são depositados na base dos afloramentos rochosos, formando uma feição de 0.08 km², o que representa 0.79% da área total da ilha. A declividade média é de 7%, atingindo até 76%.

3.1.3 As feições lineares

No interior de algumas geoformas, ocorrem feições lineares (Figuras 3). Destacam-se: escarpas, paleofalésias, ravinas e canais de drenagem (Figura 6).

Foram delimitadas 45 escarpas, majoritariamente nos compartimentos de cimeira e transição (Figura 6). Entretanto, acredita-se obter um número ainda maior num mapeamento mais detalhado. As escarpas representam principalmente rupturas de declive que separam os compartimentos supracitados, no contato litológico entre a Formação Desejado e o Complexo Trindade. São feições comuns nas cabeceiras de drenagem, onde há declividade acentuada, maior que 45% e podendo chegar a 90%, predominantemente nas cotas acima de 350 m de altitude.

As falésias compreendem rupturas de declive e ocorrem no compartimento costeiro (Figura 6). Na maior parte dos casos, representam o recorte erosivo da porção terminal dos leques e depósitos de encostas, mas também da atuação das ondas sobre afloramentos rochosos, como os necks e domos; sendo que em ambos os casos foram esculpidas sob condições de nível do mar mais alto (ANGULO et al., 2018), sendo por isso consideradas paleofalésias. Algumas dessas feições chegam a aproximadamente 3 metros de altura, com declividades próximas a 45%, ocorrendo em cotas altimétricas próximas de 56 m acima do atual nível do mar. Ocorrem também terraços de abração, como aquele reportado por Angulo et al. (2018) no Vulcão do Paredão.

As ravinas mapeadas foram definidas pela localização em áreas de solo exposto e vegetação escassa, onde há desenvolvimento de solo e cicatrizes de erosão linear pluvial (Figura 6). Essas feições se encontram em complexos de sulcos que confluem e formam canais efêmeros, transportando sedimentos terrígenos para jusante. As dimensões e profundidades das ravinas são variadas, entre 50 e 500 metros de comprimento, e até 2,5 metros de profundidade. Foram identificadas em áreas associadas às Formações Vulcão do Paredão e Morro Vermelho, mas também a piroclastos do Complexo Trindade. Na cratera, por exemplo, foram mapeadas 23 ravinas de 100 a 300 metros de comprimento, tanto no seu interior quanto na vertente externa ao cone. Na Praia do Príncipe há dois complexos de ravinas de até 217 metros, com 2 m de profundidade e presença de vegetação rasteira. No Morro Vermelho foram mapeadas 34 ravinas, sendo que 8 vertem em direção à praia dos Andradas, com extensões de 150 a 400 m, com presença de sulcos erosivos atuando como afluentes. Nas vertentes da cabeceira do Córrego Vermelho foram identificadas 34 ravinas de até 300 m – estas feições, no entanto, não foram visitadas em campo devido à dificuldade de acesso.

O movimentado relevo de Trindade evidencia a presença de diversos canais de drenagem, por vezes perenes, intermitentes e efêmeros. Os principais canais da ilha foram mapeados com base nas nascentes e bacias hidrográficas por Marques et al. (2017) (Figura 6). Cabe destacar a presença de grandes vales estruturais, como o vale do Córrego Vermelho, o vale do Córrego da Cachoeira, e o vale do Córrego do Valado. São vales extremamente dissecados que depositam cones de dejeção de grandes dimensões em sua foz, com blocos matações fonolíticos métricos – possivelmente transportados em grandes eventos de chuva torrencial.



Figura 6. Fotografias representativas das principais feições lineares da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, destacando as escarpas (a), (b) e (g), as ravinas (c) e (d), as paleofalésias (e) e os vales (f) e (g).

3.2 Perfis geocológicos

Os perfis geocológicos (Figura 7) evidenciam 11 unidades de paisagem considerando as relações verticais entre geoformas e os componentes físico-naturais rochas (unidades geológicas), solos e vegetação. As características das unidades foram sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Síntese das geoformas e componentes físico-naturais associados nas onze unidades (a, ... l) identificadas a partir da análise da estrutura vertical da paisagem.

Unidade	Geoformas	Geologia	Solos	Vegetação (espécie predominante)
a	Platô	Sequência Desejado e Formação Morro Vermelho	Cambissolo Háplico distrófico ou aluminico	Pityrogramma calomelanos
b	Cristas, rampas em talus e vertentes altas	Sequência Desejado e Complexo Trindade	Organossolos e/ou Cambissolo com horizonte húmico	Cyathea copelandii
c	Cristas, rampas em talus e vertentes altas	Sequência Desejado	Cambissolo Háplico distrófico ou aluminico	Pityrogramma calomelanos
d	Cristas, rampas em talus e vertentes altas	Complexo Trindade	Neossolo Litólico distróficos	Pityrogramma calomelanos
e	Vertentes côncavas e convexas	Complexo Trindade	Neossolo Litólico eutrófico	Cyperus atlanticus com Bulbostylis nesiotis ou Bulbostylis nesiotis
f	Vertentes côncavas e convexas	Complexo Trindade	Neossolo Litólico distrófico	Cyperus atlanticus ou Bulbostylis nesiotis ou Pityrogramma calomelanos
g	Vertentes convexas e retilíneas	Morro Vermelho ou Vulcão do Paredão	Andossolo não alofânico	Cyperus atlanticus
h	Necks, domos e rampas em talus associadas	Complexo Trindade	Neossolo Litólico e Cambissolo Háplico, muitas vezes ornitogênico	Afloramentos sem vegetação, com líquens ou Bulbostylis nesiotis
i	Cones aluviais	Depósitos sedimentares de encosta e aluviais	Cambissolo Háplico e Neossolo Regolítico distróficos	Cyperus atlanticus ou Bulbostylis nesiotis
j	Dunas e lençóis de areia	Depósitos sedimentares eólicos	Neossolo Regolítico bioclástico-carbonático	Cyperus atlanticus
l	Praias	Depósitos sedimentares praias	-	-

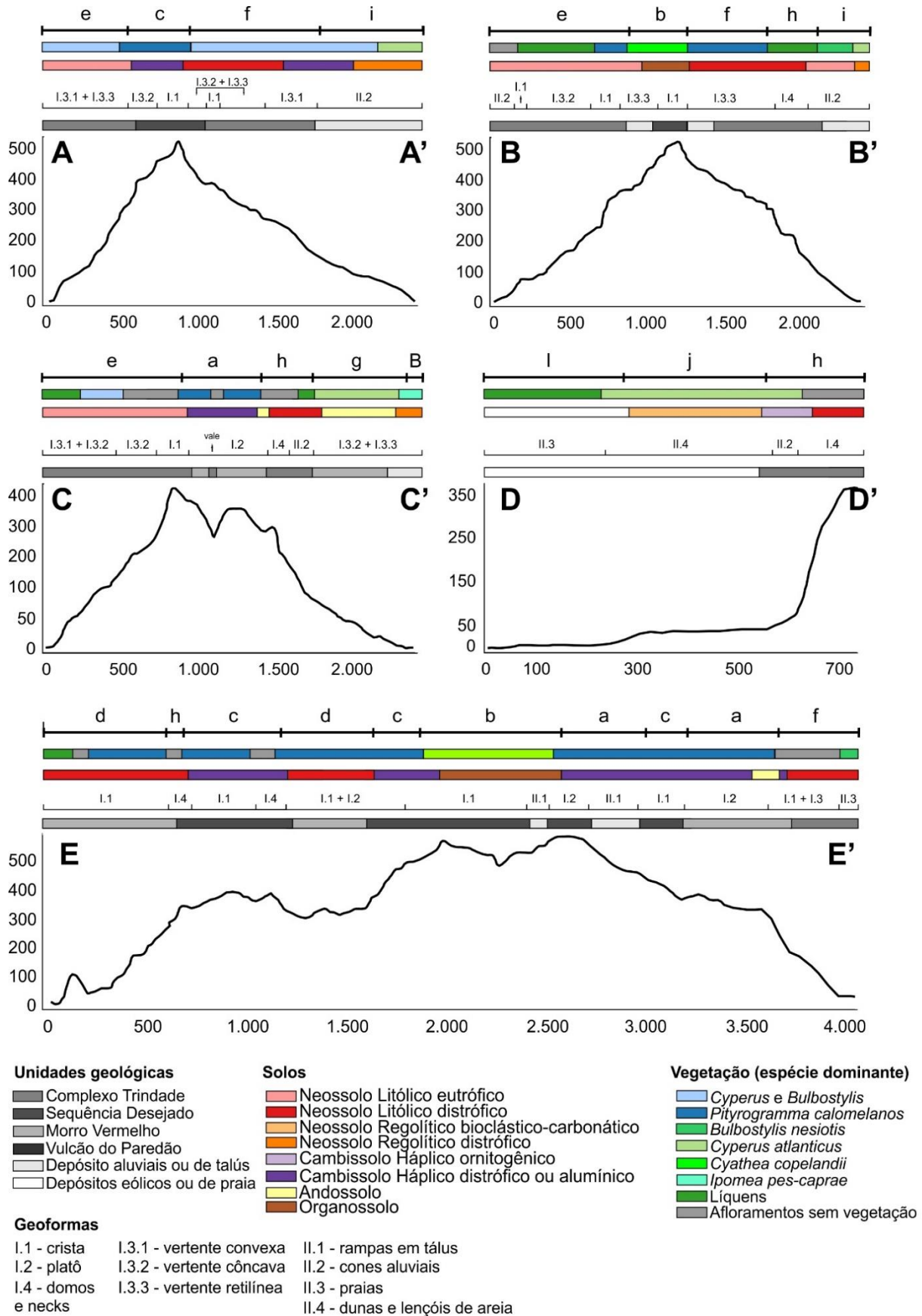


Figura 7. Perfis geocológicos evidenciando a sobreposição entre geoformas, unidades litológicas, solos e vegetação (espécie predominante). As onze unidades identificadas a partir da estrutura vertical da paisagem foram codificadas de pelas letras de “a” a “l”, com detalhamento na Tabela 2.

4. Discussão

4.1 As geoformas e sua delimitação

A abordagem taxonômica do relevo, isto é, a classificação de fenômenos geomorfológicos por critérios escalares, divididos por ordens de grandeza (TRICART; CAILLEUX, 1956) é um método sistemático bastante aplicado em mapeamentos (ROSS, 1992; IBGE, 2009; GARCIA, 2015). A definição de táxons ou categorias de formas facilita não somente a sua identificação, mas toda a operacionalização da pesquisa geomorfológica (ROSS, 1992). A adoção dessa abordagem para a Ilha da Trindade foi avaliada como satisfatória, ainda que tenha apresentado alguns desafios.

Em primeiro lugar, é preciso considerar que a heterogeneidade do relevo de Trindade dificulta sua compreensão, afinal “tudo são ruínas” (ALMEIDA, 1961). Por esse motivo, a adoção de uma compartimentação em diferentes níveis funcionou como um exercício de organizar, passo a passo, essa heterogeneidade, e entender a relação entre as formas. Seria essa a principal contribuição da abordagem taxonômica: as formas não são exclusivas de um ambiente, embora possam ocorrer com maior frequência em alguns; e não é sua presença isolada o principal elemento a ser considerado, mas a sua associação. Por exemplo: cristas + platôs + vertentes côncavas + rampas em talus associam-se para compor um compartimento de cimeira em que fica muito claro o papel da erosão e do controle estrutural na formação das posições mais altas da Ilha.

A principal dificuldade da aplicação da abordagem taxonômica foi identificar divisões para os maiores níveis taxonômicos, táxons 1 e 2. Nos domínios morfoestruturais, por exemplo, o papel da litologia na evolução do relevo de Trindade é amplamente conhecido (ALMEIDA, 1961). Contudo, definir áreas que sinalizam e diferenciam esse papel não é uma tarefa simples. Por exemplo, o comportamento de alteração (intemperismo) e erosão das rochas intrusivas é muito distinto das piroclásticas. Essas rochas, entretanto, são formadas num mesmo evento vulcânico e, por isso, estão inseridas numa mesma unidade geológica. A delimitação das unidades morfoestruturais como sinônimo da compartimentação das unidades geológicas não é uma verdade, pois numa mesma unidade o comportamento morfoestrutural dos materiais é muito distinto. Isso mostra que o caminho ideal seria a definição de domínios morfoestruturais baseados em litologias semelhantes. Contudo, em áreas como Trindade, em que diferentes tipos de rochas coexistem em pequenas áreas, isso levaria a uma compartimentação muito detalhada, o que foge dos pressupostos para o nível categórico mais amplo, como o táxon 1.

A mesma dificuldade ocorreu para o táxon 2 (ROSS, 1992; IBGE, 2009). Classicamente ele tem sido delimitado em unidades de planaltos, depressões e planícies. Ainda que algumas áreas de Trindade tenham sido assim categorizadas, como os planaltos axial e ankaratricos de Almeida (1961), elas compreendem, na verdade, restritas superfícies aplainadas por condicionantes estruturais, não havendo como compartimentar em seu interior os demais táxons. Isso leva a crer que se trata mais de uma forma de relevo (platô), que uma unidade planáltica. Por isso, optou-se por considerar como unidades morfoesculturas o traço geomorfológico mais marcante da ilha: a sua divisão em duas faces, oriental e ocidental.

Em se tratando dos procedimentos adotados (manual e automatizado), a similaridade entre os mapas (Figura 3) sugere a coerência visual dos resultados obtidos. A delimitação através das técnicas de *machine learning* permitiram confirmar que o reconhecimento visual das formas nas imagens ocorreu satisfatoriamente, possivelmente em decorrência da boa resolução espacial das imagens e do intenso reconhecimento em campo. É de esperar que relevos movimentados como o de Trindade tenham os limites mais bem definidos por procedimentos automatizados (VERONESI; HURNI, 2014; ZHAO ET AL., 2017). Esse procedimento tem implicações diretas na quantificação das áreas ocupadas pelas geoformas e nos seus atributos morfométricos, principalmente variação da altitude. Ainda assim, essas diferenças foram maiores apenas para as rampas em talus, muito confundidas como vertentes retilíneas pelo classificador. Também houve grande diferenciação nas altitudes

máximas e mínimas, pois a existência de uma única forma em posição distinta já impacta neste atributo. Contudo, as médias foram semelhantes.

Comparando nossos resultados com Nogueira et al. (2020), as vertentes representam a geoforma de maior expressão espacial, mas com valores distintos. Para Nogueira et al. (2020), 57% são encostas retilíneas, 19% levemente convexas (denominada de cristas secundárias), e 18,6% são concavidades. Em nosso estudo, os resultados foram, respectivamente, 6,2%, 28,1 e 29,5%. Em Nogueira et al. (2020) as encostas foram definidas diretamente a partir de parâmetros morfométricos para toda a Ilha. Aqui, entretanto, algumas formas de relevo classificadas por esses autores como vertentes foram conceitualmente definidas como outras geoformas, como as rampas em tálus e os cones aluviais. Isso porque o substrato também foi utilizado como critério de definição. Esse fato sinaliza a importância de considerar quais procedimentos estão sendo utilizados para a delimitação das formas a fim de avaliar e compreender o significado dos seus resultados.

4.2 A evolução geomorfológica da Ilha da Trindade e sua relação com as geoformas

A identificação de múltiplas geoformas, associados a ambientes e processos tão distintos, é um componente que, por si só, revela a complexidade da evolução geomorfológica da Ilha da Trindade. A compartimentação aqui apresentada nos auxilia na compreensão da evolução quaternária do relevo. Para isso, apresentamos uma discussão em que associamos essa compartimentação a quatro etapas que foram sistematizadas a partir dos estudos desenvolvidos por Almeida (1961), Schaefer e Oliveira (2015), Pires et al. (2016) e Angulo et al. (2018). Essas etapas não devem ser compreendidas como uma sequência exata dos fatos que explicam a evolução do relevo na Ilha, mas como quatro distintos contextos em que é possível relacionar o conhecimento produzido nos estudos dos autores supracitados com as geoformas aqui identificadas.

Etapa 1 – a formação do edifício vulcânico. A formação do edifício vulcânico que constitui a Ilha da Trindade teria ocorrido a partir da atuação de um *hot spot* entre o Plioceno Inferior e o Pleistoceno Inferior, com um primeiro grande período de atividades vulcânicas entre 3,9 e 2,5 Ma (PIRES et al., 2016) que teria formado as rochas do Complexo Trindade (ALMEIDA, 1961). A atividade vulcânica teria sido reduzida entre 2,5 e 1,6 Ma, e neste intervalo teriam sido formadas as rochas da Sequência Desejado. A Ilha Vulcânica, enquanto um único domínio morfoestrutural, constitui a unidade taxonômica representativa deste contexto.

Etapa 2 – desmonte erosivo do edifício vulcânico original com forte controle lito-estrutural. Após 1,6 Ma, a quiescência dos processos vulcânicos marcaria o início de uma fase da atuação do intemperismo e da erosão (subaérea e costeira), culminando na gênese das duas faces da Ilha, e dos compartimentos de cimeira, transição e parte do compartimento costeiro. Conforme Angulo et al. (2018), a plataforma de mais de 50 Km² ao redor de Trindade indica a acentuada erosão do edifício vulcânico anterior. As duas unidades geológicas então existentes apresentaram rochas com controles geomorfológicos distintos, ora mais susceptíveis à erosão, como os piroclastos, ora mais resistentes, como os fonolitos intrusivos. Por isso, a erosão diferencial e o controle estrutural teriam marcado o desmonte da porção exposta do edifício vulcânico original.

As geoformas identificadas podem retratar essas diferenças. Por exemplo: i) as camadas de piroclastos da Sequência Desejado são frequentemente inclinadas, mas os derrames são sub-horizontais, o que teria influenciado na formação de platôs de cimeira; ii) os diques de fonolito formados no interior das crateras seriam mais resistentes à erosão que as rochas circundantes e, por isso, seriam mais preservados, formando os necks e domos em diversas posições da Ilha, e algumas das cristas identificadas no compartimento de cimeira, sendo que o mesmo raciocínio pode ser aplicado às rochas eruptivas mais escuras, conforme Almeida (1961). Para este autor, é no contato dos pináculos fonolíticos com os piroclastos encaixantes que se alojam profundas ravinas, marcando a atuação da erosão diferencial; iii) ao mesmo tempo, a exposição das rochas intrusivas pela erosão do material sobreposto

levaria à formação de fraturas por alívio de pressão, que somadas às fraturas já existentes associadas ao resfriamento magmático, comporiam um sistema de juntas que facilitaria sua fragmentação e a formação das rampas em tálus nas suas bordas pela ação de movimentos gravitacionais; iv) os sedimentos mais finos que, por alteração intempérica, comporiam os solos das partes mais altas, teriam sido remobilizados, e mesmo que a maior parte tenha sido perdida para o mar, parte ficou preservada na desembocadura de alguns vales na forma de leques aluviais.

Etapa 3 – o retorno do vulcanismo, novos condicionantes lito-estruturais e o compartimento costeiro. Ainda que localizados, três novos registros vulcânicos inserem novas complexidades à evolução geomorfológica da Ilha da Trindade. São elas as formações Morro Vermelho, Valado e Vulcão do Paredão, respectivamente com 250 m, 60 m, e 250 m de espessura. Dessas três, o Vulcão do Paredão é o mais recente com 0,25 Ma (PIRES; BONGIOLO, 2016; PIRES et al., 2016). Uma primeira influência é que tais eventos introduzem novos materiais geológicos, já que são compostos por derrames de nefelinito ricos em olivina (ankaratritos), com depósitos piroclásticos de composição semelhante. Essa diferença teria conduzido à formação de solos únicos no Brasil, como os Andossolos reportados por Mateus et al. (2020). O controle estrutural das camadas subhorizontalizadas dos derrames da Formação Morro Vermelho teria influenciado na formação de novos platôs no compartimento de cimeira, ao mesmo tempo em que a grande incidência de ravinas nas vertentes entre este platô e o compartimento costeiro podem ser relacionadas à forte erodibilidade dos solos sobre tais rochas. Para Angulo et al. (2018), fluxos de lava e piroclastos atribuídos a esses eventos durante o Pleistoceno Médio e Tardio teriam contribuído para a preservação de leques aluviais formados anteriormente, o que possibilitou que os processos que se sucederam com o posterior aumento do nível do mar (aproximadamente 120 ka) erodissem a porção terminal destes leques e formassem as paleofalésias identificadas no compartimento costeiro. Os autores também sinalizam as falésias rochosas nos necks e domos exumados na fase anterior como um indicador da erosão costeira atuando sob condições de nível do mar mais alto.

Em relação ao evento vulcânico que formou o Vulcão do Paredão, além da cratera parcialmente preservada constituir um marco geomorfológico importante, outras influências na evolução do compartimento costeiro podem ser destacadas. Ao buscar reconstituir a variação do nível do mar no Quaternário na Ilha, Angulo et al. (2018) demonstrou por indicadores morfológicos, sedimentológicos e biológicos que o Vulcão do Paredão teve participação importante na formação de uma baía onde hoje está localizada a Praia das Tartarugas. Essa baía, conforme os autores, seria formada pela erosão parcial da cratera em condições de mar mais alto, e posteriormente teria sido ocupada por recifes de algas e corais (7 a 5 ka) até o seu preenchimento por depósitos de areias bioclástico-carbonáticas. As idades de antigos recifes de algas identificados pelos autores por técnicas geofísicas na base da praia e dos depósitos de areia da praia indicam taxas de progressão de 0,41–0,46 m por ano durante os últimos 3,6–3,4 ka (ANGULO et al., 2018). O retrabalhamento eólico desses materiais constituem as geoformas associadas aos lençóis de areia e dunas.

Etapa 4 – a aceleração dos processos erosivos sob influência antrópica. De fato, a diversidade litológica, a variação do clima e do nível do mar são os fatores que melhor explicam o predomínio de geoformas erosivas em Trindade, ou seja, as vertentes, platôs, necks e cristas. Até mesmo as feições lineares circunscritas nessas, como os vales, as ravinas e paleofalésias, encontram na erosão natural da Ilha explicações para sua gênese. A própria mistura observada a partir do Holoceno Tardio entre sedimentos de encostas com sedimentos praias e eólicos (DELPUPO, 2011; CALLIARI et al., 2016; ANGULO et al., 2018) mostra que a erosão ainda é o principal processo esculptor do relevo da Ilha. Contudo, cabe também destacar que muitas dessas feições, sobretudo as ravinas, marcam também a aceleração da erosão nas vertentes por causa de interferências antrópicas, inserindo-se num contexto morfodinâmico. Ao longo dos mais de 500 anos de ocupação, Trindade passou por um intenso processo de descaracterização da sua vegetação nativa. Esse processo começou por volta de 1756 com a inserção de animais

selvagens (especialmente cabras). Sem predadores naturais, esses animais se proliferaram causando um desequilíbrio ecológico, devastando a maior parte da sua cobertura vegetal (ALVES, 2008; CLEMENTE, 2006; CLEMENTE et al., 2011). Além do nítido impacto ambiental à biota, comprometendo a flora e fauna local, a retirada da vegetação significou um considerável impacto ao solo, principalmente através da aceleração da erosão, que culminou na abertura das ravinas supracitadas (OLIVEIRA et al., 2004). Assim, entender o atual relevo de Trindade perpassa também pela necessidade de compreender os efeitos dessa erosão acelerada (SCHAEFER; OLIVEIRA, 2015).

4.3 A geoformas e sua integração na estrutura vertical da paisagem na Ilha da Trindade

A integração vertical entre as geoformas e o substrato geológico, solo e vegetação revela aspectos importantes da organização das paisagens em Trindade. A constatação mais importante é que o relevo em nível morfoescultural define dois topoclimas: um mais úmido para a face ocidental e outro mais seco para a face oriental, corroborando com o que foi apresentado por Clemente (2006) e Firme Sá (2010). Esses topoclimas definem processos mais ou menos avançados de formação de solos, tendo relação direta com os processos morfogenéticos e o estabelecimento da vegetação. Por exemplo, enquanto na face ocidental são observados ORGANOSSOLOS sob formações florestais (unidade b), na face oriental, sob as mesmas condições litológicas e geoformas, observam-se solos e vegetação diferentes, como NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos com formações não florestais (unidade f). Outra importante evidência da associação relevo-clima é que onde as rochas da Formação Morro Vermelho ocorrem sob climas secos, é verificado o predomínio de *Cyperus* e os solos são ândicos e com maior CTC, além de forte presença de sulcos e ravinas.

Além da condição topoclimática, a estrutura vertical da paisagem também deve ser entendida pela associação relevo-condicionantes biológicos. Os ORGANOSSOLOS, por exemplo, só se desenvolvem sob *Cyathea*, evidenciando que as pteridófitas gigantes sintetizam biomassa com baixas taxas de mineralização, formando horizontes O/H mesmo em condições de boa drenagem. São ORGANOSSOLOS FÓLICOS clássicos, sob controle de vegetação monodominante e relevo completamente atípico para a classe, o que levou Machado et al (2018) a considerá-los como endêmicos. Outro exemplo é que onde ocorrem Cyperaceae (unidade e), os solos são mais eutróficos e com CTC maior, revelando o papel das gramíneas na ciclagem de nutrientes.

O controle das geoformas no grau de desenvolvimento do solo é também observado. O platô estrutural de materiais mais jovens associados à Formação Morro Vermelho mostra avançado grau de lixiviação e vegetação acidófila, com distrofia mesmo em solos jovens, onde a estabilidade do relevo favorece a drenagem e o intemperismo. Esse fato revela um controle pedogeomorfológico importante, que faz com que os solos mais desenvolvidos de Trindade estejam nos compartimentos de cimeira, onde se encontram esses platôs (unidade de paisagem a). Outro exemplo é o platô associado à Sequência Desejado, onde os solos apresentam caráter aluminico pelos mesmos motivos.

Por fim, nas áreas mais baixas da Ilha ocorre o retrabalhamento pelo vento e ondas de sedimentos marinhos depositados no domínio costeiro, misturados com sedimentos provenientes das encostas, ou dos sedimentos depositados ao longo de leques aluviais, desenhando pedossistemas únicos. Embora a vegetação seja principalmente herbácea, com grande predomínio de *Cyperus*, nessas áreas os solos se diferenciam do restante, com NEOSSOLOS REGOLÍTICOS de difícil enquadramento no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), muito associado às especificidades do material de origem. A geoformas contribuem para uma melhor drenagem em algumas áreas com declividades mais suaves associadas aos leques, o que faz com que ocorra também CAMBISSOLOS HÁPLICOS.

5. Conclusões

1. O relevo da Ilha da Trindade pode ser organizado em um domínio morfoestrutural (ilha vulcânica), duas unidades morfoesculturais (face oriental e ocidental), quatro compartimentos (cimeira, transição, costeiro e cratera), oito geoformas, sendo quatro erosivas (vertentes, cristas, platôs e necks) e quatro agradacionais (rampas em tálus, leques aluviais, praias e dunas / lençóis de areia), além de feições lineares como escarpas, paleofalésias, sulcos e ravinas e canais de drenagem.
2. As vertentes constituem as geoformas de maior expressão espacial (60%). Além delas, cristas, platôs e necks somam aproximadamente 8,68% (manual) e 13% (automatizado), mostrando que as feições erosivas são predominantes. Isso reforça o importante papel dos processos morfogenéticos na esculturação do relevo em Trindade, atuando sobre rochas com distintas competências, e solos com baixo grau de desenvolvimento pedogenético. Considerando a expressão espacial das geoformas agradacionais, pouco da erosão das encostas ficou preservado no compartimento costeiro.
3. Comparativamente, os resultados visuais da distribuição das geoformas por procedimentos manuais e automatizados são semelhantes. As principais diferenças foram quantitativas, principalmente na confusão feita pelo classificador entre rampas em tálus e praias – às vezes recifes (feições agradacionais) e vertentes retilíneas (feição erosiva). Como as co-variáveis utilizadas foram principalmente morfométricas, acredita-se que a inclusão da natureza do substrato pode contribuir para atenuar essas diferenças. No caso do mapa manual, os platôs foram subestimados e mapeados como vertentes convexas. Também foi verificada uma forte variação nas altitudes máximas e mínimas entre os procedimentos, embora as altitudes médias tenham sido semelhantes.
4. As geoformas em Trindade possuem um importante papel da evolução das paisagens. Os platôs facilitam a percolação da água e influenciam na formação de solos mais intemperizados. A organização em duas faces influencia na existência de topoclimas, que, por sua vez, conduzem ambientes mais úmidos de floresta e com solos orgânicos de um lado, e mais secos com solos distróficos e vegetação herbácea de outro. A sedimentação no compartimento costeiro cria pedoambientes únicos, com solos de difícil classificação e, por isso, considerado endêmicos.

Contribuições dos Autores: Concepção, Dyana Freitas, Fábio Oliveira, Caroline Delpupo e Carlos Schaefer; metodologia, Dyana Freitas, Fábio Oliveira, Caroline Delpupo, Carlos Schaefer, Rafael Siqueira e Igor Soares; software, Dyana Freitas, Rafael Siqueira e Igor Soares.; validação, Dyana Freitas, Rafael Siqueira e Igor Soares.; análise formal, Fábio Oliveira, Caroline Delpupo e Carlos Schaefer; pesquisa, Dyana Freitas, Fábio Oliveira, Caroline Delpupo, Carlos Schaefer, Rafael Siqueira e Igor Soares; recursos, Fábio Oliveira e Carlos Schaefer; preparação de dados, Dyana Freitas; escrita do artigo, Dyana Freitas, Fábio Oliveira, Caroline Delpupo, Carlos Schaefer, Rafael Siqueira e Igor Soares; revisão, Dyana Freitas; supervisão, Fábio Oliveira, Caroline Delpupo, Carlos Schaefer; aquisição de financiamento, Fábio Oliveira e Carlos Schaefer. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito".

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo CNPq, através dos projetos 442730/2015-2 e 430433/2018-2: ECOSISTEMAS ENDÊMICOS INSULARES: BIOGEOQUÍMICA E EMISSÕES DE CO₂ DOS SOLOS ORNITOGÊNICOS NAS ILHAS OCEÂNICAS DO BRASIL - ABROLHOS, TRINDADE, MARTIN VAZ, SÃO PEDRO-SÃO PAULO E FERNANDO DE NORONHA, coordenado pelo Prof. Carlos Schaefer (UFV) e GEOMORFOLOGIA AMBIENTAL DAS ILHAS OCEÂNICAS FERNANDO DE NORONHA E TRINDADE: COMPARTIMENTAÇÃO DO RELEVO, EVOLUÇÃO QUATERNÁRIA E INTERAÇÕES SOLO-ÁGUA, coordenado pelo Prof. Fábio Oliveira (UFMG).

Agradecimentos: Os autores agradecem à MARINHA DO BRASIL, especialmente através do PROGRAMA PROTRINDADE, o apoio para a realização da pesquisa, e sem o qual não seriam possíveis os trabalhos de campo.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALMEIDA, F.F.M. de. **Geologia e Petrologia da Ilha de Trindade**. Monografia Rio de Janeiro: DNPM/DGM. 197 p. 1955.
2. ALMEIDA, F. F. M. de. 1961. **Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade**. Monografia XIX, Rio de Janeiro, DNPM/DGM. 197 p.
3. ALMEIDA, F. F. M. Ilha de Trindade – Registro de vulcanismo cenozoico no Atlântico Sul. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBET-BORN, M. L. C. **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. 1a ed.: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e paleobiológicos, Brasília, DF, p.369-377, 2002.
4. ALMEIDA, F.F.M.de. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terræ Didática**, 2(1):3-18. 2006.
5. ALVES, R. J. V. **Ilha da Trindade & Arquipélago Martin Vaz – um ensaio geobotânico**. Serviço de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro – RJ, 144p. 1998.
6. ANGULO, R.; SOUZA, M.C.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; FERNANDES, L.A.; GUEDES, C.C.F.; OLIVEIRA, L.H.S.; MANZOLLI, R.P.; DISARÓ, S.T.; JUNIOR, A.L.F.; MARTIN, C.M.; SANTOS, F.A.; GARCIA, M.H. **Quaternário e paleoníveis marinhos na Ilha da Trindade. PROTRINDADE Programa de Pesquisas Científicas na Ilha da Trindade – 10 Anos de Pesquisa**. Secretaria de Comissão Interministerial para Recursos do Mar/SECIRM, Brasília, 200p., 2017.
7. BEROUTCHACHVILI, N.; RADVANYI, J. Les structures verticales des géosystèmes. **Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, Toulouse, v. 49, n. 2, p. 181-198, 1978.
8. BREIMAN, L., Random forests. **Mach. Learn.** 45, 5–32, 2001. [https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)
9. BRENNING, A. Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models, in: **SAGA--Seconds Out (Hamburger Beiträge Zur Physischen Geographie Und Landschaftsökologie)**. pp. 23–32, 2008.
10. CASTRO, J. Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental. **Revista de Gestão Costeira Integrada**. 10. 303-319., 2010. [doi:10.5894/rgci170](https://doi.org/10.5894/rgci170)
11. CALLIARI L.J., PEREIRA P.S., SHORT A.D., SOBRAL F.C., MACHADO A.A., PINHEIRO Y.G., FITZPATRICK, C. Sandy beaches of Brazilian oceanic islands. In: Short A.D., Klein A.H.F. **Brazilian beach systems**. Springer. Boca Raton. 611p., 2016. [doi:10.1007/978-3-319-30394-9_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_19)
12. CLEMENTE, E.P.; SCHAEFER, C.E.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; OLIVEIRA, F.S.; ALVES, R.J.; MELO, V.F. Solos “Endêmicos” da Ilha da Trindade. Brasília: MMA, SBF, **Ilhas Oceânicas Brasileiras – da pesquisa ao Manejo**, p. 59-82, 2006.
13. CLEMENTE, E. D. P.; SCHAEFER, C. E. G., OLIVEIRA, F. S., ALBUQUERQUE FILHO, M. R., ALVES, R. V.; SÁ, M. M. MELO, V. D. F.; CORRÊA, G. R. Topossequência de solos na ilha da Trindade, Atlântico Sul. **Rev. Bras. de Ciênc. do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1357-1371. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500028>
14. COSTA, A.T.; CLAUDINO, S. V. “Os vulcões cearenses”. Gênese e Evolução dos Relevos Vulcânicos da Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. **Revista de Geografia** 37, p. 1-36., 2020
15. DUARTE, R. H.; HORTA, G. C. M. M. Barth e a ilha da Trindade, 1957-1959. **Hist. cienc. Saúde. Manguinhos**, 19: 951-968. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-59702012000300010>.
16. FIRME SÁ, M. M. **Caracterização Ambiental, Classificação e mapeamento dos Solos da Ilha da Trindade, Atlântico Sul**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 58p. 2010.
17. GARCIA, G. P. B. **Elaboração de mapas Geomorfológicos a partir de Modelos Digitais de Elevação**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, 138p. 2015.
18. GASPARINI, J. L. **Ilha da Trindade e Arquipélago Martin Vaz: pedaços de Vitória no azul atlântico**. Vitória, GSA. 100p, 2004.
19. GOMES, L.C., FARIA, R.M., de SOUZA, E., VELOSO, G.V., SCHAEFER, C.E.G.R., FILHO, E.I.F.,. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma** 340,337–350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>

20. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística **Manual técnico de geomorfologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, 182 p. 2009.
21. KUHN, M., Building predictive models in R using the caret package. **J. Stat. Softw.** 28, 1–26, 2008. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
22. MACHADO, R. L.; CAMPELLO, E. F. C.; RESENDE, A. S.; MENEZES, C. E. G.; SOUZA, C. M.; FRANCO, A. A. Recuperação de Voçorocas em Áreas Rurais. Seropédica: **Embrapa Agrobiologia**, 2006.
23. MACHADO, M. R. **Interação avifauna-substratos na Ilha de Trindade, Atlântico Sul, Brasil**. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Dissertação de mestrado, 92p. 2016.
24. MACHADO, M. de R., OLIVEIRA, F. S. de, SCHAEFER, C. E. G. R., & ALMEIDA, E. de P. C. Endemismo Pedológico e os Solos da Ilha da Trindade – Atlântico Sul, Brasil. **Revista Do Departamento De Geografia, (spe)**, 238-248, 2017. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132762>
25. MARQUES, C. P. M. **Hidrogeomorfologia da Ilha da Trindade: A única rede hidrográfica permanente nas ilhas oceânicas brasileiras**. Revista Brasileira de Geomorfologia. V.20, n.2. 2017. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1540>
26. MOHR, L. V.; CASTRO, J. W. A.; COSTA, P. M. S.; ALVES, R. J. V. **Ilhas Oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo – VII**. Brasília: MMA/Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2009.
27. MONTEIRO C. A., **Geossistema: a história de uma procura**, São Paulo. Contexto, 2001.
28. NOGUEIRA, G.; FREDERICA, J.; MARCHIORO, E. Análise morfométrica e morfológica da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 236-261., 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-49647>
29. OLIVEIRA, F. S. **Fosfatização em solo e rocha em ilhas oceânicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 115p., 2008.
30. PIRES, G. L. C., MANSUR, K. L., BONGIOLO, M. E. Geoconservação da Ilha da Trindade: Principais Aspectos e Potencial de Uso. **Anuário do Instituto de Geociências** 36: 96-104., 2013. http://dx.doi.org/10.11137/2013_2_96_104
31. PIRES, G.L.C.; BONGIOLO, E.M. The nephelinitic–phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): Review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. **Journal of South American Earth Sciences**, (72) 49:62., 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.008>
32. ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos Geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP**, nº 6, 17-29, 1992.
33. SCHAEFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, F. S. Brazil in the South Atlantic: The Fernando de Noronha and Trindade Archipelagos. In: Vieira, B. C.; Salgado, A.; Santos, L. (org.) **Landscapes and Landforms of Brazil**. 1ed. Netherlands: Springer, p. 65-78., 2015.
34. SOUZA, K. K. D.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Imagem de alta resolução como auxílio pré-campo: correlação entre resposta espectral e mineralogia das praias magnéticas da Ilha da Trindade - Atlântico Sul**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. São José dos Campos: Instituto de Pesquisas Espaciais. 2011.
35. TRICART, J.; CAILLEUX, A. Le problème de la classification des faits géomorphologiques. **Annales de Géographie**, 45:162-186., 1956.
36. VELTHEIM, R. V. **Geologia da ilha da Trindade**. Relatório prévio da Expedição João Alberto à ilha da Trindade. Rio de Janeiro: [s. n.], 1950.
37. VERONESI, F., HURNI, L., Random Forest with semantic tie points for classifying landforms and creating rigorous shaded relief representations. **Geomorphology** 224, 152–160. 2014 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.020>
38. ZHAO, W., XIONG, L., YANG, DING, H., TANG, G. an, Automatic recognition of loess landforms using Random Forest method. **J. Mt. Sci.** 14, 885–897, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11629-0>



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela Suplementar 1 – Quantificação da área ocupada e atributos morfométricos das geoformas da Ilha da Trindade mapeadas manualmente.

MAPA MANUAL													
Variáveis morfométricas		Feições Erosivas							Feições Agradacionais				
		Cristas	Platôs	Vertentes			Necks e Domos	Rampas em Tálus	Cones aluviais	Praias, dunas e lençóis de areia			Total
				Côncavas	Convexas	Retilíneas				Praias arenosas	Praias Seixos	Dunas e Lençóis de areia	
Área	m ²	424.914	41.301	3.885.141	2.634.798	458.288	420.891	1350731.26	700828	71.259	14.791	80.714	166.764
	km ²	0,42	0,04	3,89	2,63	0,46	0,42	135,073,126	0,70	0,07	0,01	0,08	0,1668
	% do total	4,16%	0,40%	38,03%	25,79%	4,49%	4,12%	13,14%	6,86%	0,70%	0,14%	0,79%	0,0163
Altitude (m)	Média	339,41	474,10	192,91	233,38	174,06	226,89	391,33	46,32	5,50	0,21	8,24	4,6528
	Minimo	2,20	370,90	0,00	0,00	0,00	128,74	272,42	1,80	1,80	0,00	0,00	0,0000
	Maximo	584,46	588,0	580,18	587,35	577,11	382,46	478,58	104,50	20,61	3,74	52,87	52,8700
Declividade (°)	Desvio P.	126,57	93,03	142,44	134,82	135,43	46,03	43,42	19,85	3,69	1,21	7,76	7,7600
	Média	38,52	9,40	33,15	35,67	23,96	57,63	38,79	23,01	5,65	7,48	7,01	6,7134
	Minimo	0,02	0,08	0,01	0,04	0,01	11,45	4,43	0,35	0,01	0,03	0,02	0,0100
Declividade (°)	Maximo	85,61	64,18	87,08	86,92	82,57	85,68	78,81	69,80	39,46	26,28	76,53	76,5300
	Desvio P.	16,82	7,29	16,70	16,68	13,75	14,69	13,46	13,19	4,69	5,23	9,79	9,7900

Tabela Suplementar 2 – Quantificação da área ocupada e atributos morfométricos das geoformas da Ilha da Trindade mapeadas utilizando técnicas de *machine learning*.

MAPA AUTOMATIZADO										
Variáveis morfométricas		Feições Erosivas					Feições Agradacionais			
		Cristas	Platôs	Vertentes			Necks e Domos	Rampas em Tálus	Cones aluviais	Praias, dunas e lençóis de areia
				Côncavas	Convexas	Retilíneas				
Área	m ²	621.225,33	270.770,51	2.964.843,12	2.825.489,96	627.007,76	414.473,37	1.197.615,36	711.547,94	414.576,32
	km ²	0,6212	0,2707	2,9648	2,8255	0,627	0,4145	1,1976	0,7115	0,4146
	% do total	6,1829	2,6949	29,5081	28,1212	6,2404	4,1251	11,9195	7,0818	4,1261
Altitude (m)	Média	350,24	468,00	195,80	227,36	104,01	180,63	172,21	39,45	4,45
	Minimo	17,67	134,16	0,00	0,00	0,00	3,49	3,37	0,00	0,00
	Maximo	573,38	588,02	526,69	587,11	519,03	440,33	561,55	212,98	88,00
Declividade (°)	Desvio P.	109,56	72,98	139,89	123,24	93,36	101,92	153,56	32,82	8,13
	Média	36,32	19,81	34,42	37,81	18,06	54,24	30,89	19,30	8,91
	Minimo	0,08	0,02	0,02	0,07	0,01	0,33	0,15	0,06	0,00
Declividade (°)	Maximo	85,59	81,04	88,14	86,16	68,49	88,36	80,71	78,80	76,53
	Desvio P.	15,20	14,08	15,86	15,99	12,37	17,38	12,55	11,57	10,04