

## Mapeamento espectral e distribuição de biocrostras em inselbergs: O caso do Serrote Muxió, Quixadá (Ceará)

Sebastián Isaías Jorge Muñoz Vásquez<sup>1\*</sup>, Mauricio Alejandro Perea-Ardila<sup>1</sup>, Rubson Pinheiro Maia<sup>2</sup>, Hudson Silva Rocha<sup>1</sup>, Antônia Beatriz Ferreira Andrade<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Campus Pici, Fortaleza, Brasil (geo.smunozv@gmail.com\*, mauricio.perea@alu.ufc.br, hudsonsrocha@gmail.com).

<sup>2</sup>Docente, Doutor, Universidade Federal do Ceará, Campus Pici, Fortaleza, Brasil (rubsonpinheiro@yahoo.com.br).

<sup>3</sup>Graduada, Licenciatura em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Campus Pici, Fortaleza, Brasil. (beatrizadrade501@gmail.com).

*Histórico do Artigo:* Submetido em: 28/12/2025 – Revisado em: 30/01/2026 – Aceito em: 23/03/2026

### RESUMO

As Crostas Biológicas do Solo (biocrostras) consistem em complexos de microrganismos que colonizam e habitam superfícies de rochas expostas. Devido à sua importância para a geomorfologia, dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados para monitorá-las em diferentes escalas espaciais. Este estudo teve como objetivo identificar e caracterizar espectralmente as biocrostras usando imagens de satélites de alta resolução no inselberg Serrote-Muxió, em Quixadá, Ceará. Foram utilizadas imagens de alta resolução, técnicas de interpretação visual e combinações espectrais para identificar a assinatura espectral das biocrostras, bem como os índices espectrais (CI e BSCI) para detecção e validação dos resultados. O estudo identificou duas biocrostras (amarelas - BA e pretas - BP) no inselberg, com assinaturas espectrais de baixa refletância na banda azul e alta na banda do infravermelho próximo (NIR) (0,276 para BP e 0,243 para BA). Os valores médios dos índices CI foram 0,69 para BA e 0,74 para BP, enquanto os valores BSCI foram 0,85 para BA e 0,96 para BP. No entanto, a validação mostrou baixa eficácia dos índices na detecção de biocrostras, sugerindo que seu uso em áreas semiáridas pode ser inadequado. Este estudo oferece uma base para futuras pesquisas em monitoramento de biocrostras em relevos graníticos como inselbergs.

**Palavras-Chaves:** Assinatura espectral; Brasil; Índice espectral; Refletância; Sensoriamento remoto.

### ABSTRACT

Biological soil crusts (biocrusts) are communities of microorganisms that inhabit large areas of soil and play a crucial role in ecosystem processes. Given their importance, remote sensing data have been employed to monitor them across different spatial scales. This study aimed to spectrally identify and characterize biocrusts using high-resolution satellite imagery in the Serrote-Muxió inselberg, located in Quixadá, Ceará, Brazil. High-resolution images, visual interpretation techniques, and spectral combinations were utilized to identify the spectral signatures of the biocrusts, as well as the spectral indices (CI and BSCI) for detection and validation of the results. The study identified two types of biocrusts (yellow BA and black BP) on the inselberg, with spectral signatures showing low reflectance in the blue band and high reflectance in the near infrared band (NIR) (0.276 for BP and 0.243 for BA). The mean CI index values were 0.69 for BA and 0.74 for BP, while the BSCI values were 0.85 for BA and 0.96 for BP. However, validation demonstrated low efficacy of the indices in detecting biocrusts, suggesting that their use in semi-arid areas may be inadequate. This study provides a foundation for future research on biocrust monitoring in granitic landforms such as inselbergs.

**Keywords:** Spectral signature; Brazil; Spectral index; Reflectance; Remote sensing.

Muñoz Vásquez, S. I. J., Perea-Ardila, M. A., Maia, R. P., Rocha, H. S., & Andrade, A. B. F. (2026). Mapeamento espectral e distribuição de biocrostras em inselbergs: O caso do Serrote Muxió, Quixadá (Ceará). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.7, n.1, p.34-48.



## 1. Introdução

As crostas biológicas do solo (biocrostas) estão presentes em diversas comunidades de plantas agrupadas em superfícies de solo ou rocha e são mais proeminentes em regiões áridas e semiáridas do mundo, onde a vegetação esparsa permite a colonização de grandes áreas (Belnap, 2005). As biocrostas são compostas principalmente de cianobactérias, fungos, líquens e algas. Elas cobrem, vários solos não alterados, geralmente protegendo as superfícies da erosão causada pelo fluxo do solo e pelos ventos (Allen, 2010; Belnap et al., 2001).

Os líquens, por exemplo, são visíveis a olho nu, em função das colorações de suas espécies. Os líquens saxícolas são especializados em colonizar rochas (Ricklefs, 2010) e ocupam porções da superfície rochosa de inselbergs graníticos, pois são adaptados a escassez de recursos em ambientes hostis (John; Dale, 1991). Configuram-se como uma associação entre fotobiontes (algas ou cianobactérias) e microbiontes (fungos), importantes para ecossistemas tropicais, como fonte de nitrogênio (Nash, 2008). Embora as biocrostas ocupem uma pequena porção da superfície, elas podem modificar as propriedades do solo e auxiliar em processos essenciais para o funcionamento dos ecossistemas, como a troca e o intercâmbio de gases, água e nutrientes (Alonso et al., 2014; Faist et al., 2021). Atualmente, as biocrostas cobrem cerca de 12% da superfície da Terra, mas espera-se que sua cobertura diminua de 25% a 40% nas próximas décadas devido a mudanças climáticas e pressões antropogênicas (Rodríguez-Caballero et al., 2018).

Os inselbergs são corpos rochosos côncavos-convexos, sendo isolados, agrupados ou fraturados, elevando-se abruptamente acima das planícies circundantes (Twidale; Vidal Romaní, 2005; Maia et al., 2015). Estes abrigam habitats únicos com uma variedade de espécies de plantas e animais (Cavalcante et al., 2023), incluindo uma diversidade de biocrostas, dando à rocha uma cor característica (Oliveira et al., 2024). No entanto, o conhecimento sobre a ecologia dos inselbergs necessita de avanços (Porembski, 2007), principalmente para ambientes secos (Borges Neto et al., 2025).

Logo, a identificação e a caracterização das biocrostas em diferentes paisagens continuam sendo um desafio significativo para os cientistas, uma vez que a quantificação das contribuições das biocrostas para o funcionamento do ecossistema é pouco explorada quando associada aos estudos geomorfológicos (Havrilla et al., 2020). No entanto, o sensoriamento remoto tem a capacidade de detectar e mapear a distribuição das biocrostas, o que oferece a oportunidade de ampliar os estudos ecológicos em locais específicos e reduz o tempo e os custos, associados aos estudos de campo que, às vezes, limitam os objetivos estabelecidos (Karnieli et al., 2001; Wang et al., 2023).

Diferentes índices espectrais foram propostos para a identificação das biocrostas. Karnieli (1997), por exemplo, baseou o seu trabalho na observação de que a existência de cianobactérias em biótopos resulta em uma maior reflectância na parte azul do espectro eletromagnético. Os resultados dessa ideia foi o Índice de Crosta Espectral (CI - *Crust Index*), capaz de distinguir entre amostras com crosta e sem crosta em testes de laboratório e de ser usado por qualquer sensor que fornece bandas espectrais nas faixas azul e vermelha (Weber & Hill, 2016).

Além disso, Chen et al. (2005) criaram um Índice Biológico de Crosta do Solo (BSCI - *Biological Soil Crust Index*) usando como base a reflectância nas faixas verde, vermelha e infravermelha próxima do espectro eletromagnético. A base da BSCI é demonstrar que a reflectância vermelha das biocrustações será consideravelmente menor do que a da areia exposta, do material vegetal seco ou da vegetação fotossintética, resultando em um melhor desempenho (Weber & Hill, 2016). Ambos os índices, usando imagens LANDSAT TM, distinguem áreas com biocrostas. O primeiro se concentra em cianobactérias, detectando sua alta refletância azul devido à ficobilina, enquanto o BSCI usa a inclinação verde-vermelha para diferenciar líquens de outros elementos (Alonso et al., 2014).

Embora esses índices tenham permitido avanços na identificação das biocrostas em diferentes paisagens, ainda não há estudos comparativos sobre sua eficácia na identificação de diferentes tipos de biocrostas em ecossistemas altamente heterogêneos, como os que compõem os inselbergs, onde as biocrostas são parte

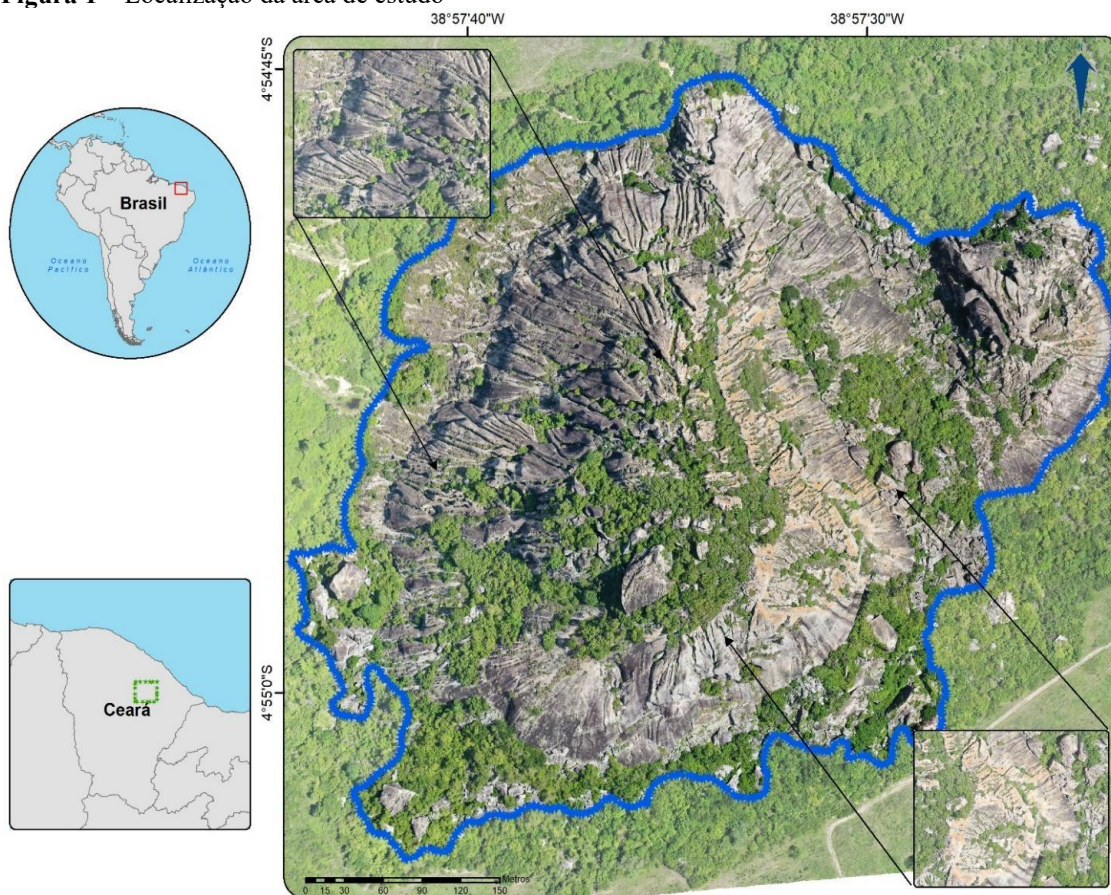
fundamental de sua estrutura. Portanto, é fundamental avaliar o desempenho desses índices em condições de alta heterogeneidade do dossel (Alonso et al., 2014), como as típicas de ecossistemas semiáridos e campos de inselberg. Apesar dos avanços na detecção de biocrostras em solos arenosos, permanece incerta a aplicabilidade desses índices em substratos graníticos com alta mistura espectral e microtopografia complexa, como os inselbergs do Nordeste brasileiro.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi mapear e caracterizar espectralmente as biocrostras usando imagens de satélite de alta resolução espacial no semiárido brasileiro, especificamente no campo de Inselbergs de Quixadá, Ceará - Brasil. Em particular, esse trabalho incluiu o uso de imagens de alta resolução (ortofoto de alta resolução e uma imagem PlanetScope), o uso de índices espectrais para biocrostras (CI e BSCI), bem como a validação dos resultados por meio de uma matriz de validação em relação ao desempenho de cada índice. Espera-se que os resultados deste estudo sejam uma referência para pesquisas futuras que abordem o monitoramento por sensoriamento remoto de biocrostras em regiões com alta concentração de inselbergs.

## 2. Área de Estudo

O estudo foi realizado no Campo de Inselbergs de Quixadá, região central do estado do Ceará, Nordeste Setentrional do Brasil (Figura 1).

**Figura 1** – Localização da área de estudo



*Nota.* Mapa de localização do Brasil (canto superior esquerdo), com destaque para o estado do Ceará (canto inferior esquerdo), onde está demarcada a área de estudo. À direita, está representado o inselberg Serrote Muixo.

O clima é semiárido (Muniz et al., 2017), com temperaturas médias anuais entre 26 e 29 °C e amplitudes de 21°C a 34°C (INMET, 2023). A média anual da precipitação gira em torno de 750 mm (FUNCEME, 2023), concentrada entre fevereiro e maio. A principal rede de drenagem corresponde à sub-bacia do rio Banabuiú, densa e de rios intermitentes (Cogerh, 2023). Predomina a vegetação do tipo savana-estépica (caatinga) (Paulino et al., 2018), sustentada por associações de Planossolos, Neossolos Litólicos, Vertissolos, Argissolos e Luvisolos (Santos et al., 2011), em geral rasos e com drenagem imperfeita (Santos et al., 2013).

Geologicamente, esses inselbergs estão associados ao Plúton Quixadá (Província Borborema) (Vauchez, et al., 1995; Almeida, et al. 2000). O Plutón Quixadá é um corpo intrusivo neoproterozóico (Suíte Intrusiva Itaporanga), composto, em sua maioria, por granodioritos, sienogranitos, monzonitos, monzogranitos, de granulação grossa e textura porfírica (Almeida, 1995; Pinéo et al., 2020). O terreno encontra-se na Superfície Sertaneja 1, com topografia plana a suavemente ondulada, entre 50 a 250 m de altitude (Costa et al., 2020), onde emergem os inselbergs em função do substrato mais resistente.

O inselberg selecionado para o estudo é denominado como Serrote Muxió, em razão da representatividade e fácil acesso. Está localizado ao norte do Plutón Quixadá (38°57'34,513" W; 4°54'54,576" S), à margem da rodovia BR-122, a 160 km da capital cearense. Possui uma altitude máxima de 332 m, com escarpas íngremes e uma área aproximada de 23,3 ha (Gomes, 2023). Segundo a classificação morfológica de Maia et al. (2015), este inselberg se caracteriza como Tipo 2 - Inselberg de fraturamento, devido a predominância de feições de fraturamento em toda a sua extensão. Os tafoni de colapso e as rampas de tálus também são importantes para a caracterização desse tipo de inselberg. Porém, há uma limitada presença de feições de dissolução, como caneluras (karrens) e bacias de dissolução (gnammas).

Ademais, no topo do inselberg há pouca presença de vegetação, sendo evidente a existência das biocrostas de distintas colorações, como os líquens nas escarpas. É observado ainda uma maior concentração de vegetação arbórea no setor sul do inselberg junto aos blocos colapsados em sua base, devido à disposição de um ambiente propício para a formação de solos mais desenvolvidos como sombra e acúmulo de água. Já nos setores leste e oeste da escarpa é predominante uma vegetação arbustiva ao longo das áreas de fraturas.

### 3. Material e Métodos

#### 3.1. Caracterização das biocrostas:

##### 3.1.1. Imagens de alta resolução espacial

Uma imagem multiespectral PlanetScope Ortho Scene foi baixada (<https://www.planet.com/explorer/>) do sensor PSB.SD com resolução espacial de 3 m e no nível de processamento 3B (Tabela 1). Essas imagens foram organizadas no nível de refletância da superfície (Equação 1). Os dados do satélite PlanetScope compreendem oito bandas ortorretificadas, corrigidas geométrica e radiometricamente e ajustadas à atmosfera (PLANET, 2019; Roy et al., 2021).

$$REF_{(i)} = DN_{(i)} * reflectanceCoefficient(i) \quad (1)$$

Onde:

DN(i): Número de pixel digital

reflectanceCoefficient(i): o coeficiente de reflexão dos metadados para cada banda.

Uma ortofoto registrada por um drone DJI Phantom4 com resolução espacial de menos de 30 cm foi tirada em 01/03/2024, coincidindo com a data da imagem de satélite. Foi obtido um modelo de elevação digital

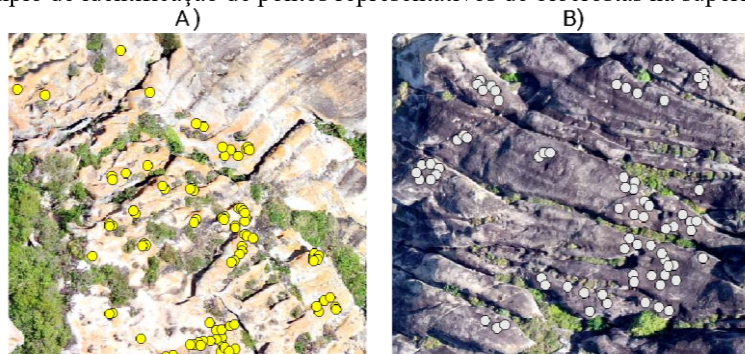
ALOS-PALSAR com resolução espacial de 12,5 m, a partir do qual as inclinações do inselberg em graus foram extraídas e acessadas por meio do Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>).

**Tabela 1** – Parâmetros técnicos das imagens do PlanetScope.

Atributo		PlanetScope	
ID	20240301_125714_67_2461		
Data	07/11/2022		
Nuvens	0%		
Ângulo solar	62°		
EPSG	31984: SIRGAS 2000 UTM Zona 24S		
Banda	Nome de banda	longitude de onda (nm)	
1	Azul costeiro	431 – 452	
2	Azul	465 – 515	
3	Verde 1	513 – 549	
4	Verde	547 – 583	
5	Amarelo	600 – 620	
6	Vermelho	650 – 680	
7	Borda vermelho	697 – 713	
8	NIR (Infravermelho próximo)	845 – 885	

Os elementos presentes na rocha, sendo eles granito, biocrosta amarela (BA), biocrosta preta (BP) e vegetação, foram identificados visualmente na imagem do drone e, por meio de composições espectrais de cor verdadeira (RGB 642) e infravermelho (RGB 864), as características espectrais dos diferentes elementos da rocha foram identificadas e aprimoradas. Além disso, uma amostra de 500 pontos (Figura 2) foi gerada para cada elemento com a ajuda da imagem do drone (2000 pontos no total) para extrair os valores espectrais de cada banda e fazer a assinatura espectral média.

**Figura 2** – Exemplo de identificação de pontos representativos de biocroistas na superfície do inselberg.



*Nota.* A) biocroistas amarelas e B) biocroistas pretas.

### 3.1.2. Índices para a mapeo das biocrostras

Os índices foram calculados a partir das bandas de imagem do PlanetScope. Foi usado o Índice Espectral da Crosta (CI) com base na diferença normalizada entre os valores espectrais vermelho e azul (equação 1). Foi demonstrado que o CI pode ser usado para identificar e mapear várias unidades morfológicas de litologia a partir de imagens de sensoriamento remoto (Karnieli, 1997). O índice biológico da crosta do solo (BSCI) baseia-se na diferença de refletância entre as regiões verde e vermelha (equação 2). Esse índice determina as áreas em que a cobertura de líquen excede 30% usando imagens de sensoriamento remoto (Chen et al., 2005).

$$CI = 1 - \frac{\rho_{Vermelho} - \rho_{Azul}}{\rho_{Vermelho} + \rho_{Azul}} \quad (2)$$

$$BSCI = 1 - \frac{L(\rho_{Vermelho} - \rho_{Verde})}{\rho_{virmidia}} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{Vermelho}$ : Banda de vermelha PlanetScope.

$\rho_{Azul}$ : banda azul do PlanetScope.

$\rho_{Verde}$ : banda verde do PlanetScope.

L: parâmetro de ajuste nesse caso, aplico um valor de 2

$\rho_{virmidia}$ : refletância média das bandas vermelha, verde e infravermelha próxima.

Para a extração das biocrostras, uma nova amostra de 500 pontos aleatórios foi retirada para cada biocrosta (BA e BP 1000 no total) para determinar as estatísticas descritivas (mínimo, máximo, média e SD) com base nos valores de ambos os índices.









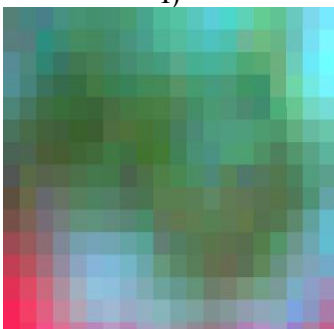

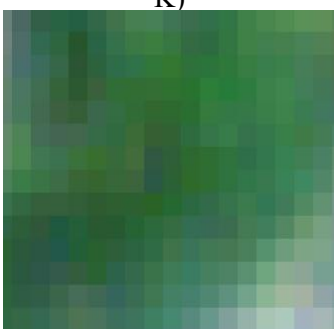
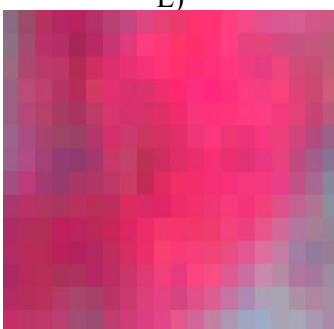



## 4. Resultados

### 4.1. Identificação das biocrostras:

Foi estabelecido um limite em que o valor médio do índice mais ou menos o SD foi considerado para definir um polígono de identificação. Cada índice foi avaliado usando uma matriz de confusão para calcular medidas gerais de confiabilidade, incluindo erros de comissão, omissão e precisão geral (Congalton & Green, 2008).

O granito exposto foi identificado na rocha por meio de tons brancos e textura fina, localizado nas escarpas dos inselbergs ou áreas com alto fluxo de água devido à ação do declive ( $4 \pm 40,87^\circ$ ) (Tabela 2A). Na composição de cor verdadeira o granito exposto apresenta tons brancos (Tabela 2B) e na composição infravermelha pode-se observar que o granito apresenta tons azuis-claros conforme o grau de exposição (Tabela 2C).

**Tabela 2 – Interpretação visual da cobertura da terra no Serrote Muxió**

Cobertura	Escala da ortofoto 1:600	PlanetScope RGB642	PlanetScope RGB864
Granito	<p data-bbox="499 314 531 336">A)</p> 	<p data-bbox="863 314 895 336">B)</p> 	<p data-bbox="1233 314 1265 336">C)</p> 
	<p data-bbox="499 676 531 697">D)</p> 	<p data-bbox="863 676 895 697">E)</p> 	<p data-bbox="1233 676 1265 697">F)</p> 
	<p data-bbox="499 1038 531 1059">G)</p> 	<p data-bbox="863 1038 895 1059">H)</p> 	<p data-bbox="1233 1038 1265 1059">I)</p> 
	<p data-bbox="499 1400 531 1421">J)</p> 	<p data-bbox="863 1400 895 1421">K)</p> 	<p data-bbox="1233 1400 1265 1421">L)</p> 
Vegetação	<p data-bbox="499 1410 531 1432">J)</p> 	<p data-bbox="863 1410 895 1432">K)</p> 	<p data-bbox="1233 1410 1265 1432">L)</p> 

A BA está localizada onde as encostas estão entre  $(15 \pm 46,19^\circ)$  (Tabela 2D). Na cor real, elas apresentam tons amarelos claros com uma textura fina com uma mistura de pixels de solo exposto (Tabela 2E). Na composição infravermelha, alguns tons amarelos podem ser observados, mas a mistura com tons azuis dificulta a distinção (Tabela 2F).

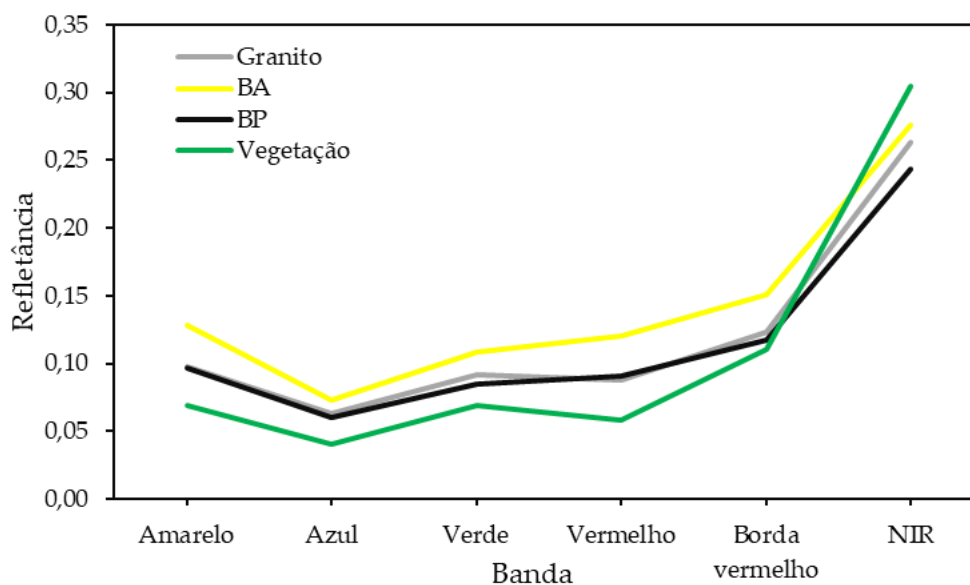
O BP está localizado em declives que podem estar entre  $2,91 \pm 52,43$ , originalmente sua cor é preta com uma textura média grossa (Tabela 2G). No entanto, na imagem em cores reais, ela tende a ser observada em tons de roxo escuro/magenta (Tabela 2H), enquanto no infravermelho ela pode ser observada em tons de verde-escuro (Tabela 2I).

A vegetação tende a se localizar em áreas mais rebaixadas que podem suportar árvores encontradas em declives entre  $3,33 \pm 55,28^\circ$  (Tabela 2J). A composição da cor real apresenta tons de verde-escuro com uma textura grosseira (Tabela 2K). O infravermelho mostra a vegetação em tons de vermelho, o que facilita a identificação (Tabela 2K).

#### 4.2. Caracterização das biocrostas:

Os diferentes revestimentos apresentaram comportamentos espectrais semelhantes, mas com algumas particularidades que nos permitem diferenciá-los uns dos outros. O granito e a BA obtiveram uma resposta espectral semelhante (Figura 3).

**Figura 3** – Assinatura espectral dos elementos do Serrote-Muxió.



A diferença mais representativa é que o BP na banda NIR obtém uma refletância de 0,243, valor inferior ao do granito, que foi de 0,276. Por outro lado, o BA apresenta uma alta refletância na banda amarela e no NIR (valor de 0,128 e 0,276, respectivamente), mas absorve energia no azul (0,073). A assinatura da vegetação se assemelha ao comportamento típico em que há uma absorção no vermelho e uma alta refletância da banda Borda vermelho e NIR (valor de 0,111 e 0,304, respectivamente).

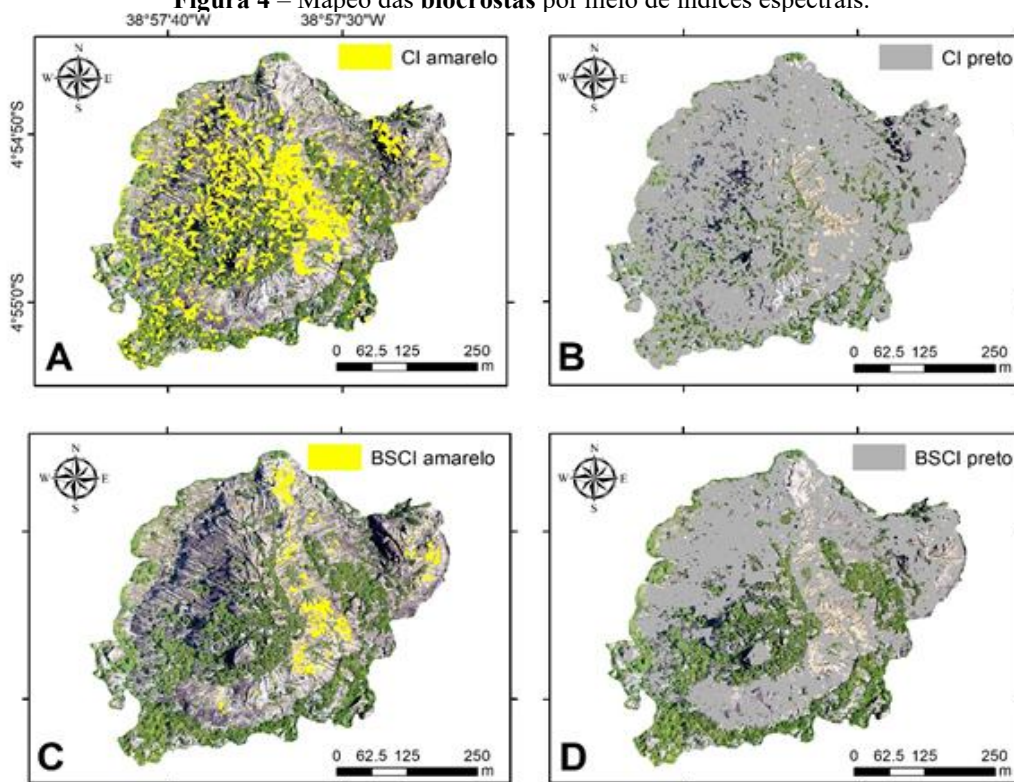
Particularmente, o BSCI obteve valores mais altos em relação aos valores de CI (Tabela 3). Para CI e BSCI, as biocrostas obtiveram um valor médio de  $[0,69 - 0,74]$  e  $[0,85 - 0,96]$  para BA e BP, respectivamente. Isso permite diferenciar as biocrostas das outras coberturas.

**Tabela 3** – Valores dos índices espectrais para identificação das biocrostras.

Índice	Cobertura	Mínimo	Máximo	Média	SD
CI	Granito	0,68	0,90	0,77	0,04
	BA	0,62	0,77	0,69	0,03
	BP	0,56	0,86	0,74	0,04
	Vegetação	0,60	0,88	0,76	0,04
BSCI	Granito	0,76	1,39	1,04	0,12
	BA	0,68	1,04	0,85	0,06
	BP	0,80	1,16	0,96	0,06
	Vegetação	0,87	1,38	1,14	0,10

Visualmente, observou-se que os BA estão localizados no centro-leste do inselberg, formando um pequeno agrupamento desses elementos (Figura 4A). Líquens pretos densos estão localizados principalmente a noroeste e ao sul, distribuídos de forma heterogênea na rocha. Porém, para o índice CI a detecção de líquenes foi mais ampla, cobrindo mais área no mapa (Figura 4B). Da mesma forma, neste índice o BP cobriu mais área identificada na imagem original (Figura 4C).

O índice BSCI, por outro lado, conseguiu se aproximar da distribuição original do BA, porém, visualmente apresentou menos polígonos erráticos do que o CI (Figura 5D). Da mesma forma, o BSCI conseguiu se aproximar visualmente da distribuição original dos BPs seguindo um padrão de distribuição mais aceitável do que o CI (Figura 4D).

**Figura 4** – Mapeo das biocrostras por meio de índices espectrais.

O índice CI obteve uma precisão geral de 72%, no entanto, classificou corretamente 54% dos BA (Tabela 4).

**Tabela 4** – Matriz de validação do índice das biocrostras.

		<b>Cobertura</b>	<b>BA</b>	<b>BP</b>	<b>Exatidão</b>
Índice	CI	BA	270	223	54%
		BP	230	117	23,4%
	Exatidão geral				72,7%
	BSCI	Cobertura	BA	140	14
BP			112	345	69%
Exatidão geral				59,6%	

Por outro lado, apenas 23% estavam corretos para PA, dos quais 340 não foram identificados. Da mesma forma, o índice BSCI obteve uma precisão geral de 59,6%, o BA obteve uma precisão de 29%, enquanto o BP obteve 69%. No entanto, 111 foram omitidos na identificação.

## 5. Discussão

A distribuição espacial das biocrostras associa-se aos atributos da superfície rochosa, que pode ser detectada e analisada por técnicas de sensoriamento remoto. Estes atributos, como declives acentuados, textura da superfície (grau de intemperismo), temperatura e disponibilidade de luz e umidade, possuem forte correlação com a ocorrência de algumas espécies (Bjelland, 2003; Costas et al., 2021), podendo influenciar diretamente a resposta espectral dessas superfícies. Algumas feições presentes em inselbergs graníticos podem oferecer condições propícias para a instalação das biocrostras, como as caneluras. As caneluras (karrens) são sulcos com seção transversal em U, provenientes da dissolução química em ambientes carbonáticos e desenvolvidas em superfícies inclinadas e verticais, porém com feições similares em granitos (Migón, 2006; Travassos, 2019). Nas escarpas dos inselbergs, elas tornam-se responsáveis pela organização do sistema radial centrífugo difuso da drenagem pluvial (Santos et al., 2024), gerando micro-habitats (drainage channel) (Paulino et al., 2018; Porembski, 2007). Esses micro-habitat, por concentrarem umidade, podem ser determinantes na colonização das biocrostras, o que se reflete em padrões espectrais distintos. Cáceres et al. (2017) demonstrou que em Quixadá os líquens colonizam canais de escoamento de água que são umedecidos periodicamente. Desse modo, técnicas de sensoriamento como a apresentada acima, permitem identificar e mapear biocrostras e feições geomorfológicas associadas, conforme evidenciado por Aristizábal-Botero et al. (2021) com o uso de UAV (Unmanned Aerial Vehicle) e a aplicação de índices espectrais do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

As imagens de alta resolução espacial usadas neste estudo permitiram o mapeo e a caracterização de biocrustações. Essas abordagens foram utilizadas por diferentes autores em ecossistemas semiáridos usando imagens multiespectrais (Chen et al., 2005; Havrilla et al., 2020; Karnieli, 1997). Na interpretação visual das coberturas presentes na área de estudo, a ortofoto obtém características superiores em relação à imagem PlanetScope. Entretanto, esses resultados mostram o potencial do uso de imagens PlanetScope para identificar padrões de cobertura da terra em diferentes combinações espectrais, fornecendo assim uma referência para a visualização com imagens multiespectrais de alta resolução espacial. Imagens de alta resolução são raramente usadas para realizar tais estudos (Rautiainen et al., 2024).

Por outro lado, conforme observado na caracterização da assinatura espectral, as coberturas analisadas obtiveram respostas espectrais diferentes. Isso demonstra o potencial do sensoriamento remoto para informar

como as espécies de biocrustes se comportam espectralmente para distinguir as características de uma determinada espécie (Baxter et al., 2021). Neste estudo, observou-se que a BA e a BP apresentaram uma baixa reflectância em torno de 465-515 nm (banda azul), o que coincide com o relatado por Weber et al. (2008) em características de absorção de reflectância para biocrostas. O BP se distingue por ter uma cor escura, o que contribui para a redução da reflectância espectral em relação ao BA (Wang et al., 2023).

Por outro lado, o granito e o BP apresentaram uma curva espectral semelhante com baixa refletividade na banda azul, mas com um aumento gradual da refletividade em direção à banda NIR, coincidindo com o que foi relatado por Alonso et al. (2014). Observou-se que tanto a BA quanto a BP podiam ser diferenciadas espectralmente com base em sua assinatura espectral. No entanto, as possíveis causas da variação nas características espectrais das biocrustações também podem ser exploradas mais a fundo, considerando sua cor, composição, espécie, habitat (ensolarado ou sombreado), teor de umidade e forma de crescimento (Rautiainen et al., 2024).

Ao analisarmos a divergência entre o CI e o BSCI, nossos resultados corroboram as limitações discutidas por Alonso et al. (2014) em ecossistemas semiáridos. Observou-se que, embora o CI tenha sido originalmente concebido para a detecção de cianobactérias em solos arenosos, sua aplicação sobre as superfícies graníticas de Quixadá resultou em uma superestimação das áreas de biocrostas, gerando polígonos erráticos que extrapolam a cobertura real observada em campo. Por outro lado, a acurácia de 69% obtida pelo BSCI para as biocrostas pretas (BP) aproxima-se dos achados de Weber et al. (2008), com valor de 0.8%. Isso sugere que a coloração escura dessas comunidades auxilia na redução da reflectância espectral, facilitando a diferenciação por meio de índices que exploram a inclinação entre o verde e o vermelho. No entanto, a baixa performance global de ambas as métricas reforçam que a heterogeneidade espacial dos inselbergs e a complexidade espectral das comunidades saxícolas impõem desafios que os índices tradicionais não suprem totalmente. Fica evidente, portanto, a necessidade de algoritmos específicos que considerem a assinatura do substrato rochoso subjacente para este tipo de relevo.

O valor médio do índice CI está abaixo do relatado por Alonso et al. (2014) de 0.81. No entanto, o BSCI estava dentro da banda relatada pelo mesmo autor na identificação de biocrostas. Tanto o CI quanto o BSCI podem, teoricamente, ser distinguidos de outros tipos de cobertura. Ao analisar os resultados da validação, foi possível observar que o CI teve um desempenho ruim na identificação de biocrostas, o que é verificado visualmente quando os polígonos identificados como biocrostas aparecem fora da faixa real de cobertura. Os valores na validação do CI estavam abaixo dos relatados por Alonso et al. (2014), de 90.2. Da mesma forma, embora o BSCI tenha seguido visualmente um padrão semelhante ao da distribuição de biocrostas, somente os BPs obtiveram 69% de pontuação na identificação, esse valor de validação foi 0,8% acima do relatado por Alonso et al. (2014)

Apesar disso, esses índices de detecção de biocrostas não geraram resultados satisfatórios aos esperados. Mesmo com o uso de imagens multiespectrais de alta resolução, estudos como o de Alonso et al. (2014) e Weber et al. (2008) demonstram o baixo desempenho desses índices para a identificação de biocrostas usando dados de sensoriamento remoto. Embora os índices propostos por Chen et al. (2005) e Karnieli (1997) em aplicação de imagens Landsat obtivessem bons resultados em outros locais, no caso de ambientes semiáridos o desempenho não é satisfatório. No futuro, os recursos relacionados à complexidade espectral, à similaridade espectral e à heterogeneidade espacial de diferentes coberturas de terra devem ser levados em consideração (Alonso et al., 2014; Escribano et al., 2010; Weber et al., 2008).

Esses resultados permitem estudos mais especializados, incluindo trabalho de campo, análise ambiental (condições climáticas) com espectrorradiômetros, uso de imagens multiespectrais e hiperespectrais para gerar novos índices espectrais e aprender sobre o papel das biocrostas em ambientes tropicais semiáridos (Chen et al., 2020; Weber et al., 2008; Weber; Hill, 2016). Espera-se que os resultados deste estudo sirvam de referência para pesquisas futuras sobre o monitoramento de biocrostas com sensoriamento remoto em áreas com alta concentração de inselbergs no semiárido brasileiro.

## 6. Conclusão

A análise das biocrostras no campo de inselbergs de Quixadá revelou uma aplicabilidade direta para a geomorfologia, especialmente mapear as feições responsáveis por escoar água e reter umidade, uma vez que se tornam micro-habitats propícios para a colonização especialmente de líquens. Outra aplicabilidade é compreender como a colonização de biocrostras atuam distintamente no processo de intemperismo, através da fixação e produção de ácidos orgânicos, e conseqüentemente, como atuam no modelado de inselbergs. E por último, podem contribuir na avaliação da estabilidade das escarpas, uma vez que, como foi observado, a sua ausência pode ser interpretada como um indicador de ritmos erosivos acelerados (colapsos constantes de blocos), onde a dinâmica de denudação impede o tempo necessário para a colonização biológica.

No que diz respeito à detecção remota, e apesar de ter contado com imagens de alta resolução espacial do PlanetScope, concluímos que os índices CI e BSCI não foram totalmente eficazes para identificar as biocrostras neste ambiente semiárido. O desempenho inferior desses índices, em comparação com outros estudos, evidencia que a complexidade espectral e a heterogeneidade das superfícies graníticas devem ser integradas de forma mais robusta nos modelos de detecção. O índice BSCI demonstrou uma precisão mais aceitável para as biocrostras negras (BP), alcançando um 69% de exatidão, a superestimação de áreas por parte do CI nos avisa sobre a necessidade de ser cauteloso ao aplicar as especificações descritas originalmente para solos arenosos em contextos de rocha exposta.

Por isso, consideramos importante que futuras investigações integrem o trabalho de campo e a análise com espectrorradiômetros junto ao sensoriamento remoto multiespectral e hiperespectral. O desenvolvimento de novos índices específicos para ambientes tropicais semiáridos no nordeste brasileiro não permitirá apenas uma compreensão mais profunda do papel biogeomorfológico das biocrostras, mas garantirá um monitoramento preciso desses ecossistemas vitais nas paisagens de inselbergs brasileiros.

## 7. Referências

- Allen, C. (2010). Biogeomorphology and biological soil crusts: A symbiotic research relationship. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 16(4), 347–358. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.8071>
- Almeida, A. R. (1995). *Petrologia e aspectos tectônicos do Complexo Granítico Quixadá-Quixeramobim - CE* [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].
- Almeida, F. F. M., Brito Neves, B. B., & Carneiro, C. D. R. (2000). The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, 50(1-2), 77-111. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00072-0)
- Alonso, M., Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S., Escribano, P., & Cantón, Y. (2014). Evaluación de los diferentes índices para cartografiar biocrostras a partir de información espectral. *Revista de Teledetección*, 42, 79-98. <https://doi.org/10.4995/raet.2014.2317>
- Aristizábal-Botero, A., Páez-Pérez, D., Realpe, E., & Vanschoenwinkel, B. (2021). Mapping microhabitat structure and connectivity on a tropical inselberg using UAV remote sensing. *Progress in Physical Geography*, 45(3), 427-445. <https://doi.org/10.1177/0309133320964327>
- Baxter, C., Mallen-Cooper, M., Lyons, M. B., & Cornwell, W. K. (2021). Measuring reflectance of tiny organisms: The promise of species level biocrust remote sensing. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(11), 2174-2183. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13690>
- Belnap, J. (2005). Crusts/Biological. In J. Hatfield, D. Powlson, C. Rosenzweig, K. Scow, M. Singer, & D.

- Sparks (Eds.), *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 339–346). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.017>
- Belnap, J., Büdel, B., & Lange, O. L. (2001). Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. In J. Belnap & O. L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 3–30). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_1)
- Bjelland, T. (2003). The influence of environmental factors on the spatial distribution of saxicolous lichens in a Norwegian coastal community. *Journal of Vegetation Science*, 14(4), 525–534. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02179.x>
- Borges Neto, I. O., Santos, L. J. C., Souza, J. L. L., Souza, B. I., Xavier, R. A., Salvador, M. S. S., & Lima, V. R. P. (2025). Literature Review of Relief-Soil-Plant Interaction in Rock Outcrops. *Sociedade & Natureza*, 37(1). <https://doi.org/10.14393/SN-v37-2025-75884>
- Cavalcante, L. M., Costa, L. J. S., Bezerra, J. M., Araújo, M. F., Brito Júnior, L., Oliveira Filho, A. A., & Rêho, V. G. S. (2023). Biodiversidade e antropismo em inselbergues como instrumento de Educação Ambiental e sustentabilidade. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 18(5), 39-60. <https://doi.org/10.34024/revbea.2023.v18.14472>
- Chen, J., Zhang, Y. M., Wang, L., Shimazaki, H., & Tamura, M. (2005). A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas. *Remote Sensing of Environment*, 96(2), 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.02.011>
- Chen, X., Wang, T., Liu, S., Peng, F., Kang, W., Guo, Z., Feng, K., Liu, J., & Tsunekawa, A. (2020). Spectral response assessment of moss-dominated biological soil crust coverage under dry and wet conditions. *Remote Sensing*, 12(7), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs12071158>
- COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. (2023). Região Hidrográfica da Bacia Banabuiú [Mapa]. [http://atlas.cogerh.com.br/cogerh/imgAtlas?pathImagem=/imagensTemas/54\\_7381\\_BANABUIU.jpg](http://atlas.cogerh.com.br/cogerh/imgAtlas?pathImagem=/imagensTemas/54_7381_BANABUIU.jpg)
- Costa, L. R. F., Maia, R. P., Barreto, L. L., & Claudino-Sales, V. C. (2020). Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(1), 185-208. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1447>
- Costas, S. M., Canton, N., & Rodríguez, J. M. (2021). The relative effect of altitude and aspect on saxicolous lichen communities at mountain summits from central-west of Argentina. *Rodriguesia*, 72, 1-11. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202172064>
- Cáceres, M. E. S., Mota, N., Santos, L. A., Pereira, T. A., & Aptroot, A. (2017). New records to Brazil and Southern Hemisphere of corticolous and saxicolous lichens from the semiarid region in Ceará State. *Iheringia - Serie Botanica*, 72(2), 239-245. <https://doi.org/10.21826/2446-8231201772210>
- Escribano, P., Palacios-Orueta, A., Oyonarte, C., & Charbrillat, S. (2010). Spectral properties and sources of variability of ecosystem components in a Mediterranean semiarid environment. *Journal of Arid Environments*, 74(9), 1041–1051. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.02.001>
- Faist, A. M., Antoninka, A. J., Barger, N. N., Bowker, M. A., Chaudhary, V. B., Havrilla, C. A., Huber-Sannwald, E., Reed, S. C., & Weber, B. (2021). Broader impacts for ecologists: Biological Soil Crust as a model system for education. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1–6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.577922>
- FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. (2023). Chuva média do ano por município – 2023. <http://www.funceme.br/apppalendarario/ano/municipios/media/2023>

- Gomes, E. M. (2023). Mapeamento dos inselbergs em Quixadá e Quixeramobim, Ceará: Padrões morfológicos e distribuição [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará]. Repositório Institucional da UFC. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75050>
- Havrilla, C. A., Villareal, M. L., DiBiase, J. L., Duniway, M. C., & Barger, N. N. (2020). Ultra-high-resolution mapping of biocrusts with Unmanned Aerial Systems. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(4), 441–456. <https://doi.org/10.1002/rse2.180>
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. (2023). Banco de Dados Meteorológicos do INMET. <https://bdmep.inmet.gov.br/>
- John, E., & Dale, M. R. T. (1991). Determinants of spatial pattern in saxicolous lichen communities. *The Lichenologist*, 23(3), 227–236. <https://doi.org/10.1017/S0024282991000397>
- Karnieli, A. (1997). Development and implementation of spectral crust index over dune sands. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1207–1220. <https://doi.org/10.1080/014311697218368>
- Karnieli, A., Kokaly, R. F., West, N. E., & Clark, R. N. (2001). Remote Sensing of Biological Soil Crusts. In J. Belnap & O. L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management* (pp. 431–455). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_31)
- Maia, R. P., Bezerra, F. H. R., Nascimento, M. A. L., Castro, H. S., Meireles, A. J. A., & Rothlis, L. M. (2015). Geomorfologia do campo de inselbergs de Quixadá, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 16(2), 239-235. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i2.651>
- Migoñ, P. (2010). *Geomorphological Landscapes of the World*. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3055-9>
- Migoñ, P., & Maia, R. P. (2020). Pedra da Boca, Pai Mateus, and Quixadá—Three Possible Key Geoheritage Sites in Northeast Brazil. *Geoheritage*, 12(3), 51. <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00473-4>
- Muniz, L. F., Pereira, J. M. R., Ximenes Júnior, C. L., & Studart, T. M. de C. (2017). Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54608>
- Nash, T. H. (2008). *Lichen biology* (2.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press.
- Oliveira, M. F., Figueredo, C. C., Hirayama, A., & Maciel-Silva, A. S. (2024). A first evaluation of biological soil crusts diversity in three distinctive rocky outcrops in Brazil. *Flora*, 320, 152613. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2024.152613>
- Paulino, R. C., Gomes, V. S., & Silveira, A. P. (2018). Flora de inselbergues do monumento natural monólitos de Quixadá, no sertão central do Ceará. *Iheringia - Serie Botanica*, 73(2), 182–190. <https://doi.org/10.21826/2446-8231201873110>
- Pinéo, T. R. G., Palheta, E. S. M., Costa, F. G., Vasconcelos, A. M., Gomes, I. P., Gomes, F. E. M., Bessa, M. D. M. R., Lima, A. F., Holanda, J. L. R., & Freire, D. P. C. (2020). Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará: Escala 1:500.000. CPRM. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20418>
- PLANET - Planet Imagery Product Specifications (2019). <https://assets.planet.com/docs/combined-imagery-product-spec-april-2019.pdf>
- Porembski, S. (2007). Tropical inselbergs: Habitat types, adaptive strategies and diversity patterns. *Revista Brasileira de Botanica*, 30(4), 579–586. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042007000400004>
- Rautiainen, M., Kuusinen, N., & Majasalmi, T. (2024). Remote sensing and spectroscopy of lichens. *Ecology and Evolution*, 14(3), 1-16. <https://doi.org/10.1002/ece3.11110>

- Ricklefs, R. (2010). *A Economia da Natureza* (6.<sup>a</sup> ed.). Guanabara Koogan.
- Rodríguez-Caballero, E., Belnap, J., Büdel, B., Crutzen, P. J., Andreae, M. O., Pöschl, U., & Weber, B. (2018). Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change. *Nature Geoscience*, 11(3), 185-189. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0072-1>
- Roy, D. P., Huang, H., Houborg, R., & Martins, V. S. (2021). A global analysis of the temporal availability of PlanetScope high spatial resolution multi-spectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 264, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112586>
- Santos, H. G. dos, Carvalho Junior, W. de, Dart, R. de O., Aglio, M. L. D., Sousa, J. S. de, Pares, J. G., Fontana, A., Martins, A. L. da S., & Oliveira, A. P. (2011). O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada (Embrapa Solos, Documentos 130). Embrapa Solos. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-desolos-do-Brasil.pdf>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. P. (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (5.<sup>a</sup> ed.). Embrapa. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>
- Santos, G. L. B., Maia, R. P., Travassos, L. E. P., & Souza, A. S. V. (2023). Origin and evolution of solutional features on granitic inselbergs. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 25(1). <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v25i2.2469>
- Travassos, L. E. P. (2019). Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. [https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-depesquisa/cavernas/publicacoes/cecav\\_principiosdecarstologia.pdf](https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-depesquisa/cavernas/publicacoes/cecav_principiosdecarstologia.pdf)
- Twidale, C. R., & Vidal-Romani, J. R. (2005). *Landforms and Geology of Granite Terrains*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1595.6722>
- Vauchez, A., Neves, S. P., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, M., Arthaud, M. H., & Amaro, V. E. (1995). The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3-4), 247-266. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00012-5](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00012-5)
- Wang, Z., Wu, B., Zhang, M., & Ma, Z. (2023). An advanced coverage estimation method to quantify biological soil crust coverage using Sentinel-2 imagery in desert and sandy land of China. *GIScience and Remote Sensing*, 60(1), 1-19. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2257470>
- Weber, B., & Hill, J. (2016). Remote Sensing of Biological Soil Crusts at Different Scales. In B. Weber, B. Büdel, J. Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands (pp. 215–234). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_12)
- Weber, B., Olehowski, C., Knerr, T., Hill, J., Deutschewitz, K., Wessels, D. C. J., Eitel, B., & Büdel, B. (2008). A new approach for mapping of Biological Soil Crusts in semidesert areas with hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2187-2201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.014>