XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/43

Geossintéticos e Métricas de Sustentabilidade: Emissões de CO_2e e Diretrizes para o Contexto Brasileiro

Maria Alejandra Aparicio-Ardila
Pesquisadora de pós-doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, maparicio@usp.br

Emilia Mendonça Andrade
Gestora de Área de Negócios Ambiental, Huesker LTDA., São José dos Campos, Brasil, emilia@huesker.com

Victor Eduardo Pimentel
Diretor Executivo, Geo Soluções, São Paulo, Brasil, victor.pimentel@geosolucoes.com

Jefferson Lins da Silva
Professor Associado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: A sustentabilidade é destacada como um dos principais benefícios do uso de geossintéticos em obras ambientais e de infraestrutura. No entanto, para que essa afirmação deixe de ser discursiva e passe a orientar decisões técnicas, econômicas e regulatórias, é fundamental adotar métricas quantitativas que permitam demonstrar, de forma objetiva, o desempenho ambiental dessas soluções. Entre os indicadores de impacto ambiental, o Potencial de Aquecimento Global (GWP-Total) apresentado em dióxido de carbono equivalente ($KgCO_2e$) é reconhecido internacionalmente como a principal métrica para quantificar impactos associados ao ciclo de vida de produtos e sistemas construtivos. Este trabalho apresenta uma análise consolidada de Declarações Ambientais de Produto (DAPs) de geotêxteis (tecidos e não tecidos) com foco nos módulos A1–A3 (berço ao portão) da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Os resultados indicam variações nos valores de GWP-Total associadas ao tipo de polímero, à origem da matéria-prima e às características dos processos produtivos, evidenciando o papel dessas variáveis no desempenho ambiental dos produtos. A análise demonstra a aplicabilidade das DAPs como instrumento técnico para a comparação de soluções geotécnicas e para a incorporação de métricas ambientais em projetos de infraestrutura, contribuindo para o avanço da avaliação de sustentabilidade no contexto brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Sustentabilidade, Impacto ambiental, ACV.

ABSTRACT: Sustainability is often highlighted as one of the main benefits of using geosynthetics in environmental and infrastructure works. However, for this assertion to move beyond a merely discursive level and effectively support technical, economic, and regulatory decision-making, it is essential to adopt quantitative metrics that objectively demonstrate the environmental performance of these solutions. Among environmental impact indicators, the Global Warming Potential (GWP-Total), expressed in kilograms of carbon dioxide equivalent (kg CO_2e), is internationally recognized as the primary metric for quantifying the life-cycle impacts of construction products and systems. This study presents a consolidated analysis of Environmental Product Declarations (EPDs) for geotextiles (woven and nonwoven), focusing on modules A1–A3 (cradle-to-gate) of the Life Cycle Assessment (LCA). The results indicate variations in GWP-Total values associated with polymer type, raw material origin, and manufacturing process characteristics, highlighting the role of these variables in the environmental performance of the products. The analysis demonstrates the applicability of EPDs as a technical tool for comparing geotechnical solutions and for incorporating environmental metrics into infrastructure projects, thereby advancing sustainability assessment in the Brazilian context.

KEYWORDS: Geosynthetics, Sustainability, Environmental impact, LCA.

1 INTRODUÇÃO

A transição para uma economia de baixo carbono exige que o setor de infraestrutura adote metodologias robustas de gestão de emissões e sustentabilidade, baseadas em métricas reconhecidas internacionalmente. O setor da construção civil, responsável por uma parcela significativa do consumo energético global e das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado pesquisas voltadas à ACV de materiais de engenharia, incluindo os geossintéticos (Andrade et al., 2024; Araújo et al., 2025; Bizjak e Lenart ,2018; Pimentel, 2024; Xue et al., 2025; Zornberg et al., 2024).

A ACV operacionalizada por meio de DAPs, constitui atualmente o principal instrumento reconhecido internacionalmente para a mensuração e comunicação padronizada do desempenho ambiental de produtos da construção civil. Apesar da crescente disponibilidade de DAPs para geossintéticos em mercados internacionais, a divulgação dessas informações ainda é incipiente, especialmente no contexto brasileiro.

No Brasil, materiais de construção tradicionais, como cimento, concreto, aço e agregados, já possuem DAPs elaboradas conforme os mesmos referenciais normativos adotados globalmente, em especial as normas NBR ISO 14025 (2015) e a EN 15804 (2019). As DAPs brasileiras utilizam dados representativos da matriz energética nacional, predominantemente hidrelétrica, enquanto DAPs europeias adotam mixes energéticos locais ou regionais. Essa diferença afeta os valores absolutos de impacto ambiental, como o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*), mas não o método de cálculo nem a estrutura da ACV.

Um marco relevante para o setor de geossintéticos foi o estudo encomendado pela *European Association of Geosynthetic Manufacturers* (EAGM), conduzido por Stucki et al. (2011), que realizou uma ACV comparativa entre soluções com geossintéticos e materiais convencionais, como concreto, cimento, cal e cascalho. O estudo abrangeu quatro aplicações típicas: filtração, estabilização de fundações, drenagem em aterros e contenção de taludes (Dixon et al., 2016; Dixon et al., 2017; Ehrenberg et al., 2012). A metodologia utilizada seguiu as normas ISO equivalentes às normas NBR ISO 14040 (2025) e NBR ISO 14044 (2025). Essas normas fundamentam a elaboração de DAP conforme a NBR ISO 14025 (2015), que regulamenta as declarações ambientais Tipo III. As informações geradas por DAPs podem contribuir para a quantificação de emissões indiretas da cadeia de suprimentos, frequentemente consideradas nos inventários corporativos do Escopo 3 do *Greenhouse Gas Protocol Initiative* (2004).

Um dos desafios iniciais nas ACV aplicadas a geossintéticos era a ausência de dados específicos de carbono incorporado (*Embodied Carbon*), o que obrigava o uso de valores genéricos para polímeros como polipropileno e polietileno (Dixon et al., 2017; Raja et al., 2015; Touzé, 2022; Xue et al., 2025). Estudos como o de Raja et al. (2015) avançaram ao calcular dados de EC específicos para diferentes categorias de geossintéticos, geotêxteis não tecidos, geogrelhas e geocompósitos, a partir de dados primários de fabricação.

No contexto brasileiro, o setor de geossintéticos possui forte representatividade técnica e normativa, com atuação destacada de associações como *a International Geosynthetic Society* (IGS) Brasil, o Comitê Técnico de Geossintéticos da Associação Brasileira das Indústrias de Nãotecidos e Tecidos Técnicos (CTG-ABINT) e a Comissão de Estudo Especial de Geossintéticos (CEE-175) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Contudo, a quantificação dos benefícios ambientais dessas soluções ainda é incipiente, principalmente pela escassez de DAPs nacionais de geossintéticos.

Estudos recentes mostram que o impacto ambiental da produção de geossintéticos é fortemente influenciado pela produção das matérias-primas (pellets plásticos) e pelo consumo de eletricidade nos processos de extrusão e conformação (Araújo et al., 2025; Benetto, 2025; Elsin et al., 2012; Fraser et al., 2012; Frischknecht et al., 2013; Xue et al., 2025).

Nesse cenário, torna-se essencial desenvolver metodologias integradas que unam a ACV, os inventários nacionais de carbono e as normas brasileiras mais recentes. O Plano de Ação Climática da ABNT (GC-PAC) tem impulsionado essa convergência por meio da publicação de normas como a NBR ISO 14067 (Pegada de Carbono de Produto, 2023), NBR ISO 14068-1 (Neutralidade de Carbono, 2025) e NBR ISO 59004 (Economia Circular, 2024), promovendo o alinhamento do Brasil às práticas internacionais.

Com base em experiências recentes, como a de Andrade et al. (2024), que demonstrou uma redução de 73% nas emissões de CO_2e ao substituir cortinas atirantadas e muros em concreto (solução tradicional) por muros em solo reforçado com geogrelhas (solução com geossintéticos). As DAPs de geossintéticos permitem que fabricantes demonstrem, com base em dados verificáveis, os benefícios ambientais de suas soluções. A

quantificação do carbono incorporado aos geossintéticos não apenas contribui para a mitigação das emissões no setor de infraestrutura, mas também gera informações essenciais para a tomada de decisão corporativa, apoiando políticas de *Environmental, Social and Governance* (ESG) e inovação de produtos. E para além do âmbito corporativo, essas métricas também podem subsidiar instrumentos de política pública e processos de contratação de obras de infraestrutura, permitindo a incorporação de critérios ambientais objetivos em licitações e programas voltados à redução das emissões de carbono no setor da construção.

Este trabalho apresenta um consolidado de informações provenientes de DAPs de fabricantes internacionais de geossintéticos, disponibilizadas publicamente na plataforma de um único operador de programa. Para evitar associações comerciais diretas, são identificados apenas os países de origem dos fabricantes. A análise foi deliberadamente restrita a um único operador, com o objetivo de assegurar consistência metodológica, homogeneidade nos critérios de verificação e comparabilidade direta dos resultados. O estudo concentra-se nos geotêxteis, selecionados por constituírem o tipo de geossintético mais amplamente comercializado em escala global e por apresentarem ampla diversidade de funções técnicas em obras de infraestrutura. Essa versatilidade funcional, aliada ao elevado volume de produção, torna os geotêxteis particularmente adequados para análises de desempenho ambiental e para o estabelecimento de referências quantitativas que possam subsidiar o desenvolvimento de futuras DAPs no contexto brasileiro.

2 METODOLOGIA

Embora existam DAPs publicadas por diferentes operadores de programa, a análise foi deliberadamente restrita ao *International EPD® System*, de modo a garantir consistência metodológica, homogeneidade nos critérios de verificação e comparabilidade direta dos resultados. Destaca-se que, além de fabricantes europeus, o conjunto de dados inclui um fabricante localizado na Índia, ampliando a representatividade geográfica da amostra.

O indicador ambiental adotado foi o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP)* GWP-Total, expresso em kg CO_2e, que representa o impacto das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do produto. Conforme a EN 15804 (2019), o GWP-Total resulta da soma das contribuições fóssil, biogênica e associada às mudanças no uso do solo (luluc), permitindo uma avaliação integrada do impacto climático. Considerando a natureza predominantemente fóssil dos polímeros utilizados em geossintéticos, o GWP-fóssil tende a ser a parcela dominante; ainda assim, o uso do indicador agregado assegura alinhamento com os padrões internacionais de DAP.

Para garantir indicadores simples e comparáveis, a análise foi limitada aos módulos A1–A3 do ciclo de vida ("berço ao portão"), correspondentes às etapas de extração de matérias-primas, transporte interno e fabricação. Independentemente da fronteira de ACV declarada nas DAPs ("berço ao portão", "berço ao portão com opções" ou "berço ao túmulo").

Os valores de GWP-Total foram normalizados para kg CO_2e/kg. Quando apresentados em kg CO_2e/m^2, os dados foram convertidos para Kg com base na massa por unidade de área ou densidade informada. Ao todo, foram analisadas 16 DAPs de geotêxteis, incluindo produtos tecidos e não tecidos.

3 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta o conjunto de DAPs identificadas para os geotêxteis analisados neste estudo. Destaca-se que algumas DAPs contemplam mais de um produto ou linha comercial, resultando na identificação de 20 produtos distintos apresentados na tabela. Para determinados países, como Itália e Suécia, foram identificadas DAPs de mais de um fabricante, bem como múltiplas DAPs associadas a diferentes linhas de produtos de um mesmo fabricante, refletindo a diversidade de portfólios e de processos produtivos considerados. Os geotêxteis analisados foram fabricados predominantemente a partir de polipropileno (PP) ou poliéster (PET). Todos os valores apresentados referem-se exclusivamente aos módulos A1–A3, independentemente da fronteira declarada nas DAPs.

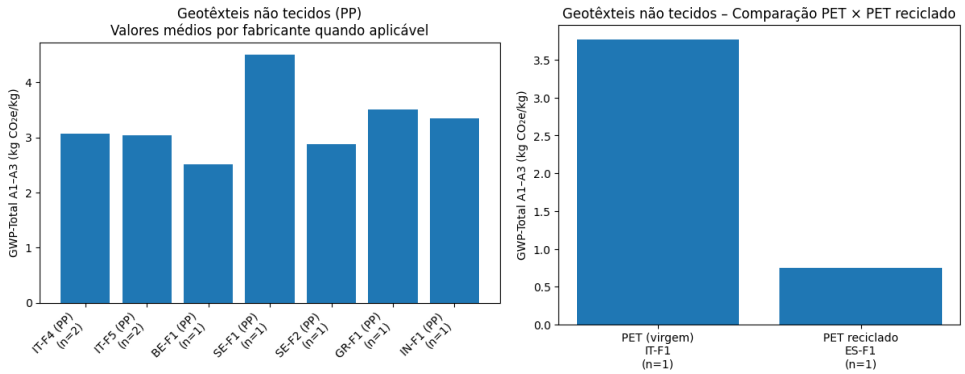
Tabela 1. DAPs de geotêxteis analisadas

ID DAP	Módulos declarados na DAP	Fronteira ACV	País	Fabricante	Tipo de geotêxtil	Polímero	Massa por unidade de área	GWP-Total A1–A3 (kg CO_2e/kg)
BE-F1-T-PP-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	92 g/m²	2,033**
BE-F1-T-PP-02	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	167 g/m²	2,078**
BE-F1-T-PP-03	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	110 g/m²	2,027**
BE-F1-T-PP-04	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Bélgica	Fabricante 1	Tecido	PP	365 g/m²	2,118**
ES-F1-NT-PET-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Espanha	Fabricante 1	Não tecido	PET reciclado	120–500 g/m²	0,745
GR-F1-NT-PP-01	A1–A3	Berço ao portão	Grécia	Fabricante 1	Não tecido	PP	*	2,520
IN-F1-NT-PP-01	A1–A3, A4, A5, B1, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Índia	Fabricante 1	Não tecido	PP	250 g/m²	4,500
IT-F1-NT-PET-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 1	Não tecido	PET	*	3,770
IT-F1-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 1	Não tecido	PP	*	3,720
IT-F2-NT-PP-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 2	Não tecido	PP	201 g/m²	3,144
IT-F3-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 3	Não tecido	PP	*	3,340
IT-F4-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 4	Não tecido	PP	191 g/m²	3,206
IT-F4-NT-PP-02	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 4	Não tecido	PP	556 g/m²	2,946
IT-F5-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 5	Não tecido	PP	*	3,070
IT-F5-NT-PP-02	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Itália	Fabricante 5	Não tecido	PP	*	3,020
LV-F1-T-PET-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Letônia	Fabricante 1	Tecido	PET	230–700 g/m²	7,070
UK-F1-NT-PP-01	A1–A3, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Reino Unido	Fabricante 1	Não tecido	PP	80–300 g/m²	2,434**

SE-F1-NT-PP-01	A1–A3, A4, A5, C1–C4, D	Berço ao portão (opções)	Suécia	Fabricante 1	Não tecido	PP	*	2,880
SE-F2-NT-PP-01	A1–A3	Berço ao portão	Suécia	Fabricante 2	Não tecido	PP	*	3,514
SE-F2-T-PP-01	A1–A3	Berço ao portão	Suécia	Fabricante 2	Tecido	PP	*	3,624

* = DAP não associa uma massa por unidade de área específica. **DAP originalmente declarada em m²; valor convertido para kg CO_2e/kg com base na massa por unidade de área ou densidade informada na DAP.

A Figura 1a apresenta a comparação dos valores de GWP-Total para geotêxteis não tecidos fabricados em PP. Sempre que disponíveis duas ou mais DAPs comparáveis para um mesmo fabricante, foi calculado um valor médio de emissão, indicado no gráfico juntamente com o número de DAPs consideradas (n). Nos demais casos, os valores apresentados correspondem a resultados individuais. Considerando exclusivamente os geotêxteis não tecidos produzidos em PP, os valores de GWP-Total variaram entre 2,520 e 4,500 kg CO_2e/kg. O menor valor foi observado para o fabricante localizado na Grécia (2,52 kg CO_2e/kg), enquanto o maior valor correspondeu ao fabricante localizado na Índia (4,50 kg CO_2e/kg), sugerindo a possível influência de fatores geográficos e energéticos associados aos diferentes contextos produtivos.



a) **b)**

Figura 1. GWP-Total de geotêxteis não tecidos. a) Fabricados em PP Virgem. b) Fabricados em resina de PET virgem e reciclado.

A Figura 1b apresenta a comparação entre geotêxteis não tecidos produzidos em PET virgem (Itália) e em PET reciclado (Espanha). Observa-se uma redução expressiva do GWP-Total para o produto à base de PET reciclado (0,745 kg CO_2e/kg), cujo valor é aproximadamente cinco vezes inferior ao observado para o PET virgem (3,770 kg CO_2e/kg). Esse resultado evidencia o elevado potencial do uso de matéria-prima reciclada como estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa na fase de produção de geotêxteis, ainda que a amostra analisada seja limitada a uma DAP por categoria. Ressalta-se que o PET reciclado é empregado na fabricação de geotêxteis não tecidos no Brasil, desde que atendidos os requisitos de aplicação estabelecidos na ABNT NBR 16757-1 (2021).

A Figura 2 apresenta a comparação entre geotêxteis tecidos produzidos em PP e PET. A análise foi estruturada considerando o conjunto de geotêxteis tecidos produzidos por um mesmo fabricante localizado na Bélgica (n = 4, valor médio de 2,064 kg CO_2e/kg), bem como os valores individuais observados para fabricantes da Suécia (3,624 kg CO_2e/kg) e da Letônia (7,070 kg CO_2e/kg). Destaca-se que, neste caso, os fabricantes apresentam localização geográfica relativamente próxima. Ainda assim, o geotêxtil tecido fabricado em resina de PET apresentou valores de GWP-Total significativamente superior aos observados para os geotêxteis fabricados em PP, indicando a forte influência do tipo de polímero sobre o desempenho ambiental do produto.

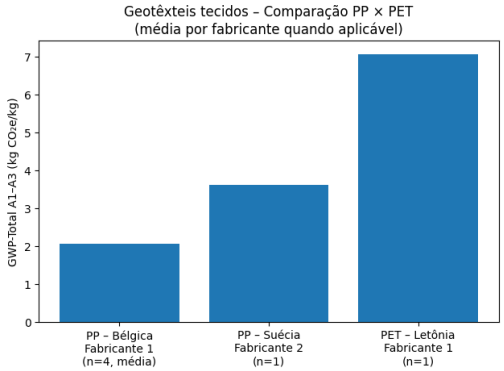


Figura 2. GWP-Total de geotêxteis tecidos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As análises realizadas indicam que o GWP-Total associado à produção de geotêxteis é resultado da combinação de múltiplos fatores, com destaque para o tipo de polímero empregado, a origem da matéria-prima e as características do processo produtivo. Esses elementos explicam a variabilidade observada entre produtos e fabricantes, reforçando a importância da utilização de métricas normalizadas e comparáveis.
- Do ponto de vista normativo, a estrutura metodológica necessária para a elaboração de DAPs já se encontra plenamente estabelecida no Brasil, em alinhamento com as normas internacionais aplicáveis. Assim, a inexistência de DAPs nacionais para geossintéticos representa uma lacuna de mercado e de prática setorial, e não uma limitação técnica ou regulatória, sendo plenamente viável sua implementação por fabricantes brasileiros.
- No contexto da elaboração de DAPs brasileiras para materiais geossintéticos, observa-se um conjunto de condições estruturais que reforça a relevância da geração de dados locais de ACV. A matriz energética brasileira apresenta baixa intensidade de carbono em comparação com diversos países industrializados, e o país dispõe de produção nacional de resinas termoplásticas e de uma cadeia consolidada de reciclagem de PET. Nesse cenário, a produção de inventários e DAPs nacionais atenderia à crescente demanda do setor da construção, do poder público e da academia por métricas ambientais confiáveis, além de permitir avaliar com maior precisão o potencial competitivo da indústria geossintética brasileira em termos de desempenho ambiental.
- A quantificação das emissões de CO_2e apresentada neste estudo fornece métricas técnicas objetivas que podem subsidiar decisões de sustentabilidade, a comparação entre soluções geotécnicas e a utilização de instrumentos associados à precificação de emissões de forma indireta, como créditos de carbono, sem implicar sua geração direta.
- Por fim, este trabalho evidencia que os impactos ambientais dos geossintéticos podem ser quantificados de forma consistente e que a avaliação de temas emergentes, como microplásticos, demanda metodologias específicas e análises estruturadas ao longo do ciclo de vida, evitando associações simplificadas e generalizações que não refletem o desempenho ambiental real dessas soluções em aplicações geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. ABNT NBR 16757-1 Geossintéticos - Requisitos para aplicação - Parte 1: Geotêxteis e produtos correlatos

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2015. ABNT NBR ISO 14025 Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2025. ABNT NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2025. ABNT NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2023. ABNT NBR ISO 14067. Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2025. ABNT NBR ISO 14068-1. Gestão de mudanças climáticas - Transição para emissões líquidas zero - Parte 1: Neutralidade de carbono.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2024. ABNT NBR ISO 59004. Economia circular - Vocabulário, princípios e orientações para implementação

Andrade, E.M.; Santos, C.T.; Schmidt, C.F.; dos Anjos P. 2024. Aspectos de Sustentabilidade Ambiental, Social e Econômica de Contenções em Solo Reforçado na Integração da Rodovia dos Tamoios aos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião. In: XXI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, 2024, Balneario Camboriu, SC, Brasil. Anais: 10.47094/COBRAMSEG2024/181

Araújo Junior, L. P. V. D.; Bueno, C.; Silva, J. L. D. 2025. Life Cycle Assessment and Circularity Indicators of Earth-Retaining Walls and Mechanically Stabilized Earth. Sustainability, 17(9), 3769.

Benetto, E. 2025. A Safe and Sustainable by Design approach to geosynthetics development. In: 8th European Regional Conference on Geosynthetics, Lille, França. Anais: https://eurogeo8.org/proceedings

Bizjak, K. F.; Lenart, S. 2018. Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system–A case study. Geotextiles and Geomembranes, 46(5), 543-558.

Dixon, N.; Raja, J., Fowmes, G.; Frost, M. 2016. Sustainability aspects of using geotextiles. p.577-596. In:Koerner, R. Geotextiles from Design to Applications. Woodhead Publishing.

Dixon, N.; Fowmes, G.; Frost, M. 2017. Global challenges, geosynthetic solutions and counting carbon. Geosynthetics International, 24(5), 451-464.

Ehrenberg, H.; Mermet, J. P.; Stucki, M., Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2012. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM General. In Proceedings Eurogeo (Vol. 5, pp. 87-91).

Elsing, A.; Fraser, I.; Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2012. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM, Case 2, Foundation stabilization. In Proceedings Eurogeo (Vol. 5, pp. 60-64).

European Norm. 2019. EN 15804. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products

Fraser, I.; Elsing, A.; Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2012. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials, a study on behalf of the EAGM, Case 4, Soil retaining wall. In Proceedings Eurogeo (Vol. 5, pp. 218-222).

Frischknecht, R.; Büsser-Knöpfel, S.; Itten, R.; Stucki, M.; Wallbaum, H. 2013. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus concrete retaining wall. In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France (pp. 2-6).

Greenhouse Gas Protocol Initiative. 2004. A corporate accounting and reporting standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 25-26.

International EPD® System. *https://www.environdec.com/home*

Pimentel. V. (2024). Geossintéticos e Sustentabilidade. Mineração & Geossintéticos: Um caminho seguro, eficiente e sustentável. Effia Escola da Engehnaria.

Raja, J.; Dixon, N.; Fowmes, G.; Frost, M.; Assinder, P. 2015. Obtaining reliable embodied carbon values for geosynthetics. Geosynthetics International, 22(5), 393-401.

Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. 2011. Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus conventional construction materials. ESU-services Ltd. commissioned by European Association for Geosynthetic Manufacturers (EAGM), Uster and Zürich, CH.

Touzé, N. 2022. The role of geosynthetics in sustainable development and the circular economy. Economia circolare e applicazioni resilienti: XXXII Convegno Nazionale Geosintetici, Bologna, 20 ottobre 2022, 7-21.

Xue, S.; Pokharel, S.; Lin, C. 2025. Embodied carbon calculation for geosynthetic products and implication for engineering projects. Environmental Geotechnics.

Zornberg, J. G., Subramanian, S., Roodi, G. H., Yalcin, Y., & Kumar, V. V. (2024). Sustainability benefits of adopting geosynthetics in roadway design. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10(3), 47.