



MAPEAMENTO DA DENSIDADE DA VEGETAÇÃO DE COBERTURA DE UM ATERRO DE RESÍDUOS URBANOS ATRAVÉS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO OBTIDOS COM VANT

Alexandre Felipe Bruch¹
Karina Retzlaff Camargo²
Marciano Carneiro³
Gabriel Fragali de Castro⁴
Vinicius Klumb⁵
Talison Luis de Britto Monte⁶
Isabel Cordeiro Borges⁷

RESUMO

Objetivo: O objetivo deste estudo é realizar o mapeamento da vegetação de cobertura de um aterro sanitário de RSU através de imagens de índices de vegetação de alta resolução obtidas com VANT, como ferramenta de monitoramento geotécnico.

Referencial Teórico: O referencial teórico descreve o estado da arte dos índices de vegetação, desde a primeira proposta de NDVI apresentada por Rouse *et al.* (1973), passando pelo NDWI de McFeeters (1996). Além disso, apresenta o método de representação das variáveis radiométricas, visto que são índices operados entre razão de bandas espectrais, as quais são apresentados em intervalos que variam de -1 a +1.

Método: O estudo utilizou um VANT com câmera multiespectral MAPIR para capturar imagens do aterro sanitário. Foram aplicados os NDVI e NDWI para avaliar a saúde e cobertura da vegetação. Pontos de controle em campo determinados com GNSS-RTK e programas de fotogrametria garantiram a precisão no mapeamento, criando ortomosaicos de alta resolução para o monitoramento e determinação dos índices de vegetação.

Resultados e Discussão: Os resultados indicam variações na cobertura vegetal, revelando áreas de solo exposto e vegetação em diferentes estágios de vigor, desde senescência até crescimento pleno. Os índices NDVI e NDWI destacaram regiões com estresse hídrico e exposição de solos, demonstrando a efetividade do método no monitoramento ambiental e geotécnico.

Conclusões: Conclui-se que o uso de VANTs e índices de vegetação são eficazes para o monitoramento da saúde vegetal e estabilidade de aterros, permitindo identificar áreas de erosão e necessidade de recomposição da cobertura vegetal.

Palavras-chave: NDVI, NDWI, Vegetação de Cobertura, Aerolevantamento.

¹ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: afbruch@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1734-6799>

² Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: karinacamargo@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6427-329X>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: marciano.carneiro@ufrgs.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4436-1935>

⁴ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: gabrielfragali.castro2015@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-4474-6866>

⁵ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: viniklumb@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-0859-4223>

⁶ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: talisonluisbritto@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-1859-2845>

⁷ Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: isabel.engeo@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-1308-6651>



VEGETATION DENSITY MAPPING OF URBAN SOLID WASTE LANDFILL COVERAGE USING VEGETATION INDEXES OBTAINED WITH UAV

ABSTRACT

Objective: The objective of this study is to map the vegetation cover of a municipal solid waste landfill using high-resolution vegetation index images obtained with UAV, as a tool for geotechnical monitoring.

Theoretical Framework: The theoretical framework describes the state of the art of vegetation indexes, starting from the first proposal of NVDI by Rouse *et al.* (1973), through to the NDWI by McFeeters (1996). Additionally, it presents the method of representing radiometric variables, considering that these indexes operate based on the ratio between spectral bands, which are displayed within intervals ranging from -1 to +1.

Method: The study used a UAV equipped with MAPIR multispectral camera to capture images of the landfill. NDVI and NDWI indexes were applied to assess vegetation health and coverage. Field control points determined with GNSS-RTK, along with photogrammetry software, ensured mapping accuracy, creating high-resolution orthomosaics for monitoring and determining vegetation indexes.

Results and Discussion: The results indicate variation in vegetation cover, revealing areas of exposed soil and vegetation at different stages of vigor, from senescence to full growth. The NDVI and NDWI indexes highlighted regions with water stress and soil exposure, demonstrating the effectiveness of the method in environmental and geotechnical monitoring.

Conclusions: It is concluded that the use of UAVs and vegetation indexes is effective for monitoring vegetation health and landfill stability, enabling the identification of erosion areas and the need for vegetation cover restoration.

Keywords: NDVI, NDWI, Vegetation Cover, Aerial Survey.

MAPEO DE LA DENSIDAD DE VEGETACIÓN DE LA COBERTURA DE UN VERTEDERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN OBTENIDOS CON UAV

RESUMEN

Objetivo: El objetivo de este estudio es realizar el mapeo de la vegetación de cobertura de un vertedero de residuos sólidos urbanos mediante imágenes de índices de vegetación de alta resolución con UAV, como herramienta de monitoreo geotécnico.

Marco Teórico: El marco teórico describe el estado del arte de los índices de vegetación, desde la primera propuesta de NDVI presentada por Rouse *et al.* (1973), pasando por el NDWI de McFeeters (1996). Además, presenta el método de representación de las variables radiométricas, considerando que son índices operados entre la razón de bandas espectrales, las cuales se representan en intervalos de varían de -1 a +1.

Método: El estudio utilizó un UAV equipado con una cámara multispectral MAPIR para capturar imágenes del vertedero. Se aplicaron los índices NDVI y NDWI para evaluar la salud y la cobertura de la vegetación. Los puntos de control en campo determinados con GNSS-RTK, junto con software de fotogrametría, garantizaron la precisión del mapeo, creando ortomosaicos de alta resolución para el monitoreo y la determinación de índices de vegetación.

Resultados y Discusión: Los resultados obtenidos revelaron [sintetizar los principales resultados de la investigación]. En la sección de discusión, estos resultados se contextualizan a la luz del marco teórico, destacando las implicaciones y relaciones identificadas. En este apartado también se consideran posibles discrepancias y limitaciones del estudio.

Conclusiones: Se concluye que el uso de UAVs e índices de vegetación es eficaz para el monitoreo de la salud de la vegetación y la estabilidad de los vertederos, permitiendo identificar áreas de erosión y la necesidad de recomposición de la cobertura vegetal.

Palabras clave: NDVI, NDWI, Vegetación de Cobertura, Aerolevantamiento.



1 INTRODUÇÃO

A geração cada vez maior de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma consequência direta do crescimento populacional, da urbanização e dos padrões de consumo atuais, sendo um dos principais desafios ambientais para cidades em todo o mundo. Com o aumento da quantidade de resíduos produzidos diariamente, os gestores públicos enfrentam a difícil tarefa de garantir a coleta, o tratamento e a disposição final adequada desses materiais. Nos centros urbanos, a disposição final em aterros sanitários se apresenta como a principal alternativa, uma vez que permite um manejo controlado e tecnicamente viável para resíduos que não podem ser reciclados ou reutilizados.

Embora os aterros sanitários sejam o destino ideal para RSU que não podem ser reciclados ou reutilizados, há registros de problemas geotécnicos nesses locais, como deslizamentos e até colapsos, conforme relatado por Nagalli (2005), Nascimento (2007), Schuller (2010), Benvenuto (2012, 2016 e 2019) e Shimazaki (2017). Assim, o monitoramento geotécnico é crucial, assim como o mapeamento de áreas de risco de deslizamentos em encostas, conforme estabelecido na NBR 11.682 (ABNT, 2006) e, especificamente para aterros sanitários, na NBR 8.419 (ABNT, 1992), principalmente em áreas onde a vegetação de cobertura não apresenta sua plena integridade (Benvenuto, 2012).

Nesse sentido, o mantimento da vegetação de cobertura dos aterros sanitários de RSU vem sendo impactados pelas mudanças climáticas e suas causas têm sido objeto de crescente debate, impulsionado por eventos extremos recentes, como secas prolongadas, ondas de calor e chuvas intensas, os quais se tornaram mais severos e frequentes (Ganho, 2019; Fernandes *et al.*, 2021; Ayanlade *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2023). Estes eventos impactam múltiplos aspectos do bem-estar humano, resultando em consequências significativas para comunidades e ecossistemas (Espindola e Ribeiro, 2020). Em particular, o aumento da intensidade das chuvas, causado pelas mudanças no regime hidrológico, tem influenciado diretamente os processos de erosão hídrica dos solos, agravando problemas relacionados à perda de solo e à degradação ambiental (Borrelli *et al.*, 2020).

Neste cenário, as técnicas de sensoriamento remoto e fotogrametria têm se destacado como ferramentas essenciais para estudos ambientais. A análise de alvos vegetais por meio de



índices de vegetação permite a avaliação detalhada da cobertura vegetal, fornecendo dados valiosos sobre suas condições e variações (Côrrea *et al.*, 2018). Nery *et al.* (2014) enfatizam que esses índices são fundamentais para compreender as características biofísicas e estruturais das plantas e que, no contexto da erosão hídrica, a análise da cobertura vegetal é crucial para entender os processos de degradação do solo. Estudos sobre erosão hídrica são particularmente relevantes para o manejo sustentável e o monitoramento da perda de solo, permitindo o acompanhamento dos processos erosivos, sua remediação e a recomposição da vegetação de cobertura a qual estabiliza a superfície impactada (Silva *et al.*, 2011).

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal o mapeamento da vegetação de cobertura de um aterro sanitário de RSU através de imagens de índices de vegetação, como ferramenta de monitoramento geotécnico. A pesquisa ainda apresenta os resultados das áreas onde a vegetação está na condição de estresse hídrico e vigor vegetativo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A partir dos anos de 1960, a humanidade vem registrando imagens do planeta Terra através de satélites orbitais, com o intuito principal de realizar a obtenção de informações para o monitoramento ambiental, agricultura, mapeamento geológico, meteorologia, planejamento urbano, etc (Liu, 2007; Jensen, 2009). Sendo assim, visto a vasta disponibilidade de dados obtidos a partir dos satélites orbitais, foram desenvolvidas várias metodologias para o tratamento das imagens e obtenção de informações da superfície terrestre.

Uma das primeiras metodologias que utilizam dados de sensoriamento remoto são os índices radiométricos ou índices de vegetação. Segundo Ji *et al.* (2011) os índices de vegetação resultam em medidas não-adimensionais de reflectâncias espectrais calculados através de operações algébricas como as proporções, diferenças e diferenças normalizadas, entre duas ou mais bandas, objetivando quantificar as características biofísicas da vegetação. Segundo Jensen (2009), os índices de vegetação consistem em uma medida radiométrica adimensional, indicando a atividade fotossintética da vegetação, teor de clorofila nas plantas, acúmulo de biomassa, estado de desenvolvimento, entre outras características (Jensen, 2009).

Em 1972, Person e Miller desenvolveram o Ratio Vegetation Index (RVI) ou Índice de Vegetação pela Razão, sendo o primeiro índice de vegetação descrito na literatura (Liu, 2007). Este índice baseia-se na teoria que as folhas verdes absorvem a radiação eletromagnética na região do visível e refletem na faixa do Infravermelho próximo. Apesar deste intervalo de comprimento de onda ser afetado significativamente pela interferência da atmosfera, foram



encontrados bons resultados como indicador de crescimento de culturas e de estoque de biomassa (Liu, 2007; Jensen, 2009; Ji *et al.*, 2011).

Já o índice de vegetação mais conhecido e discutido na literatura, foi proposto por Rouse *et al.* (1973), chamado de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada. Este índice é calculado pela diferença de reflectância em duas regiões do espectro eletromagnético. Essa diferença é normalizada pela razão das faixas do visível e do infravermelho próximo. No espectro visível, é utilizado o intervalo de comprimento de onda do vermelho (Liu, 2007).

O NDVI de Rouse *et al.* (1973) foi amplamente difundido e utilizado porque apresenta significativas vantagens no seu uso, pois este elimina parcialmente as interferências da atmosfera e as perturbações radiométricas e geométricas, além das variações de ângulos solar e ângulo de visada (Holben, 1986). Como se trata de uma normalização, o resultado varia de -1 a +1, onde os valores negativos referem-se às nuvens e próximos a zero representam o solo exposto ou sem vegetação. Valores superiores a zero refletem áreas com vegetação, sendo que quanto mais alto este valor, mais densa é a vegetação ou em pleno vigor de crescimento (Hunt *et al.*, 2010).

Já o Normalized Difference Water Index (NDWI) proposto por McFeeters (1996), foi desenvolvido buscando mapear e avaliar dados de recursos hídricos, como a identificação de drenagens e o monitoramento de áreas inundadas (Menon *et al.*, 2015). Com a evolução dos sensores com alta resolução espacial, principalmente os aerotransportados, foi possível a geração de NDWIs para a determinação de índices de excassez e/ou estresse hídrico, assim como o monitoramento de mudanças no teor de água na vegetação (Lu *et al.*, 2024). O NDWI também resulta em índices normalizados entre -1 e +1, sendo uma relação direta com o teor de água presente nos alvos.

3 ÁREA DE ESTUDO

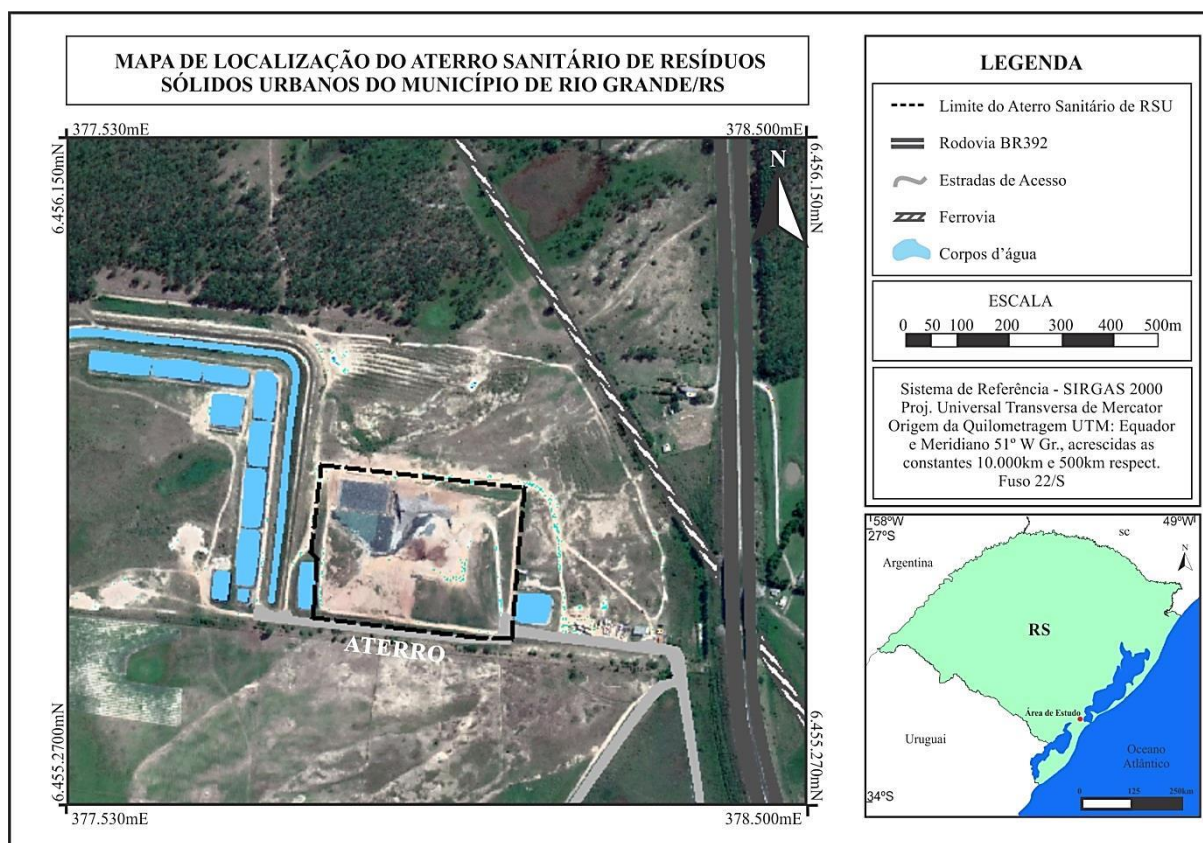
Esta pesquisa foi desenvolvida em um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, localizado no município de Rio Grande/RS, às margens da rodovia BR-392 (Figura 1). Partindo do centro da cidade de Rio Grande/RS, em direção à cidade de Pelotas/RS, por cerca de 25 km encontra-se o aterro, no distrito da Vila da Quinta. A célula do aterro sanitário está delimitada pelas coordenadas planas de 377.860 e 378.130 metros Leste e 6.455.470 e 6.455.703 metros Norte. Ambos os limites e coordenadas estão vinculadas a Projeção Universal Transversa de Mercador, no seu Fuso 22S e ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas –



SIRGAS 2000.

Figura 1

Mapa de localização da área de estudo.



O aterro encontra-se na unidade geológica-geomorfológica denominada como Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), que corresponde a sedimentos superficiais da Bacia Pelotas (BP). É uma região com a morfologia dos terrenos relativamente plana a aplainada, formada durante o Quaternário através do sistema Laguna-Barreira (Villwock *et al.*, 1986). A unidade geológica-geomorfológica do substrato do aterro sanitário é a de Depósitos Praiais Eólicos, pertencente a Barreira II de Villwock *et al.* (1986), com areias quartzosas finas, bem selecionadas, laminação plano-paralela e cruzada, areia média a fina, bem arredondada e selecionada. Sua gênese está relacionada ao retrabalhamento dos materiais pelos ventos após a regressão marinha que definiu a Barreira II (Tomazelli e Villwock, 1991). As altitudes geralmente não são maiores que 17 m e a declividade é inferior a 2%. Já o solo de cobertura do aterro sanitário é composto por um material argiloso compactado e portando de baixa permeabilidade. A pluviosidade é considerada bem distribuída, com médias de 120 mm mês e aproximadamente 1.400 mm ano (Bruch. 2020).



4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para a execução do aerolevante desta pesquisa, optou-se pelo uso de um Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) multirrotor fabricado pela DJI, modelo Phantom 4 Advanced. Na obtenção do NDVI utilizou-se uma câmera multiespectral da fabricante Mapir, modelo Survey 3W, com os sensores de imageamento no comprimento de onda do verde (G-550 nm), vermelho (R-660 nm) e infravermelho próximo (NIR-850 nm). Na correção radiométrica das imagens geradas pela câmera Mapir Survey 3W, optou-se pelo alvo calibrador de reflectância difusa V2, a qual realiza as correções das interferências atmosféricas fornecendo a porcentagem de reflectância (Tabela 1).

Também foi utilizado um par de receptores do Global Navigation Satellite System-GNSS com recepção de correções em tempo real - RTK. Os receptores são da marca Emlid, modelo Reach RS2, bandas L1, L2 e multi constelação (GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo).

Tabela 1

Equipamentos utilizados para o levantamento de campo.

Instrumento	Especificações
	Peso em ordem de voo: 1368 gramas Autonomia de voo: 28 minutos Distância máxima de alcance de rádio transmissor: 5 km Bateria: LiPo4s de 5870 mAH Câmera: Sensor CMOS de 20 Mega pixels Dimensão máx. da foto: 5472 x 3648 pixels Posicionamento Espacial: GPS + GLONASS
	Peso com bateria: 76g Sensor: Sony Exmor R IMX117 Distância Focal: 35 mm Dimensão máx. da foto: 4000 x 3000 pixels HFOV: 41° (horizontal) ISO: 50/100/200/400/Automático Velocidade de Captura: RAW+JPG (3 segundos/foto); JPG (2 segundos/foto) Posicionamento Espacial: GPS+GLONASS
	Dimensões (AxLxC): 3,175x254x318 (mm) Intervalos radiométricos: 0/128/255 Identificação: QR Code Altura de registro: 0,5 a 10 m Calibração: Espectrofotômetro Shimadzu Reconhecimento: MCC ou Mapir Cloud

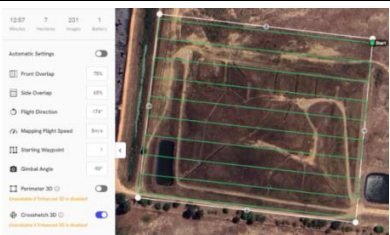


4.2 MÉTODOS

Primeiramente foi elaborado o projeto do aerolevantamento, buscando a delimitação da área de estudo. Em seguida, com o intuito de aumentar a precisão do aerolevantamento, foi criado um plano de voo através do programa gratuito DroneDeploy, conforme a Tabela 2.

Tabela 2

Plano de voo para o mapeamento com VANT.

Projeto	Especificações
	Altitude de voo: 60 metros
	Sobreposição lateral das faixas: 65%
	Sobreposição frontal das fotos: 75%
	Azimute de voo: 85°
	Velocidade máxima: 5 m/s
	Visada da câmera: Nadir
	Resolução espacial: 1,2 cm/pixel
	Tempo de voo: 12 minutos e 57 segundos

Visto as imprecisões geradas pelo receptor GNSS do VANT, foram utilizados 12 Pontos de Controle (PCs) em campo (Tabela 3). O registro da posição tridimensional de um Ponto de Controle é realizado após as ambiguidades serem resolvidas e a posição ser obtida com solução Fixa nas precisões horizontais de 7mm + 1ppm e verticais de 14mm +1 ppm. Após o levantamento de campo, o registro de posicionamento da Base foi compactado e enviado para o pós processamento, objetivando a correção dos erros através do sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O sistema de referência geodésico utilizado foi o SIRGAS 2000 e a Projeção é a Universal Transversa de Mercator em seu Fuso 22.

Tabela 3

Pontos de controle definidos em campo e utilizados no processamento fotogramétrico.

Materialização do PC	Ponto	Coord. X (mE)	Coord. Y (mN)	Coord. Z (m)
	1	378033.546	6455570.730	39.327
	2	377792.999	6455503.777	18.379
	3	377806.576	6455529.050	14.201
	4	377596.199	6455537.176	16.232
	5	377673.687	6455825.667	13.050
	6	377834.141	6455576.858	17.304
	7	377797.147	6455650.239	18.790
	8	378088.960	6455851.157	18.442
	9	378300.868	6455614.742	18.733
	10	378289.812	6455462.015	19.775
	11	378107.637	6455477.188	23.058
	12	378086.183	6455629.970	30.584



Com os PCs materializados em campo, foi definida a posição do alvo calibrador de refletância difusa V2, a qual ficou posicionado a 5 metros do ponto de decolagem do VANT, permitindo assim a identificação do mesmo em diversas imagens registradas pela câmera Mapir Survey 3W. O alvo calibrador foi identificado em 14 imagens, sendo que em 3 imagens foi possível a identificação dos intervalos radiométricos padrão, com qualidade de dentro do limiar de aceitação. Para isso, utilizou-se o programa Mapir Camera Control (MCC), onde foi aplicada a correção de vinheta (campo baixo), correção de resposta do sensor e o equilíbrio de branco.

A correção de vinheta ilumina o perímetro externo dos pixels das imagens, as quais são mais escuras devido à óptica da lente. A correção da resposta do sensor corrige as diferenças de sensibilidade do sensor causada pelo filtro de ruído passa-baixa. Por fim, o equilíbrio de branco realiza o balanço entre os mínimos e máximos radiométricos registrados através da técnica do “mundo cinza” (Mapir, 2024). Por fim, as imagens calibradas são exportadas no formato Joint Photographics Experts Group (JPEG).

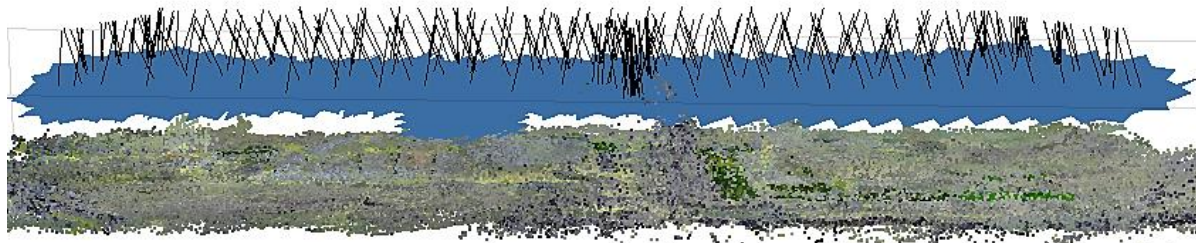
Para o processamento fotogramétrico, foi utilizado o programa Metashape Profissional, desenvolvido pela empresa Agisoft e utilizando-se da combinação dos algoritmos Structure-from-Motion e Multi-View Stereo (SfM-MVS). O SfM-MVS possibilita a geração de modelos digitais em três dimensões (3D) de alta precisão a partir de um conjunto de imagens em duas dimensões (2D) (Carrivick *et al.*, 2016). Segundo Bruch *et al.* (2019), a tecnologia SfM-MVS, permite processar imagens arbitrárias, com variação de sobreposição, desde que existam pontos homólogos em imagens distintas. Além disso, o Metashape apresenta uma rotina automática de reconhecimento de imagens capturadas por diferentes VANTs e câmeras, permitindo a criação de ortomosaicos com alta resolução espacial, através da técnica de mosaicagem com base nas semelhanças radiométricas entre as imagens ou coordenadas posicionais (Taddia *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020).

Sendo assim, primeiramente foi realizada a análise visual da qualidade das imagens e a importação para o Metashape. A próxima etapa tange o alinhamento das imagens (Figura 2), onde o programa define os parâmetros da câmera utilizada, o Ponto Principal - pp e a rotação das fotos. Em seguida, são inseridos os 12 PCs nas imagens através da identificação visual dos alvos materializados em campo. Sequencialmente é realizada a calibração dos parâmetros fotogramétricos da câmera Mapir Survey 3W, com a correção da distância focal (f), o pp em x e y (ppx , ppy), coeficientes do polinômio de distorção radial simétrica de terceira ordem (k_1 , k_2 , k_3) e os coeficientes de distorção tangencial (P_1 , P_2). Por fim, é gerada a nuvem densa e o ortomosaico fotogramétrico. O ortomosaico foi exportado no formato JPEG para a geração dos índices de vegetação no programa Quantum GIS (Qgis 3.28).



Figura 2

Nuvem esparsa de pontos homólogos.



Os índices de vegetação foram gerados conforme a proposta de NDVI de Rouse *et al.* (1973) descrita na Equação 1 e de NDWI de McFeeters (1996) apresentada na Equação 2. A aplicação das equações foi realizada através da ferramenta Calculadora Raster presente no Qgis 3.28.

$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right) \quad (1)$$

onde:

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index;

RED = Banda espectral com o comprimento de onda do vermelho;

NIR = Banda espectral com o comprimento de onda do Infravermelho Próximo.

$$NDWI = \left(\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \right) \quad (2)$$

onde:

NDWI= Normalized Difference Water Index;

GREEN = Banda espectral com o comprimento de onda do verde;

NIR = Banda espectral com o comprimento de onda do Infravermelho Próximo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

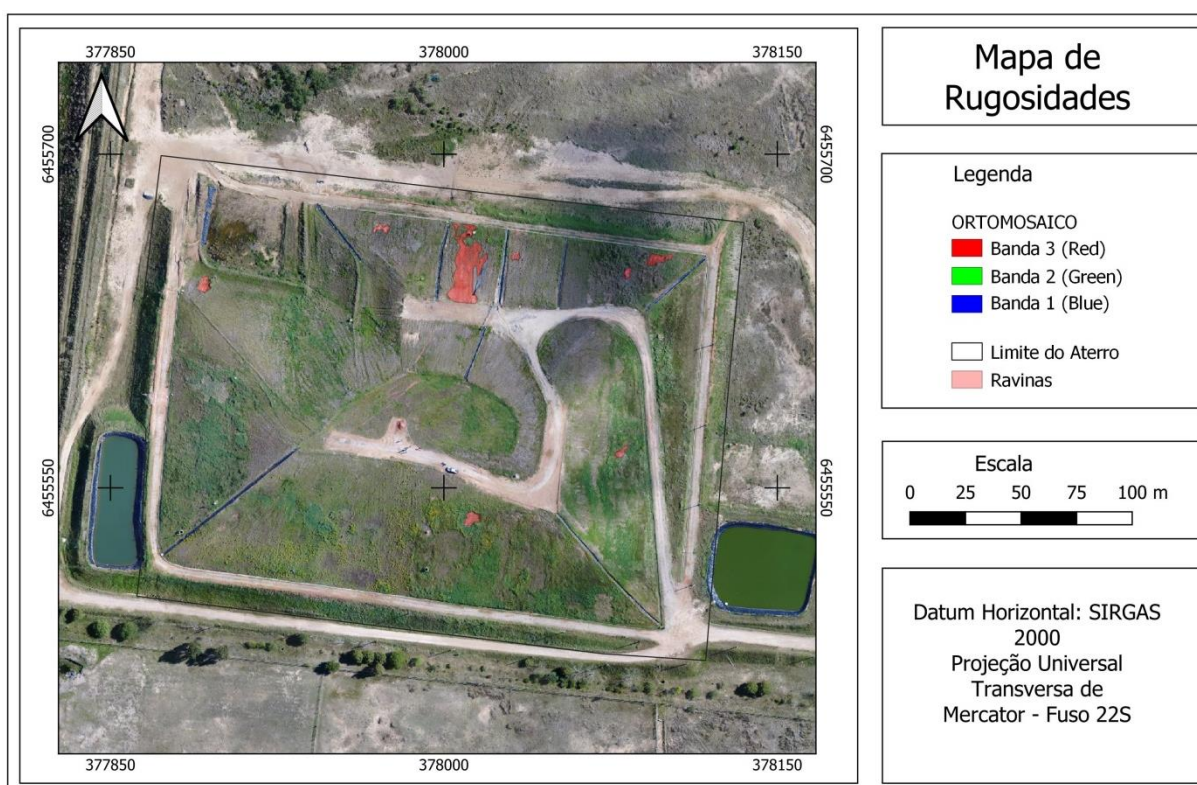
A análise dos resultados do mapeamento da densidade vegetação de cobertura do aterro sanitário de RSU demonstra que existem descontinuidades, interpretadas como enleivamento da gramínea de fixação e o início do desenvolvimento de ravinas em diversos estágios de evolução. Sendo assim, apenas em uma análise visual sobre o ortomosaico (Figura 3), elaborado



com as bandas espectrais da região do visível (B1-Azul, B2-Verde, B3-Vermelho), é possível observar as rugosidades e variações na densidade da vegetação de cobertura do aterro sanitário. A identificação e o mapeamento de processos erosivos através de aerolevantamentos com VANT são amplamente conhecidos, sendo que Verdonk (2015), Wang *et al.* (2016) Báčová *et al.* (2019) e Julian e Nunes (2020) atribuem os resultados a alta resolução espacial do ortomosaico e a correção de contraste (balanço de branco) da calibração radiométrica automática da câmera de pequeno formato, permitindo assim a delimitação de alvos diminutos.

Figura 3

Ortomosaico com a delimitação de ravinas na superfície do aterro sanitário.



Buscando uma determinação e interpretação dos alvos no NDVI, foi realizada a segmentação por classes dos intervalos de resposta radiométrica, sendo que se observa na Figura 4 o NDVI em 5 classes e na Figura 5 o histograma a qual gerou a segmentação dos intervalos entre os 5 alvos descritos. Cabe destacar que a matriz NDVI gerou 16.457.144 pixels, visto a elevada resolução espacial gerada pela câmera Mapir, com um plano de voo a uma altura de 60 m e a Distância Simples no Solo (GSD) de 1,2 cm.

Sendo assim, os resultados de NDVI encontrados ficaram posicionados entre -0,320 e 0,160. Os números digitais de NDVI entre -0,320 e -0,101 referem-se às áreas de solo exposto,



principalmente as vias de acesso as células do aterro sanitário e a áreas onde já ocorrem sulcos (ravinas) com bifurcações com pontos de ruptura (*knickpoints*) (Guerra, 2005), semelhante a instalação de processos erosivos na agricultura descritos por Meinen e Robinson (2020). Resultados semelhantes foram encontrados por Beniaich *et al.* (2022) em pomares de oliveiras e amplas áreas de solo exposto ente linhas verdes. Ayalew *et al.* (2020) também encontrou índices radiométricos semelhantes em processos erosivos instalados e ativos, monitorados com NDVI. Estes locais necessitam de recomposição da camada de solo, assim como o replantio e a reinserção da vegetação de fixação e de cobertura do aterro sanitário.

Figura 4

Índices NDVI segmentados por alvos.

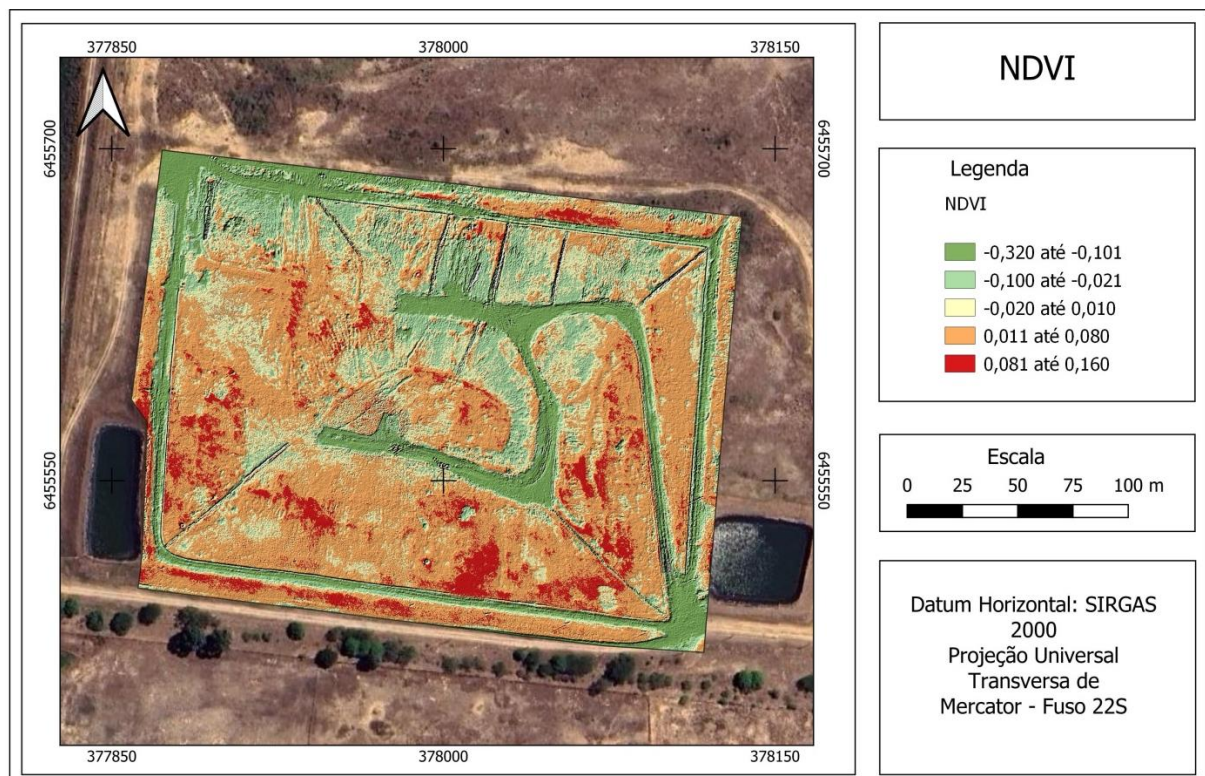
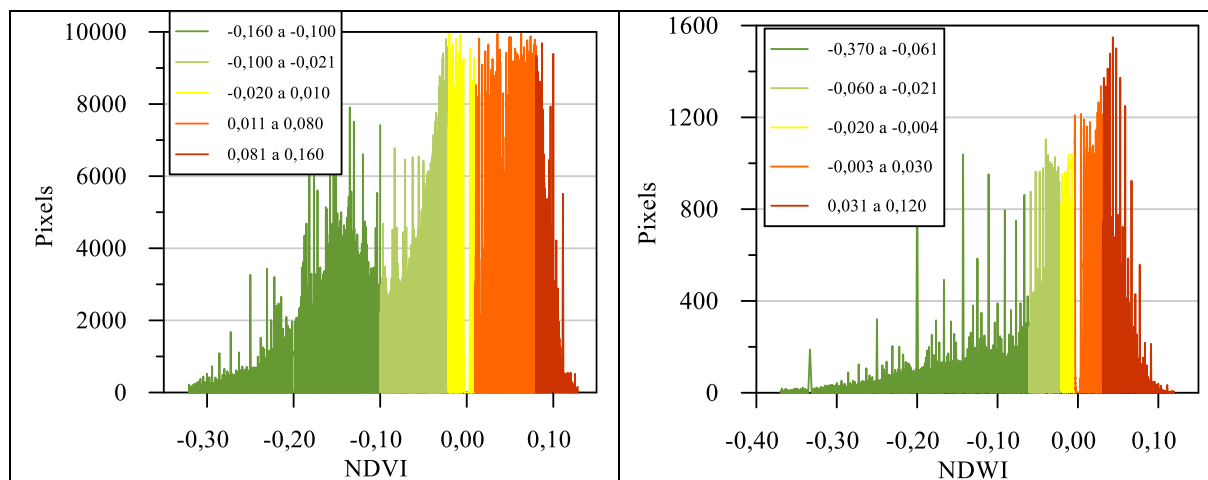




Figura 5

Histograma com a distribuição de classes com os intervalos de NDVI e NDWI.



Os locais onde a vegetação apresenta uma condição de senescência, ou seja, processo regressivo de vigor vegetativo a resposta radiométrica do NDVI ficou entre -0,100 e -0,021. Nestas áreas, a vegetação apresenta-se em condição de deterioração celular e vigor vegetativo no último estágio no processo de senilidade e findando o vigor vegetativo. Pela baixa capacidade de retenção e absorção de água, em eventos com pluviosidade elevada, a vegetação em senescência colabora de forma infima para a diminuição do escoamento superficial, visto sua reduzida área foliar para retenção do fluxo.

Os resultados de NDVI entre -0,020 e 0,010 referem-se aos locais aonde as gramíneas da família *Poaceae* vem recuperando o seu vigor vegetativo, com o sistema radicular fasciculado captando nutrientes e água, recuperando a coleoriza. Os colmos e folhas que cobrem o solo são os responsáveis pelas respostas de NDVI nessa região, sendo resultados semelhantes encontrados por Zúñiga e Vásquez (2021) e Jara (2022).

Nas áreas onde o vigor vegetativo das gramíneas da família *Poaceae* encontram-se em estado pleno, o resultado de NDVI foi determinado com respostas variando entre 0,011 e 0,080. Estes intervalos estão condizentes com outros trabalhos, como os de Ayalew *et al.* (2020), Zúñiga e Vásquez (2021), Jara (2022) e Beniaich *et al.* (2022), as quais demonstram a saúde da vegetação rasteira, principalmente das gramíneas é alcançada com valores mínimos de NDVI entre 0,01 e 0,10, quando determinado com câmeras de altíssima resolução espacial e corrigidas radiometricamente.

Por fim, as mais altas respostas de NDVI, variando entre 0,081 e 0,160, sendo encontradas na vegetação de cobertura invasora, ou seja, espécies que proliferaram mas não pertenciam ao projeto de cobertura vegetal original. Em geral, são arbustos da espécie



Dodonaceae viscosa entremeada com a gramínea da família *Poaceae*, formando uma superfície em forma de mosaico. Invasoras em áreas de cobertura são comuns e geralmente não potencializam processos erosivos, apresentando bons resultados de fixação e estabilidade para o solo (Guerra, 2005)

Os resultados de NDWI (Figura 6) acompanharam as respostas radiométricas do NDVI, sendo que as vias de acesso são as que apresentaram as menores respostas radiométricas, com índice variando entre -0,370 e -0,06. Já os locais onde a vegetação está numa condição de senescência, os valores de NDWI ficaram entre -0,060 e -0,021. Essa baixa resposta radiométrica da vegetação indica um elevado estresse hídrico conforme os trabalhos de Silva *et al.* (2011) e Marion *et al.* (2021).

As áreas onde a vegetação começa a recuperar o seu vigor e a saturação de água intracelular, apesar das folhas ainda apresentarem déficit hídrico, geraram resultados de NDWI entre -0,020 e -0,004. O NDWI resultante nas áreas de vigor vegetativo pleno, foi determinado com índices de resposta entre -0,003 e 0,030, semelhantes aos resultados de Oliveira *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2011). É a classe com a maior área mapeada do levantamento NDVI e NDWI (Tabela 4).

Figura 6

Índices NDWI segmentados por alvos.

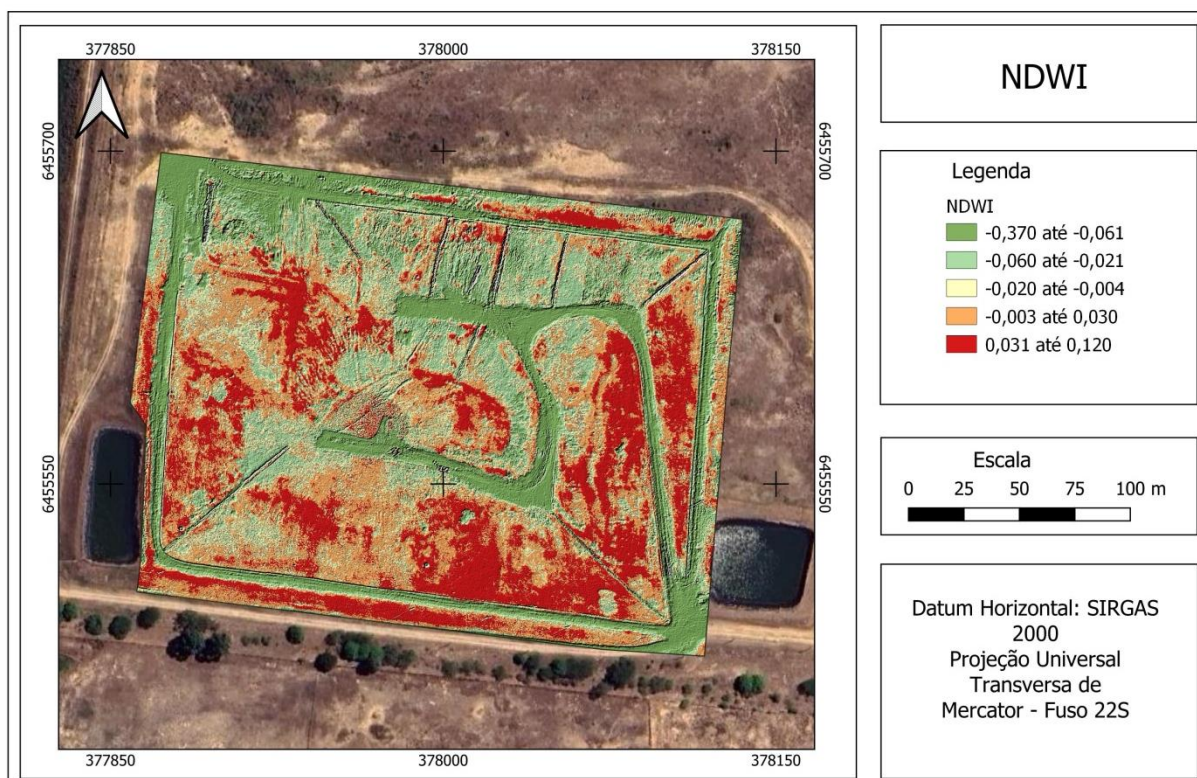




Tabela 4

Áreas calculadas para as diferentes classes de NDVI e NDWI.

NDVI	Área (m ²)	NDWI	Área (m ²)
-0,320 até -0,101	7.809,36	-0,370 até -0,061	11.238,00
-0,100 até -0,021	7.508,43	-0,060 até -0,021	8.094,94
-0,020 até 0,010	8.815,23	-0,020 até -0,004	5.851,75
0,011 até 0,080	23.431,86	-0,003 até 0,030	15.178,52
0,081 até 0,160	3.673,95	0,031 até 0,120	10.875,62
Total	51.238,83		51.238,83

Por fim, os resultados de NDWI entre 0,031 e 0,120 são se referem aos polígonos com espécies invasoras que apresentam uma maior saturação de água no sistema aéreo, além de vigor vegetativo pleno. Assim como no NDVI, em geral são arbustos entremeados com gramíneas formando um tapete vegetativo em forma de mosaico.

6 CONCLUSÃO

O estudo realizou o mapeamento da densidade da vegetação de cobertura em um aterro sanitário de RSU, utilizando índices de vegetação gerados por veículos aéreos não tripulados (VANTs) e sensores específicos. Em resposta aos desafios ambientais causados pelo acúmulo de resíduos, especialmente em aterros sanitários, ficou evidente a importância da vegetação como estabilizadora do material de cobertura do aterro, minimizando riscos geotécnicos como deslizamentos e erosão. A metodologia adotada envolve o uso de câmeras multiespectrais acopladas a VANTs para capturar imagens nas faixas do visível e infravermelho próximo, a partir das quais são calculados índices de vegetação NDVI e o NDWI, ambos compatíveis com outros trabalhos recentes.

O NDVI revelou variações de cobertura vegetal entre -0,320 e 0,160, com faixas específicas associadas a diferentes condições da vegetação, desde áreas de solo exposto, onde há necessidade de recomposição da vegetação de cobertura, até áreas com vegetação saudável e invasora. Estes dados são essenciais para identificar e monitorar processos erosivos e avaliar a saúde e vigor da vegetação, aspectos cruciais para a eficácia e longevidade do aterro sanitário como solução de descarte de resíduos. O NDWI também trouxe informações relevantes sobre a condição hídrica da vegetação, evidenciando o nível de estresse hídrico em diversas áreas do aterro.

Ainda, o estudo destacou a eficácia do uso de VANTs na fotogrametria de alta resolução para o monitoramento contínuo dos aterros, o que proporciona informações detalhadas e permite intervenções rápidas em áreas com vegetação degradada. Por fim, conclui-se que essa



tecnologia contribui significativamente para o monitoramento ambiental e a gestão sustentável dos aterros, auxiliando na preservação da integridade do material de cobertura e no monitoramento geotécnico.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). Estabilidade de Taludes. NBR-11.682. Rio de Janeiro: ABNT 39p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992). Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos de sólidos urbanos. NBR-8.419. Rio de Janeiro: ABNT 7p.
- Ayalew, D. A.; Deumlich, D.; Sarapatka, B.; Doktor, D. (2020). Quantifying the sensitivity of NDVI-based C-factor estimation and potential soil erosion prediction using spaceborne earth observation data. *Remote Sens.* v. 12, 1136. <https://doi.org/10.3390/rs12071136>.
- Ayanlade, A.; Oluwaranti, A.; Ayanlade, O. S.; Borderon, M.; Sterly, H.; Sakdapolrak, P.; Jegede, M. O.; Weldemariam, L. F.; Ayinde, A. F. O. Extreme climate events in sub-Saharan Africa: A call for improving agricultural technology transfer to enhance adaptive capacity. *Climate Services.* v. 27. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100311>
- Bácová, M.; Krása, J.; Devátý, J.; KAVKA P. A. (2019). GIS method for volumetric assessments of erosion rills from digital surface models. *European Journal of Remote Sensing*, v. 52, S1, p. 96-107. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1543556>.
- Beniaich, A.; Silva, M. L.; Guimarães, D. V.; Avalos, F. A.; Terra, F. S.; Menezes, M. D.; Junior, C. A.; Cândido, B. M. (2022). UAV-Based Vegetation Monitoring for Assessing the Impact of Soil Loss in Olive Orchards in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 30. e00543. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00543>
- Benvenuto, C. Aterro sanitário – solução técnica ou econômica. Workshop limpeza pública, 2019. Disponível em: <http://www.ablp.org.br/userfiles/files/clovis-benvenuto-2019.pdf> Acesso em: 15/02/2022
- Benvenuto, C. Estabilidade geotécnica de aterros sanitários. I Seminário sobre Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos, 2012.
- Benvenuto, C. Monitoramento de aterros sanitários. Workshop sobre Resíduos Sólidos Urbanos, 2016. Disponível em: <http://www.ablp.org.br/pdf/Clovis-Benvenuto.pdf> Acesso em: 15/02/2022
- Borrelli, P.; Robinson, D. A.; Panagos, P.; Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *PNAS.* v. 117. n.36. p. 21994-22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Bruch, A. F. (2020). Avaliação do risco potencial a movimentos de massa no aterro de resíduos sólidos do município de Rio Grande/RS. Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia Bacharelado. Universidade Federal do Pelotas. 77 p.



- Bruch, A. F.; Cirolini, A.; Thum, A. B. ; Carneiro, M. (2019). Avaliação da Acurácia das Cubagens de Volumes de Mineração através de Levantamentos Convencionais e Fotogramétricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 1. p. 283-298. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p283-298>
- Carrivick, J.F.; Smith, M.W.; Quincey, D.J., (2016) *Structure from motion in the geosciences*: John Wiley & Sons.
- Côrrea, J. V.; Almeida, L. C. O.; Ribeiro, F. R. (2018). Avaliação de impacto ambiental do lixão de Leopoldina – MG. In: *Cidade Bem Tratada: Resíduos Sólidos, Água e Energias Renováveis*, 1. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: Unisinos, p.1-11.
- Costa, G.; Blanco, C.; Lobato Soares, A.; Cruz, J.; Mendonça, L. (2023). Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. *Revista de Gestão de Água da América Latina*. v.20. 6. <https://doi.org/10.21168/reg.a.v20e6>.
- Espíndola, I. B.; Ribeiro, W. C. (2020). Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, 22, n. 48. <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4802>
- Fernandes, V.; Cunha, A.; Cuartas, L.; Deusdará-Leal, K.; Costa, L. C.; Broedel, E.; França J.; Alvalá, R.; Seluchi, M.; Marengo, J. (2021). Secas e os impactos na Região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*. v.28. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74717>.
- Ganho, N. (2019). Mudanças climáticas e mudanças na valoração do clima, em Portugal, nos últimos 50 anos. *Acta Geográfica*, v.13(33), 196-208.
- Guerra, A. J. T. (2005). Processos Erosivos nas Encostas. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. da (org). *Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos*. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Holben, B.N. (1986) Characteristics of Maximum-Value Composite Images from Temporal AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, v.7, 1417-1434. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948945>
- Hunt, E. R. Jr.; Hively, W. D.; Fujikawa, S. J.; Linden, D. S., Daughtry, C.S.T., Mccarty, G.W. (2010). Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sensing*. v.2(1):290-305. <https://doi.org/10.3390/rs2010290>
- Jara, J. A. L. (2022). *Estimación del índice de vegetación y coeficiente del cultivo para arroz mediante teledetección en la estación experimental vista Florida, Chiclayo* (Dissertação de Mestrado). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Jensen, J. (2009). *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. São José dos Campos, SP: Parêntese editora, 598 p.
- Ji, L.; Zhang, L.; Wylie, B. K.; Rover, J. (2011). On the terminology of the spectral vegetation index (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR). *International Journal of Remote*



- Sensing*, v. 32 (21): p. 6901–6909, 2011.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2010.510811>
- Julian, C.; Nunes, J. O. R. (2020). Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de amadeu amaral, Marília/SP - brasil. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, v. 21(4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1818>
- Liu, W. T. H. (2007). *Aplicações de Sensoriamento Remoto*. Campo Grande: Ed. Uniderp.
- Lu, L.; Luo, J.; Xin, Y.; Xu, Y.; Sun, Z.; Duan, H.; Xiao, Q.; Qiu, Y.; Huang, L.; Zhao, J. (2024). A novel strategy for estimating biomass of submerged aquatic vegetation in lake integrating UAV and Sentinel data. *Sci. Total. Environ.* v. 912.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169404>
- Mapir (2024). *Environmental Monitoring*. Disponível em: <https://www.mapir.camera/en-gb>
- Marion, F. A.; Andres, J.; Hendges, E. R. Z. (2021) Evolução dos índices de vegetação e sua relação com o estresse hídrico: uma revisão. *Revista GEOFRONTER*. v. 7. P. 01-18.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v.17, n.7, p.1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Meinen, B. U.; Robinson, D. T. (2020). Mapping Erosion and Deposition in an Agricultural Landscape: Optimization of UAV Image Acquisition Schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*, v. 239: 111666. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666>
- Memon, A. A.; Muhammad, S.; Rahman, S.; Haq, M. (2015) Flood monitoring and damage assessment using water indices: A case study of Pakistan flood-2012. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 18 (1): 99-106.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.003>
- Nagalli, A. (2005). *Diagnóstico e avaliação dos impactos ambientais de aterros de disposição de resíduos no Estado do Paraná: estudo de caso dos municípios de Jacarezinho e Barra do Jacaré*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 186f.
- Nascimento, J. C. F. do. (2007) *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação de mestrado em Geotecnia, EESC/USP.
- Nery, C. V. M.; Moreira, A. A.; Fernandes, F. H. S.; Almeida, L. S.; Almeida, R. P. (2014). Utilização do modelo linear de mistura espectral e NDVI para avaliação do comportamento de área desmatada no município de Rio Pardo de Minas/ MG. *Caminhos da Geografia*. v. 15, n. 49, p. 104-112. <https://doi.org/10.14393/RCG154923435>
- Oliveira, T. H.; Silva, J. S.; Machado C. C. C.; Galvêncio, J. D.; Pimentel, R. M. M.; Silva, B. B. (2010). Índice de umidade (NDWI) e análise espaço-temporal do albedo da superfície da bacia hidrográfica do rio Moxotó-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 03, p. 55-69. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v3i2.232669>
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. (1973) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). *Proceedings of*



3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt, 10-14 December, SP-351, 309-317.

Schuler, A. R. (2010) *Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado*. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 173f.

Shimazaki, L. R. (2017) *Análise de estabilidade de aterros de resíduos sólidos antigos*. Monografia. Graduação em Engenharia Ambiental. EESC., USP.

Silva, E. R. A. C.; Melo, J. G. S.; Galvêncio, J. D. (2011) Identificação das áreas susceptíveis a processos de desertificação no médio trecho da Bacia do Ipojuca - PE através do mapeamento do estresse hídrico da vegetação e da estimativa do índice de aridez. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v. 03 p. 629-649.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i3.232739>

Taddia, Y.; Stecchi, F.; Pellegrinelli, A. (2020) Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. *Drones*, v. 4, n. 9, p. 1-19.
<https://doi.org/10.3390/drones4020009>

Tomazelli, L. J.; Villwock, J. A. (1991). Geologia do Sistema Lagunar Holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, v. 18(1):13-24.

Verdonk, S. (2015) *Gully volume estimates using UAV Photometry*. Dissertação (Mestrado), University of Utrecht, Utrecht, Países Baixos, p. 80

Villwock, J. A.; Tomazelli, L. J.; Loss, E. L.; Dehnhardt, E. A.; Horn, N. O.; Bachi, F. A.; Dehnhardt, B. A. (1986) Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. ed. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. A. A. Balkema, Rotterdam. 4:79-97.

Wang, R.; Zhang, S.; Pu, L.; Yang, J.; Yang, C.; Chen, J.; Guan, C.; Wang, Q.; Chen, D.; Fu, B.; Sang, X. (2016) Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha river catchment, Northeast China. *ISPRS Int. Geo-Inf*. v. 5, n° 11, 200. <https://doi.org/10.3390/ijgi5110200>.

Zhou, Y.; Daakir, M.; Rupnik, E.; Pierrot-Deseilligny, M. (2020) A two-step approach for the correction of rolling shutter distortion in UAV photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 160, p. 51–66.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.020>

Zúñiga, A. C. E.; Vásquez, J. Ñ. (2021). Detection and identification of high Andean lant communities, Wetlands and Tolar de Puna Seca by means of RGB and NDVI orthophotos in “Unmanned Aerial Systems” drones. *Scientia Agropecuaria*, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 291–301. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.032>.