

Índices de vegetação como ferramenta de avaliação da vegetação de cobertura do aterro de resíduos sólidos urbanos de Rosário do Sul/RS

Vegetation indices as a tool for evaluating the cover vegetation of the urban solid waste landfill in Rosário do Sul/RS

Índices de vegetación como herramienta para evaluar la cobertura vegetal del vertedero de residuos sólidos urbanos de Rosário do Sul/RS

Alexandre Felipe Bruch

Doutor em Geografia

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: afbruch@gmail.com

Karina Retzlaff Camargo

Doutora em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Rio Grande - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: karinacamargo@furg.br

Marciano Carneiro

Doutor em Engenharia de Minas

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Porto Alegre, Brasil

E-mail: marciano.carneiro@ufrgs.br

Isabel Cordeiro Borges

Graduanda em Engenharia Geológica

Instituição: Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)

Endereço: Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: isabel.engeo@gmail.com

Tassius Pereira Lima

Graduando em Engenharia Geológica

Instituição: Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)

Endereço: Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: tassius.lima.tl@gmail.com

Gabriel Fragali de Castro

Graduado em Geoprocessamento

Instituição: Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)

Endereço: Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: gabrielfragali.castro2015@gmail.com

Vinicius Klumb

Graduado em Geoprocessamento

Instituição: Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)

Endereço: Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: viniklumb@gmail.com

Talison Luis de Britto Monte

Graduando em Geoprocessamento

Instituição: Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)

Endereço: Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: talisonluisbritto@gmail.com

RESUMO

Este estudo analisou a vegetação de cobertura do aterro sanitário de Rosário do Sul/RS, utilizando índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e NDWI (Normalized Difference Water Index) obtidos por meio de aerolevantamentos realizados com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). O objetivo principal foi monitorar as condições ambientais e geotécnicas da área, identificando locais críticos, como regiões de erosão e vegetação degradada, para subsidiar ações de mitigação ambiental. A metodologia integrou sensores multiespectrais acoplados a VANTs com sistemas de posicionamento GNSS-RTK de alta precisão para coleta de dados georreferenciados. As imagens foram processadas com ferramentas fotogramétricas e analisadas no software QGIS. O NDVI demonstrou ser uma ferramenta eficaz para segmentar a vegetação em classes que variaram de solo exposto até vegetação de cobertura invasora. Valores negativos e próximos de zero indicaram áreas de erosão ou ausência de vegetação, enquanto valores altos refletiram a presença de espécies invasoras, que, apesar de não planejadas, contribuíram para a estabilização do solo. O NDWI complementou a análise ao identificar áreas com maior estresse hídrico, reforçando a relação entre a disponibilidade de água e o vigor vegetativo. Os resultados evidenciaram que a combinação de sensoriamento remoto, fotogrametria e índices espectrais é essencial para monitorar aterros sanitários, permitindo identificar áreas prioritárias para intervenções. Este estudo destaca a relevância dessas tecnologias na gestão ambiental e no planejamento sustentável de áreas impactadas por resíduos sólidos.

Palavras-chave: NDVI, NDWI, aterro sanitário, monitoramento.

ABSTRACT

This study analyzed the cover vegetation of the sanitary landfill in Rosário do Sul/RS using vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) obtained through aerial surveys conducted with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The main objective was to monitor the environmental and geotechnical conditions of the area, identifying critical sites, such as regions of erosion and degraded vegetation, to support environmental mitigation actions. The methodology integrated multispectral sensors attached to UAVs with high-precision GNSS-RTK positioning systems for georeferenced data collection. The images were processed using photogrammetric tools and analyzed in QGIS software. The NDVI proved to be an effective tool for segmenting vegetation into classes ranging from exposed soil to invasive cover vegetation. Negative and near-zero values indicated erosion-prone areas or absence of vegetation, while higher values reflected the

presence of invasive species, which, despite being unplanned, contributed to soil stabilization. The NDWI complemented the analysis by identifying areas with greater water stress, reinforcing the relationship between water availability and vegetative vigor. The results showed that combining remote sensing, photogrammetry, and spectral indices is essential for monitoring sanitary landfills, enabling the identification of priority areas for intervention. This study highlights the relevance of these technologies in environmental management and the sustainable planning of areas impacted by solid waste.

Keywords: NDVI, NDWI, sanitary landfill, monitoring.

RESUMEN

Este estudio analizó la vegetación de cobertura del relleno sanitario de Rosário do Sul/RS utilizando índices de vegetación NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), obtenidos mediante levantamientos aéreos realizados con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs). El objetivo principal fue monitorear las condiciones ambientales y geotécnicas del área, identificando sitios críticos, como regiones de erosión y vegetación degradada, para apoyar acciones de mitigación ambiental. La metodología integró sensores multispectrales acoplados a VANTs con sistemas de posicionamiento GNSS-RTK de alta precisión para la recolección de datos georreferenciados. Las imágenes fueron procesadas utilizando herramientas fotogramétricas y analizadas en el software QGIS. El NDVI demostró ser una herramienta eficaz para segmentar la vegetación en clases que variaron desde suelo expuesto hasta vegetación invasora. Los valores negativos y cercanos a cero indicaron áreas propensas a la erosión o ausencia de vegetación, mientras que los valores altos reflejaron la presencia de especies invasoras que, aunque no planeadas, contribuyeron a la estabilización del suelo. El NDWI complementó el análisis al identificar áreas con mayor estrés hídrico, reforzando la relación entre la disponibilidad de agua y el vigor vegetativo. Los resultados evidenciaron que la combinación de teledetección, fotogrametría e índices espectrales es esencial para monitorear rellenos sanitarios, permitiendo identificar áreas prioritarias para intervenciones. Este estudio destaca la relevancia de estas tecnologías en la gestión ambiental y la planificación sostenible de áreas impactadas por residuos sólidos.

Palabras clave: NDVI, NDWI, relleno sanitario, monitoreo.

1 INTRODUÇÃO

O aumento constante na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) reflète diretamente o crescimento populacional, a intensificação da urbanização e os padrões de consumo atuais. Esse fenômeno impõe um desafio crescente à gestão ambiental, especialmente em áreas urbanas, onde a quantidade de resíduos gerados diariamente exige soluções eficazes para coleta, tratamento e disposição final. Nesse cenário, os aterros sanitários surgem como a principal estratégia para o descarte de materiais que não podem ser reciclados ou reaproveitados, devido à

sua capacidade de oferecer um manejo controlado e ambientalmente seguro (Benvenuto, 2012).

Apesar de sua importância, os aterros sanitários enfrentam problemas geotécnicos críticos, como deslizamentos e colapsos, evidenciados em estudos realizados por Nagalli (2005), Nascimento (2007), Schuller (2010), Benvenuto (2012, 2016 e 2019) e Shimazaki (2017). Esses incidentes destacam a necessidade de monitoramento contínuo e estratégias de mitigação. Normas técnicas, como a NBR 11.682 (ABNT, 2006), que trata do mapeamento de áreas de risco de deslizamentos, e a NBR 8.419 (ABNT, 1992), que aborda os critérios para operação de aterros sanitários, reforçam a relevância de práticas preventivas, especialmente em locais onde a cobertura vegetal está degradada ou em condições precárias (Benvenuto, 2012).

As mudanças climáticas intensificam ainda mais os desafios enfrentados pelos aterros sanitários. Eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, chuvas intensas e ondas de calor, têm se tornado mais frequentes e impactantes, afetando a integridade ambiental e operacional desses espaços (Ganho, 2019; Fernandes *et al.*, 2021; Ayanlade *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2023). Entre os efeitos mais notáveis, o aumento da intensidade das chuvas tem exacerbado os processos de erosão hídrica, contribuindo para a perda de solo, a degradação ambiental e o comprometimento da vegetação de cobertura (Borrelli *et al.*, 2020). Essa vegetação desempenha papel essencial na estabilização do solo e na prevenção de problemas geotécnicos, sendo um elemento-chave para o funcionamento sustentável dos aterros.

Nesse contexto, ferramentas tecnológicas como o sensoriamento remoto e a fotogrametria, têm recebido destaque como aliadas indispensáveis para o monitoramento ambiental. Os índices de vegetação, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), permitem avaliar com precisão o estado da cobertura vegetal, fornecendo informações sobre seu vigor, saúde e densidade. Estudos, como os de Nery *et al.* (2014) e Côrrea *et al.* (2018), destacam que esses índices são fundamentais para compreender os processos de degradação do solo e acompanhar a dinâmica da vegetação em áreas impactadas. No caso de aterros sanitários, essas análises ajudam a identificar condições de estresse hídrico e áreas que demandam ações de recuperação ambiental.

Portanto, este trabalho propõe o uso de imagens capturadas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para o mapeamento da vegetação de cobertura do aterro sanitário de RSU do município de Rosário do Sul/RS, com o objetivo de monitorar suas condições geotécnicas e ambientais. Além disso, busca-se identificar regiões onde a vegetação apresenta sinais de

fragilidade, como estresse hídrico ou redução do vigor vegetativo, contribuindo para a formulação de estratégias que minimizem os riscos associados à erosão do solo e à instabilidade do terreno. Ao explorar essas tecnologias, pretende-se fornecer subsídios técnicos para uma gestão mais eficiente e sustentável dos aterros sanitários.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O gerenciamento sustentável de aterros sanitários é uma das maiores preocupações ambientais globais, especialmente diante do aumento constante da produção de resíduos sólidos. A complexidade desse desafio inclui a necessidade de monitorar e controlar áreas de disposição de resíduos para prevenir impactos adversos ao meio ambiente, como contaminação do solo e da água, emissões de gases e proliferação de vetores de doenças. Nesse contexto, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto, como câmeras que capturam índices de vegetação (NDVI) e índices hídricos (NDWI), acopladas a Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), apresenta-se como uma solução promissora para a gestão e o monitoramento de aterros sanitários.

Os VANTs permitem a coleta rápida, precisa e econômica de dados sobre grandes áreas. Quando equipados com câmeras multiespectrais, os VANTs possibilitam a análise da vegetação, da umidade do solo e da presença de corpos hídricos próximos aos aterros sanitários (Bruch *et al.*, 2024). Sendo assim, as imagens multiespectrais e os índices de vegetação como o NDVI e o NDWI, podem ser utilizados em conjunto com VANTs para monitorar aterros sanitários, visando identificar áreas críticas, avaliar a cobertura vegetal e detectar potenciais vazamentos de líquidos percolados, conhecidos como chorume.

Cabe destacar que desde os anos 1960, o sensoriamento remoto e a fotogrametria têm sido ferramentas essenciais para o monitoramento ambiental, com aplicações que abrangem agricultura, mapeamento geológico, meteorologia e planejamento urbano (Liu, 2007; Jensen, 2009). Os índices espectrais, como o NDVI e o NDWI, destacam-se entre as metodologias mais utilizadas, pois oferecem informações detalhadas sobre características biofísicas do solo e da vegetação.

O NDVI, proposto por Rouse *et al.* (1973), mede a atividade fotossintética da vegetação e o vigor do crescimento vegetal com base na diferença entre as bandas do visível (vermelho) e do infravermelho próximo. Em contraste, o NDWI, introduzido por McFeeters (1996), é usado

para avaliar a presença de água em corpos hídricos e no solo, sendo particularmente útil para monitorar umidade e detectar estresse hídrico.

Segundo Bruch *et al.* (2024) o NDVI de Rouse *et al.* (1973) se difundiu rapidamente 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. Como se trata de uma normalização, o resultado varia de valores negativos (de -1), as quais se referem às nuvens e próximos a zero representam o solo exposto ou sem vegetação. Valores superiores à zero (até +1) 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).

Com características semelhantes, principalmente no rito metodológico de determinação, o 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). Segundo Bruch *et al.* (2024), com a evolução dos sensores com alta resolução especial, principalmente os aerotransportados, foi possível a geração de NDWIs para a determinação de índices de escassez 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 (Bruch *et al.*, 2024).

3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

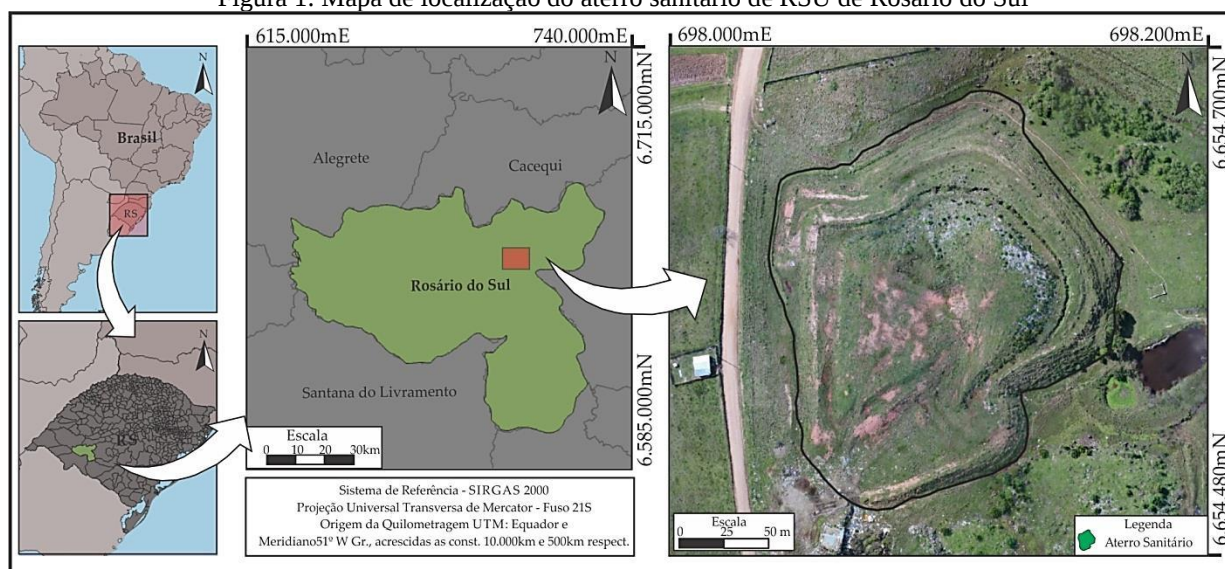
O aterro de resíduos sólidos urbanos do município de Rosário do Sul encontra-se com suas operações encerradas, sendo que recebeu a deposição de materiais até aproximadamente o ano de 2017. Possui uma localização delimitada pelas coordenadas 698.000 mE e 698.200 mE e 6.654.480 mN e 6.654.700 mN (Figura 01), relacionadas a Projeção Universal Transversa de Mercator, no seu Fuso 21. O acesso é realizado a partir da BR290, sentido Rosário do Sul – Uruguaiana/RS, entrando a direita na estrada da divisa.

A geologia da região do aterro é composta por rochas sedimentares da Formação Rosário do Sul pertencente à Bacia do Paraná. Esta formação é constituída por arenitos feldspáticos finos a médios intercalados com siltitos e argilitos micáceos. No local da disposição, a unidade

litológica da porção superior da área é composta por arenitos finos a muito finos (0.1 a 0.5mm) de cor rosa a castanho avermelhada quando alterados. Os arenitos mostram estratificação plano-paralela e apresentam composição quartzo-feldspática com uma matriz argilosa.

A morfologia dos terrenos é de baixa altitude, suavemente ondulados, com o substrato compreendido por rochas sedimentares características da Província Geológica/Geomorfológica da Depressão Central (SPGG, 2018). Pedologicamente predominam argissolos e neossolos, com profundidades de até 2m. Conforme o IBGE (2024), a população do município é de 39.707 habitantes, sendo que 67% possuem esgotamento sanitário e mais de 90% recolhimento de lixo domiciliar.

Figura 1: Mapa de localização do aterro sanitário de RSU de Rosário do Sul



Fonte: Elaborado pelos autores.

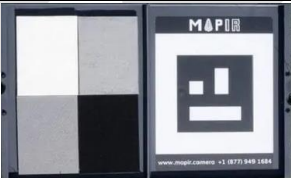
4 MATERIAS E MÉTODOS

O aerolevantamento do aterro sanitário foi realizado com o VANT multirrotor fabricado pela DJI, modelo Phantom 4 Advanced. O registro das fotos aéreas foi executado utilizando-se uma câmera NDVI 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) (Bruch *et al.*, 2024). Para a 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).

Para a determinação das coordenadas dos Pontos de Controle e Checagem foi utilizado um par de receptores do sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) com recepção de correções em tempo real - RTK. Os receptores são da marca Ashtech, modelo Promark 500, bandas L1, L2 e multi constelação (GPS e GLONASS).

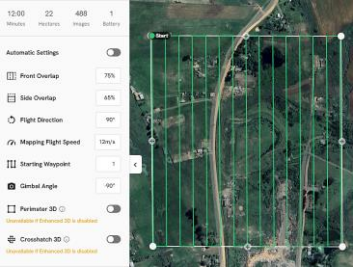
Tabela 1: Equipamentos utilizados para o levantamento de campo

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

Fonte: Bruch *et al.* (2024)

Para a elaboração do aerolevanteamento, faz-se necessário a elaboração de 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
	Altura 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 01 segundos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o controle das posições geodésicas do ortomosaico foram utilizados 12 Pontos de Controle (PCs) em campo (Tabela 3). O registro das coordenadas tridimensionais 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 (Bruch *et al.*, 2024). 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), conforme a metodologia de translação geodésica proposta por Bruch *et al.* (2019) e Carneiro *et al.* (2022). O sistema de referência geodésico utilizado foi o SIRGAS 2000 e a Projeção é a Universal Transversa de Mercator em seu Fuso 21.

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	698116.292	6654606.162	120.885
	2	698091.567	6654586.691	119.855
	3	698083.325	6654618.144	120.388
	4	698051.857	6654558.233	119.725
	5	698019.639	6654625.633	112.585
	6	698024.134	6654533.520	115.543
	7	698084.824	6654505.811	112.123
	8	698159.000	6654564.973	107.357
	9	698170.988	6654627.880	107.750
	10	698116.292	6654678.056	108.171
	11	698058.600	6654667.571	109.555
	12	698006.152	6654580.700	114.453

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a determinação dos PCs em campo, foi posicionado o alvo calibrador de reflectância difusa V2, a qual ficou distante alguns metros do ponto de decolagem do VANT. Visto o registro

de inúmeras fotos no ponto de decolagem, principalmente por causa do tempo de verticalidade até a altura de levantamento, o alvo calibrador foi encontrado em diversas imagens registradas pela câmera Mapir Survey 3W. O alvo calibrador foi identificado em 14 imagens, sendo que em 5 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, conforme a proposta de Bruch *et al.* (2024).

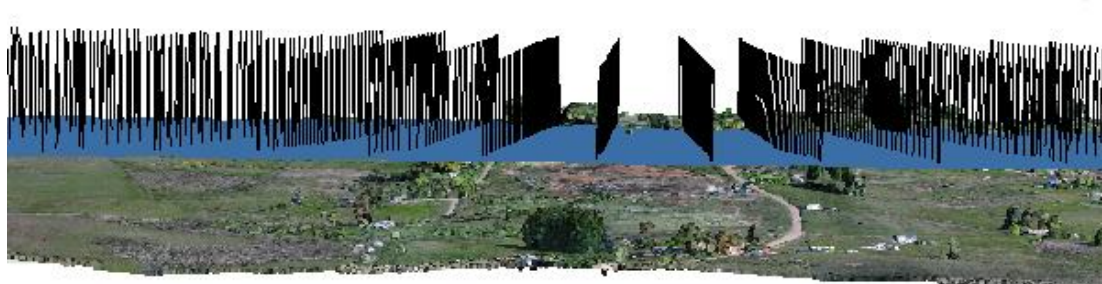
Várias correções radiométricas são realizadas, principalmente a correção de vinheta, a qual ilumina o perímetro externo dos pixels das imagens, visto serem mais escuros devido à óptica da lente. Já a correção da resposta do sensor corrige as diferenças de sensibilidade do sensor causada pelo filtro de 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 e Bruch *et al.*, 2024). Por fim, as imagens calibradas são exportadas no formato Joint Photographics Experts Group (JPEG).

Na geração do ortomosaico e do Modelo Digital de Superfície, utilizou-se o programa de processamento fotogramétrico denominado 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 possui a capacidade de 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) e Bruch *et al.* (2024), a tecnologia SfM-MVS, permite processar imagens arbitrárias, com variação de sobreposição, desde que existam pontos homólogos em imagens distintas. O Metashape possui 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).

O processamento se inicia com a análise visual da qualidade das imagens e a importação do bloco fotogramétrico 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. Na sequência são localizados os 12 PCs nas imagens através da identificação visual dos alvos materializados em campo. A próxima etapa efetuada foi 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 (k1, k2, k3) e os coeficientes de distorção tangencial (P1, P2). Na última etapa é gerada a nuvem densa e os produtos finais como ortomosaico fotogramétrico na região do visível e as bandas para a geração do NDVI. O ortomosaico foi exportado no formato JPEG e as bandas com os comprimentos de onda isolados foram exportadas no formato TIFF, para a geração dos índices de vegetação no programa Quantum GIS (Qgis 3.28).

Figura 2: Nuvem esparsa de pontos homólogos



Fonte: Elaborado pelos autores.

A geração dos índices de vegetação seguiram a proposta de Rouse *et al.* (1973) para NDVI, conforme descrita na Equação 1 e de McFeeters (1996) apresentada na Equação 2. A aplicação das equações foi realizada através da ferramenta Calculadora Raster presente no Qgis 3.28 e conforme a proposta de processamento de Bruch *et al.* (2024).

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

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

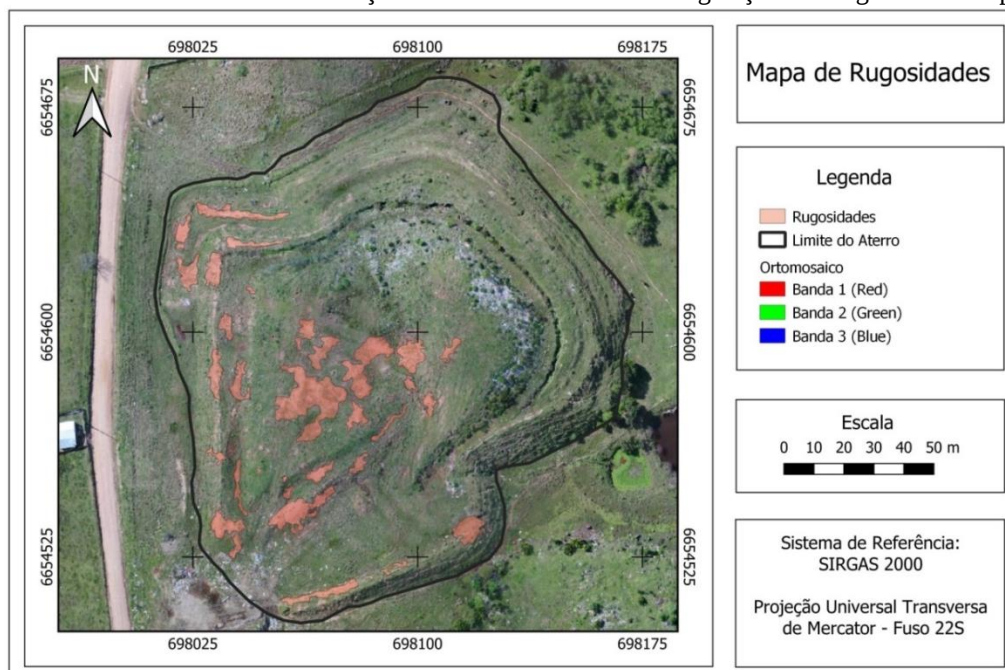
Os aerolevantamentos fotogramétricos com câmeras de pequeno formato ganharam importância nos últimos 10 anos, principalmente pela possibilidade de geração de produtos cartográficos com alta resolução espacial e temporal. Já recentemente, foram desenvolvidas câmeras multiespectrais de pequeno formato, capazes de serem embarcadas em plataformas comerciais, possibilitando a geração de um número maior de produtos espectrais.

Sendo assim, os resultados gerados e avaliados no ortomosaico fotogramétrico, elaborado com as bandas espectrais da região do visível (B1-Azul, B2-Verde, B3-Vermelho), demonstram que ocorrem descontinuidades na vegetação de fixação e cobertura do aterro sanitário (Figura 3). Foram mapeados 32 polígonos as quais perfazem uma área com 1.505 m² de rugosidades e/ou descontinuidades na vegetação de cobertura.

Em pontos isolados ocorre a instalação de ravinamentos de diminutas dimensões, sendo que na maior parte dos polígonos ocorre apenas erosão laminar. Cabe destacar que 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), Julian e Nunes (2020) e Bruch *et al.* (2024) atribuem os bons 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.

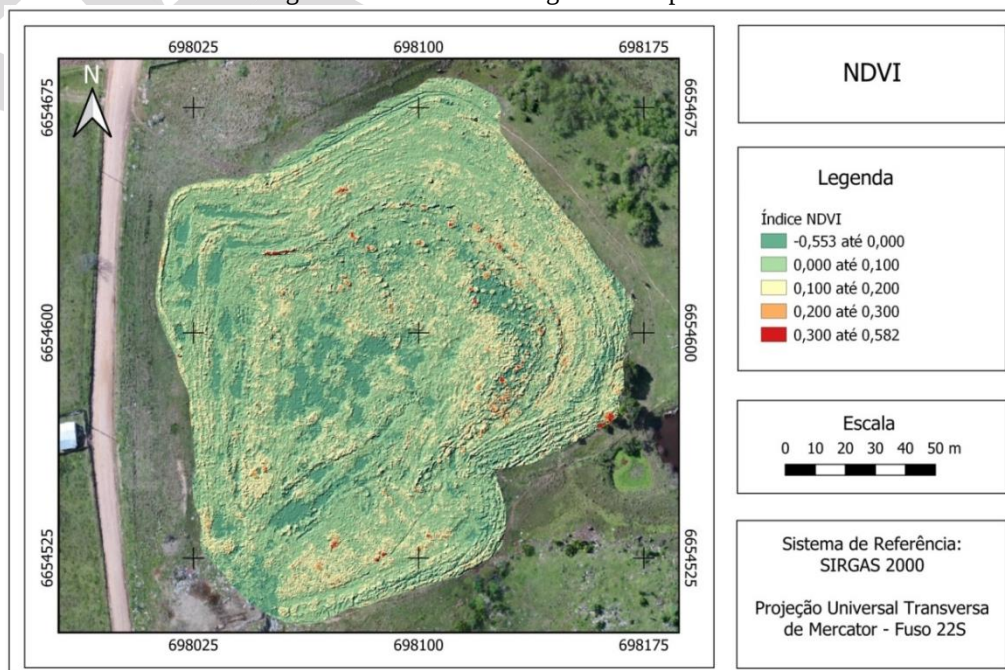
Visto a variação de cobertura vegetal e a necessidade de enquadrar diferentes respostas de índices de vegetação, foi realizada a segmentação por classes dos intervalos de resposta radiométrica, sendo que se observa na Figura 4 o NDVI em 5 classes e na Figura 5 o histograma a qual gerou a segmentação dos intervalos entre os 5 alvos descritos. Cabe destacar que a matriz NDVI gerou 1.378.277 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. Resultados semelhantes foram encontrados por Carneiro *et al.* (2022) e Bruch *et al.* (2024) em aerolevantamentos com as mesmas alturas de voo.

Figura 3: Ortomosaico com a delimitação das discontinuidades da vegetação e as rugosidades mapeadas



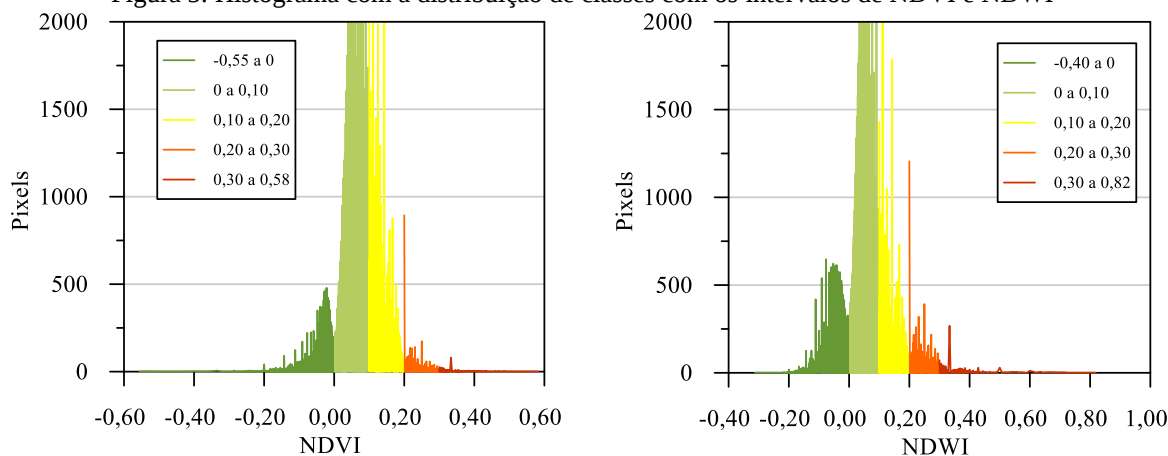
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4: Índices NDVI segmentados por alvos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5: Histograma com a distribuição de classes com os intervalos de NDVI e NDWI



Fonte: Elaborado pelos autores.

No que se refere às respostas radiométricas do NDVI calculado, foram encontrados índices entre -0,555 e 0,582. As respostas de NDVI entre -0,555 e 0 correspondem aos locais com solo exposto, principalmente no topo do aterro sanitário e nos taludes com face oeste. Em geral, são locais onde ocorre à erosão laminar lenta e a inserção de pequenos sulcos (ravinas). Processos semelhantes foram encontrados no trabalho de Bruch *et al.* (2024), sendo que em sua maioria, com dimensões maiores e sulcos mais proeminentes.

Os trabalhos de monitoramento de solo exposto com NDVI gerados a partir de aerolevantamentos ainda são escassos, sendo resultados semelhantes encontrados por Beniaich *et al.* (2022) em pomares de oliveiras e amplas áreas de solo exposto entre linhas verdes. Outro trabalho importante é o de Ayalew *et al.* (2020), a qual 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 (Bruch *et al.*, 2024).

As respostas de NDVI que ficaram entre 0 e 0,100, são os locais onde a vegetação apresenta uma condição de senescência, com estatura próxima a 5cm e densidade rarefeita. Em geral, são gramíneas da família Poaceae e o gênero predominante é o *Andropogon*, sendo que ocorrem outros gêneros de forma isolada. Pela baixa densidade de cobertura, em eventos pluviométricos mais intensos, pode ocorrer o transporte do material de cobertura e fixação do aterro sanitário, fragilizando a integridade das células de deposição dos taludes.

Respostas de NDVI entre 0,100 e 0,200 (intervalo aproximado) correspondem às espécies pioneiras, com vigor vegetativo proeminente, principalmente da família Poaceae, do gênero

Calamagrostis. Apesar de possuírem estrutura perene, apresentam colmos ocos e de baixa resposta da clorofila, além de folhas finas com margens asperas, o que leva a reflectância difusa. Como possuem agrupamento perene em moitas, geralmente, colaboram na fixação dos taludes do aterro, assim como a fixação do material de cobertura.

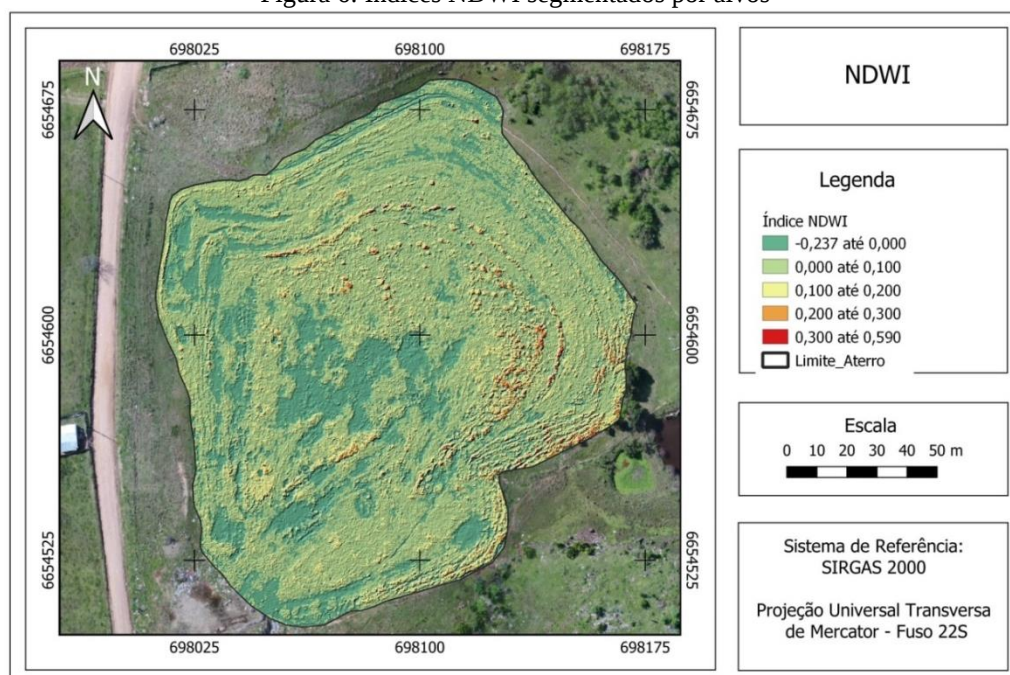
Os índices de NDVI entre 0,200 e 0,300 (aproximadamente) referem-se às plantas da família Cyperaceae, principalmente com o gênero *Rhynchospora*. São juncéias com significativo vigor vegetativo, perenes e com desenvolvimento atrelado a disponibilidade de água, principalmente. Apresentam geralmente flores e folhas pequenas, com densidade relativamente significativa, o que corresponde a uma resposta maior de índice NDVI.

Por fim, os maiores índices de resposta NDVI, variando entre 0,300 e 0,582, foram encontrados 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 *Dodonaea 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 e Bruch *et al.*, 2024).

Trabalhos como o de Bruch *et al.* (2024), confirmam a correlação entre respostas de NDVI e NDWI, principalmente quando a vegetação apresenta baixa variação constitutiva, ou seja, possui homogeneidade na família e gênero mapeados, além de área restrita. Sendo assim, os resultados de NDWI nesta pesquisa apresenta alta correlação com os índices de NDVI, visto que o vigor vegetativo das gramíneas da área de estudo, apresentam alta dependência da disponibilidade de água para o estabelecimento do seu crescimento.

Portanto, as respostas de NDWI ficaram entre os índices de -0,237 e 0,590, onde a classe com solo exposto apresentou um índice NDWI variando de -0,237 e 0 (Figura 6). Já o intervalo de resposta entre 0 e 0,100, corresponde as áreas com vegetação em senescência, quase integralmente correlacionada com as respostas de NDVI, demonstrando que a vegetação apresenta elevado estresse hídrico, a qual conduz a senescência.

Figura 6: Índices NDWI segmentados por alvos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Valores de NDWI entre 0,100 e 0,200 perfazem as áreas com espécies pioneiras, as quais possuem maior capacidade de suportar o estresse hídrico. Assim como o intervalo anterior, a classe com índice variando entre 0,200 e 0,300 possui uma vegetação mais adaptada ao estresse hídrico, além de vigor vegetativo pronunciado, onde o gênero *Rhynchospora* suporta a baixa disponibilidade de água.

Por fim, as pequenas áreas com respostas de NDWI entre 0,300 e 0,590 correspondem aos polígonos com vegetação invasora, as quais não pertencem ao projeto geotécnico original de cobertura e fixação dos taludes do aterro sanitário de Rosário do Sul. Apesar da baixa disponibilidade de água no período, a espécie *Dodonaceae viscosa* entremeada com a gramínea da família *Poaceae*, conseguem manter o vigor vegetativo em um contexto e consórcio em mosaico. Por fim, a tabela 4 apresenta as áreas calculadas para cada intervalo de NDVI e NDWI, demonstrando a necessidade de recomposição da vegetação de cobertura e fixação dos taludes do aterro sanitário. Além disso, demonstra a correlação entre os dois índices, comprovada pela similaridade das áreas calculadas e as pequenas discrepâncias métricas.

Tabela 4: Áreas calculadas para as diferentes classes de NDVI e NDWI

<i>NDVI</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>NDWI</i>	<i>Área (m²)</i>
-0,553 até 0,000	2.802,39	-0,237 até 0,000	2.803,43
0,000 até 0,100	11.827,31	0,000 até 0,100	11.831,67
0,100 até 0,200	4.781,02	0,100 até 0,200	4.775,49
0,200 até 0,300	301,22	0,200 até 0,300	301,33
0,300 até 0,582	37,91	0,300 até 0,590	37,93
Total	19.749,85		19.749,85

Fonte: Elaborado pelos autores.

6 CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma análise detalhada da vegetação de cobertura e fixação do aterro sanitário de Rosário do Sul/RS, através de imagens de NDVI e NDWI obtidos com técnica de aerolevantamento com VANT e posicionamento espacial de alta precisão com GNSS-RTK multifrequencia. As conclusões destacam que o uso dessas ferramentas permite identificar, com alta precisão espacial e temporal, as condições da cobertura vegetal e do solo, fornecendo informações valiosas para a gestão ambiental de áreas impactadas.

A pesquisa revelou que o NDVI foi eficaz na classificação da vegetação em diferentes estágios de desenvolvimento e densidade. Áreas com valores negativos ou próximos de zero indicaram solo exposto e erosão, especialmente em taludes e no topo do aterro, enquanto valores intermediários representaram vegetação em estágio de senescência ou espécies pioneiras, como gramíneas do gênero *Calamagrostis*. Já os valores mais altos de NDVI foram associados à vegetação invasora, como arbustos e gramíneas em mosaico, que demonstraram a capacidade de estabilizar o solo, apesar de não pertencerem ao plano original de revegetação.

O NDWI, por sua vez, complementou a análise, ao indicar condições de estresse hídrico nas áreas monitoradas. As correlações entre NDVI e NDWI reforçaram que a disponibilidade de água é um fator crítico para o vigor vegetativo, especialmente em espécies adaptadas, como *Rhynchospora*.

Com base nos resultados, o estudo conclui que a aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto e fotogrametria, com VANTs equipados com câmeras multiespectrais, é essencial para monitorar e mitigar impactos em aterros sanitários. Esses métodos permitem identificar áreas prioritárias para intervenção, como regiões com erosão ou vegetação degradada, e oferecem subsídios para uma gestão mais sustentável, reduzindo riscos ambientais e

geotécnicos. Assim, a pesquisa enfatiza a importância do uso dessas ferramentas para promover a estabilidade ambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos.



REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Estabilidade de Taludes. NBR-11.682. Rio de Janeiro: ABNT 39p. (1991).

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos de sólidos urbanos. NBR-8.419. Rio de Janeiro: ABNT 7p. (1992)

AYALEW, D. A.; DEUMLICH, D.; SARAPATKA, B.; DOKTOR, D. Quantifying the sensitivity of NDVI-based C-factor estimation and potential soil erosion prediction using spaceborne earth observation data. **Remote Sens.** v. 12, 1136. (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12071136>. Acesso em: 15/11/2023

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100311> Acesso em: 12/12/2023

BÁCOVÁ, M.; KRÁSA, J.; DEVÁTÝ, J.; KAVKA P. A. GIS method for volumetric assessments of erosion rills from digital surface models. **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, S1, p. 96-107. (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1543556>. Acesso em: 07/09/2024

BENIAICH, A.; SILVA, M. L.; GUIMARÃES, D. V.; AVALOS, F. A.; TERRA, F. S.; MENEZES, M. D.; JUNIOR, C. A.; CÂNDIDO, B. M. UAV-Based Vegetation Monitoring for Assessing the Impact of Soil Loss in Olive Orchards in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 30. e00543. (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00543> Acesso em: 07/09/2024

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

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

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; BALLABIO, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **PNAS.** v. 117. n.36. p. 21994-22001. (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117> Acesso em: 01/08/2024

BRUCH, A. F.; CIROLINI, A. ; THUM, A. B. ; CARNEIRO, M. 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. (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p283-298> Acesso em: 07/09/2024

BRUCH, A. F.; CAMARGO, K. R.; CARNEIRO, M.; CASTRO, G. F.; KLUMB, V.; MONTE, T. L. B.; BORGES, I. C. Vegetation density mapping of urban solid waste landfill coverage using vegetation indexes obtained with UAV. **RGSA**. v. 18. n.11. p. 01-19. (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-218> Acesso em: 01/08/2024

CARNEIRO, M.; PERONI, R. DE L.; BRUCH, A. F.; CIROLINI, A.; THUM, A. B. New Methodology for Precise UAV Surveys with a Single Ground Control Point. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**. 45, 1-12. (2022). Disponível em: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_44874 Acesso em: 07/09/2024

CARRIVICK, J.F.; SMITH, M.W.; QUINCEY, D.J., **Structure from motion in the geosciences**. John Wiley & Sons. (2016).

CÔRREA, J. V.; ALMEIDA, L. C. O.; RIBEIRO, F. R. 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. (2018).

COSTA, G.; BLANCO, C.; LOBATO SOARES, A.; CRUZ, J.; MENDONÇA, L. 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. (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rega.v20e6>. Acesso em: 01/08/2024

FERNANDES, V.; CUNHA, A.; CUARTAS, L.; DEUSDARÁ-LEAL, K.; COSTA, L. C.; BROEDEL, E.; FRANÇA J.; ALVALÁ, R.; SELUCHI, M.; MARENGO, J. Secas e os impactos na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. v.28. (2021). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74717>. Acesso em: 07/09/2024

GANHO, N. Mudanças climáticas e mudanças na valoração do clima, em Portugal, nos últimos 50 anos. **Acta Geográfica**, v.13(33), 196-208. (2019).

GUERRA, A. J. T. 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. (2005).

HUNT, E. R. JR.; HIVELY, W. D.; FUJIKAWA, S. J.; LINDEN, D. S.; DAUGHTRY, C.S.T., MCCARTY, G.W. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. **Remote Sensing**. v.2(1):290-305. (2010). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs2010290> Acesso em: 01/08/2024

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/rosario-do-sul/> Acesso em 20/11/2024.

JENSEN, J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos, SP: Parêntese editora, 598 p. (2009).

JULIAN, C.; NUNES, J. O. R. 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). (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1818> Acesso em: 08/05/2024

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Ed. Uniderp. (2007).

LU, L.; LUO, J.; XIN, Y.; XU, Y.; SUN, Z.; DUAN, H.; XIAO, Q.; QIU, Y.; HUANG, L.; ZHAO, J. A novel strategy for estimating biomass of submerged aquatic vegetation in lake integrating UAV and Sentinel data. **Sci. Total. Environ.** v. 912. (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169404> Acesso em: 07/09/2024

MAPIR. **Environmental Monitoring**. (2024). Disponível em: <https://www.mapir.camera/en-gb> Acesso em: 08/05/2024

MCFEETERS, S.K. 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. (1996). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714> Acesso em: 07/09/2024

MEMON, A. A.; MUHAMMAD, S.; RAHMAN, S.; HAQ, M. 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. (2015). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.003> Acesso em: 07/09/2024

NAGALLI, A. 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. (2005).

NASCIMENTO, J. C. F. do. Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. **Dissertação** (Mestrado em Geotecnia) PPG EESC/USP. (2007).

NERY, C. V. M.; MOREIRA, A. A.; FERNANDES, F. H. S.; ALMEIDA, L. S.; ALMEIDA, R. P. 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. (2014). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/RCG154923435> Acesso em: 17/05/2024

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. 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. (1973).

SCHULER, A. R. 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. (2010).

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

TADDIA, Y.; STECCHI, F.; PELLEGRINELLI, A. Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. **Drones**, v. 4, n. 9, p. 1-19. (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones4020009> Acesso em: 22/09/2024

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

WANG, R.; ZHANG, S.; PU, L.; YANG, J.; YANG, C.; CHEN, J.; GUAN, C.; WANG, Q.; CHEN, D.; FU, B.; SANG, X. 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. (2016). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi5110200>. Acesso em: 20/01/2024

ZHOU, Y.; DAAKIR, M.; RUPNIK, E.; PIERROT-DESEILLIGNY, M. 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. (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.020> Acesso em: 20/02/2024