

NANOMATERIAIS À BASE DE CARBONO COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAR OS EFEITOS DO ESTRESSE SALINO EM PLANTAS: UMA BREVE REVISÃO

CARBON-BASED NANOMATERIALS AS A STRATEGY TO MITIGATE THE EFFECTS OF SALT STRESS IN PLANTS: A BRIEF REVIEW

NANOMATERIALES A BASE DE CARBONO COMO ESTRATEGIA PARA MITIGAR LOS EFECTOS DEL ESTRÉS SALINO EN PLANTAS: UNA BREVE REVISIÓN

Valquíria da Silva^{1*} ; Ederson Akio Kido² 

¹Mestre em Genética, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Doutoranda pelo programa de Pós-Graduação em Biotecnologia (RENORBIO, UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil; ²Doutor em Ciências, Universidade de São Paulo (USP), Docente do Centro de Biociências, Departamento de Genética, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.

*Autor correspondente: valquiria.silva2@ufpe.br

Recebido: 22/06/2026 | Aprovado: 24/07/2026 | Publicado: xx/07/2026

Resumo: A salinização dos solos é um problema mundial crescente, e constitui um dos principais desafios para a agricultura moderna. Tal estresse que compromete o crescimento vegetal, a absorção de nutrientes e o equilíbrio hídrico das plantas, afetando a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Esse fenômeno pode resultar tanto de fatores naturais quanto de práticas antrópicas, como o uso inadequado da irrigação e a drenagem insuficiente dos solos. Uma maneira alternativa de prolongar o uso de solos ligeiramente salinos é cultivar neles cultivares mais tolerantes. Diante disso, a busca por métodos eficazes e seguros que favoreçam a adaptação das plantas às condições salinas é cada vez mais necessária. Entre as abordagens emergentes, destacam-se os nanomateriais à base de carbono (CNMs), que vêm demonstrando potencial na mitigação dos efeitos adversos da salinidade sobre o crescimento e o desenvolvimento vegetal. O presente trabalho teve como objetivo revisar o papel dos nanomateriais à base de carbono nas respostas de plantas ao estresse salino. Para tanto, artigos científicos disponíveis em bancos de dados públicos (PubMed, ScienceDirect e Google Scholar), foram recuperados utilizando os termos-chave “carbon”, “nanomaterials”, “salinity stress” e “plant”, e posteriormente analisados. A partir da análise dos trabalhos recuperados, verificou-se que os efeitos benéficos dos nanomateriais à base de carbono já foram caracterizados em diversas espécies de interesse agrônomo, resultando, no geral ao aumento da tolerância das plantas à salinidade. Esse efeito tem sido atribuído à redução do estresse oxidativo e osmótico, à manutenção do equilíbrio iônico e à ativação de vias de sinalização. Em síntese os resultados reportados na literatura evidenciam o elevado potencial biotecnológico destes materiais. No entanto, destaca-se a necessidade de estudos adicionais que avaliem sua eficiência, segurança e impacto ambiental em condições de campo, de modo a viabilizar futuras aplicações no melhoramento vegetal e na agricultura sustentável.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Estresse Abiótico. Tolerância.

Abstract: Soil salinization is a growing global problem and constitutes one of the main challenges for modern agriculture. This type of stress compromises plant growth, nutrient absorption, and water balance, affecting the productivity and sustainability of agricultural systems. This phenomenon may result from both natural factors and anthropogenic practices, such as improper irrigation and insufficient soil drainage. An alternative way to extend the use of slightly saline soils is to cultivate more tolerant cultivars in them. In this context, the search for effective and safe methods that promote plant adaptation to saline conditions is increasingly necessary. Among the emerging approaches, carbon-based nanomaterials (CNMs) stand out, as they have shown potential in mitigating the adverse effects of salinity on plant growth and development. The present study aimed to review the role of carbon-based nanomaterials in plant responses to salt stress. To this end, scientific articles available in public databases (PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar) were retrieved using the keywords “carbon,” “nanomaterials,” “salinity stress,” and “plant,” and subsequently analyzed. From the analysis of the retrieved studies, it was observed that the beneficial effects of carbon-based nanomaterials have already been characterized in several agronomically important species, generally resulting in increased plant tolerance to salinity. This effect has been attributed to the reduction of oxidative and osmotic stress, maintenance of ionic balance, and activation of

signaling pathways. In summary, the results reported in the literature highlight the high biotechnological potential of these materials. However, there remains a need for further studies to assess their efficiency, safety, and environmental impact under field conditions, in order to enable future applications in plant breeding and sustainable agriculture.

Keywords: Nanotechnology. Abiotic Stress. Tolerance.

Resumen: La salinización de los suelos es un problema mundial creciente y constituye uno de los principales desafíos para la agricultura moderna. Este tipo de estrés compromete el crecimiento vegetal, la absorción de nutrientes y el equilibrio hídrico de las plantas, afectando la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Este fenómeno puede resultar tanto de factores naturales como de prácticas antrópicas, tales como el uso inadecuado del riego y el drenaje insuficiente de los suelos. Una manera alternativa de prolongar el uso de suelos ligeramente salinos es cultivar en ellos variedades más tolerantes. Ante esto, la búsqueda de métodos eficaces y seguros que favorezcan la adaptación de las plantas a las condiciones salinas es cada vez más necesaria. Entre los enfoques emergentes, se destacan los nanomateriales a base de carbono (CNMs), que han demostrado potencial en la mitigación de los efectos adversos de la salinidad sobre el crecimiento y el desarrollo vegetal. El presente trabajo tuvo como objetivo revisar el papel de los nanomateriales a base de carbono en las respuestas de las plantas al estrés salino. Para ello, se recuperaron artículos científicos disponibles en bases de datos públicas (PubMed, ScienceDirect y Google Scholar), utilizando los términos clave “carbon”, “nanomaterials”, “salinity stress” y “plant”, que posteriormente fueron analizados. A partir del análisis de los trabajos recuperados, se verificó que los efectos beneficiosos de los nanomateriales a base de carbono ya han sido caracterizados en diversas especies de interés agronómico, resultando, en general, en un aumento de la tolerancia de las plantas a la salinidad. Este efecto se ha atribuido a la reducción del estrés oxidativo y osmótico, al mantenimiento del equilibrio iónico y a la activación de vías de señalización. En síntesis, los resultados reportados en la literatura evidencian el elevado potencial biotecnológico de estos materiales. No obstante, se destaca la necesidad de realizar estudios adicionales que evalúen su eficiencia, seguridad e impacto ambiental en condiciones de campo, con el fin de viabilizar futuras aplicaciones en el mejoramiento vegetal y en la agricultura sostenible.

Palabras-clave: Nanotecnología. Estrés Abiótico. Tolerancia.

1 INTRODUÇÃO

A salinização dos solos é um evento progressivo, que limita a agricultura, afetando a germinação de sementes, o desenvolvimento dos cultivos, e a produtividade das colheitas. O NaCl é o principal agente do estresse salino, e suas concentrações elevadas reduzem o potencial hídrico, ocasionando menor absorção de água pelas raízes (Yang *et al.*, 2018). A salinidade também provoca secundariamente outros tipos de estresses, como o estresse osmótico, o estresse iônico e o estresse oxidativo (Yang *et al.*, 2018).

A expansão das áreas salinizadas está diretamente relacionada às atividades antrópicas, incluindo práticas agrícolas inadequadas, como o uso excessivo de fertilizantes e a irrigação com água salina (Shahid, Zaman, & Heng, 2018). Esse quadro é agravado pelas mudanças climáticas em curso, uma vez que a redução das precipitações, juntamente ao aumento das temperaturas, tem propiciado a intensificação da salinização em diferentes regiões do mundo (Eswar, Karuppusamy, & Chellamuthu, 2021). Estimativas apontam que, até 2050, cerca de 50% das terras aráveis poderão ser afetadas pela salinidade (Butcher *et al.*, 2016).

Nesse contexto, os nanomateriais (NMs) representam uma ferramenta promissora para mitigar o estresse salino em plantas. Entre eles, destacam-se os nanomateriais à base de carbono (CNMs), substâncias formadas por átomos de carbono organizados em diferentes configurações estruturais (Ayanda *et al.*, 2024). Nos últimos anos, esses materiais têm ganhado destaque na agricultura em razão de sua ampla aplicabilidade, a qual está diretamente associada às suas propriedades físico-químicas específicas, como alta razão superfície/volume, morfologia superficial, elevada reatividade química, além de suas capacidades catalítica e condutiva (Speranza, 2021). Em

conjunto, essas propriedades que favorecem sua interação com as plantas e auxiliam no processo de mitigação dos estresses abióticos, incluindo a salinidade.

Assim, em função do crescente interesse por alternativas sustentáveis para mitigar os efeitos do estresse salino, esta revisão visa reunir e destacar os benefícios do uso de CNMs na indução da tolerância de plantas expostas a essa condição. No presente trabalho, serão detalhados os principais mecanismos modulados por estes nanomateriais, bem como as perspectivas para sua aplicação prática no manejo agrícola. Esperamos contribuir de forma significativa para o avanço do conhecimento sobre o tema e orientar futuras pesquisas voltadas à adoção segura e eficaz dessa tecnologia no campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo teve como objetivo realizar uma breve revisão da literatura sobre a ação de nanomateriais de carbono em plantas submetidas ao estresse salino. A busca bibliográfica foi realizada em abril de 2020 nas bases de dados PubMed, ScienceDirect e Google Scholar, utilizando os seguintes descritores: “carbon”, “nanomaterials”, “salinity stress” e “plant”. Adicionalmente, foi aplicado um filtro temporal, restringindo a seleção a publicações dos últimos cinco anos. Após a triagem e exclusão de duplicatas e artigos não pertinentes, 24 estudos foram selecionados para análise. A Tabela 1 descreve os critérios de inclusão e exclusão adotados no processo de seleção dos artigos.

Tabela 1 – Critérios de exclusão e inclusão adotados no processo de seleção dos artigos.

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Publicações anteriores da 2020.	Publicações posteriores a 2020.
Artigos de revisão, dissertações e teses.	Artigos experimentais.
Estudos que discutam outros tipos de nanomateriais ou estresses.	Estudos sobre a ação de nanomateriais de carbono na resposta à salinidade.
Palavras chaves.	Palavras chaves.

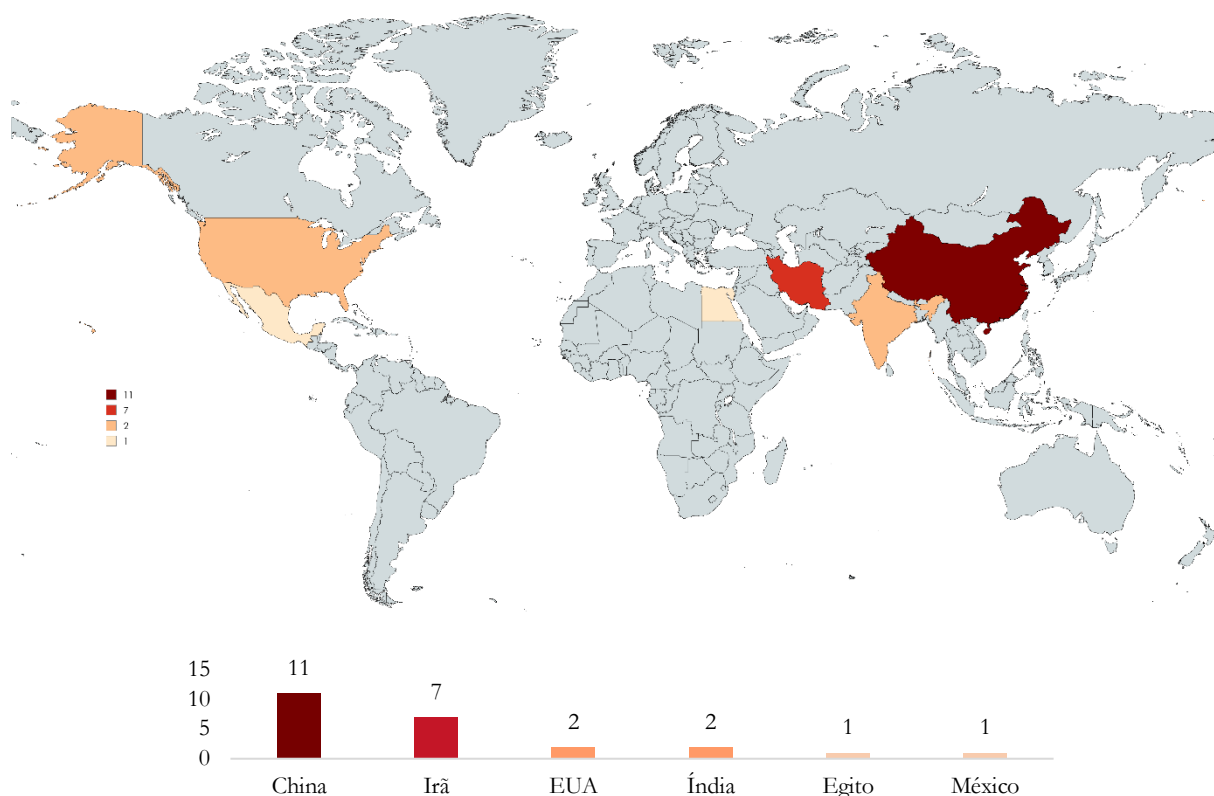
Fonte: elaborada pelos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição geográfica das publicações

A presente revisão selecionou e analisou 24 artigos científicos sobre o tema: utilização de nanomateriais à base de carbono e suas influências nas respostas de plantas submetidas ao estresse salino. Todos os artigos selecionados foram provenientes de periódicos indexados, acesso livre, em estágio final de publicação, e publicados no intervalo de cinco anos definido para a busca (entre 2020 e 2025). Em relação ao idioma, todos os trabalhos analisados foram publicados em língua inglesa. A figura 1 apresenta a distribuição geográfica das publicações científicas. A análise revelou predominância de publicações da China (11 artigos), seguida pelo Irã (7), enquanto Egito, Estados Unidos, Índia e México apresentaram de 1 a 2 trabalhos cada.

Figura 1. Distribuição geográfica das publicações científicas recuperadas.



Fonte: Elaborada pelos autores. Criado em mapchart.net

A liderança em conjunto da China e do Irã na produção científica não reflete apenas o interesse pelo tema, mas também a necessidade urgente de aplicar esses avanços de forma prática em seus territórios. O mapa global de solos afetados por sal (GSASmap) da FAO (*Food and Agriculture Organization*) estima que a área total de solos salinizados alcance aproximadamente 1,2 bilhão de hectares. A Ásia, em especial a região norte e central, concentra as maiores extensões de solos afetados, somando cerca de 211,7 milhões de hectares (*Status of the World's Soil Resources*, 2015). Este cenário evidencia a alta vulnerabilidade do continente asiático à salinização, o que tem gerado uma crescente demanda por novas tecnologias e o desenvolvimento de plantas mais adaptadas.

3.2 Espécies vegetais analisadas

Quize espécies vegetais tiveram sua tolerância à salinidade testada na presença de CNMs. Deste total, cinco espécies pertencem ao grupo das monocotiledôneas e dez as eudicotiledôneas, estando incluídas em sete famílias botânicas distintas: *Poaceae* (5 espécies), *Fabaceae* (3), *Brassicaceae* (2), *Solanaceae* (2), *Vitaceae* (1), *Rosaceae* (1) e *Lamiaceae* (1). Observou-se uma forte tendência à utilização de espécies associadas a grandes culturas alimentares. Dentre elas, destacam-se o arroz (*O. sativa* L.), videira (*V. vinifera*) e o tomateiro (*S. lycopersicum*), sendo o arroz estudado em quatro publicações, enquanto a videira e o tomateiro aparecem em três publicações cada.

O arroz é uma cultura alimentar essencial, sendo o segundo cereal mais cultivado no mundo (“Rice | USDA Foreign Agricultural Service”, s. d.). Além disso, seu ciclo de vida curto, a facilidade de cultivo em condições controladas, a ampla diversidade genética e o fato de possuir o genoma completamente sequenciado o consolida como uma espécie modelo entre as monocotiledôneas. Já a videira destaca-se como uma das espécies

economicamente mais importantes dentro da família *Vitaceae*. Além do consumo *in natura* de seus frutos, estes são destinados principalmente a produção de sucos e vinhos (Descoings, Eggli, & Newton, 2022).

Outras culturas, como alfaça, pimenta vermelha e manjeriço, também foram abordadas em mais de um estudo. Já espécies como trigo, milho, sorgo, amendoim, milho, feijão-mungo, canola e morango aparecem com menor frequência, sendo citadas em apenas um artigo cada. Em contrapartida, *A. thaliana* não apresenta grande potencial econômico, mas a espécie é considerada planta modelo. Assim, seu uso estratégico é eficaz na elucidação das vias de respostas das plantas frente a salinidade. Em conjunto, essas informações refletem a necessidade e o interesse de melhorar o aproveitamento de diferentes culturas em solos salinos.

3.3 Nanomateriais a base de carbono

Dentre os tipos de CNMs empregados nos artigos analisados, os pontos quânticos de carbono (CQDs) foram os mais utilizados (9 artigos), seguidos pelas nanopartículas de óxido de grafeno (GO-NPs), mencionadas em 5 estudos. Os nanotubos de carbono multicamadas (MWCNTs) e as nanopartículas de grafeno (G-NPs) apresentaram a mesma frequência de uso (4 artigos cada). Em menor proporção, foram relatados o emprego de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs; 2 artigos), pontos quânticos de grafeno (GQDs; 1) e pontos quânticos de óxido de grafeno (GOQDs; 1). Cabe destacar que a frequência total de ocorrência dos CNMs (26) excede o número de artigos analisados (24), uma vez que dois estudos avaliaram simultaneamente dois tipos distintos de nanomateriais.

Também foi possível distinguir os estudos que utilizaram nanomateriais em suas formas funcionalizadas e não funcionalizadas. Ao todo, foram identificadas 14 ocorrências de uso de CNMs sem qualquer funcionalização, enquanto 12 registros correspondem ao uso de formas funcionalizadas com diferentes compostos, tanto orgânicos quanto inorgânicos. A partir da análise dos dados, verificou-se que os nanomateriais G-NPs, SWCNTs e GOQDs aparecem predominantemente em suas formas não funcionalizadas. Por outro lado, outros como as GO-NPs foram funcionalizadas predominantemente com compostos orgânicos como glicina-betaína, metionina-lisina e prolina. Por sua vez, GQDs receberam funcionalização com manganês. Já os CQDs foram os materiais que apresentaram maior diversidade em tipos de agentes funcionalizantes, como magnésio, prolina, putrescina, nitrogênio, selênio e açúcares (trealose e glicose). No caso dos MWCNTs foram utilizados tanto formas funcionalizadas (ácido carboxílico e NPs de selênio) quanto não funcionalizadas.

A funcionalização pode alterar significativamente as propriedades físico-químicas dos nanomateriais, ampliando sua biocompatibilidade, estabilidade e interação com tecidos vegetais (Speranza, 2021). No caso dos estudos analisados, a diversidade em tipos de agentes funcionalizantes, evidencia a tentativa de otimizar esses materiais de modo a aumentar sua eficácia na mitigação dos efeitos da salinidade sobre o metabolismo das plantas.

Ainda, foram identificados quatro principais métodos de aplicação de nanomateriais à base de carbono em plantas sob salinidade. Dentre eles, destacam-se a aplicação foliar (9 estudos) e o *nanoprimering* de sementes (8 estudos), como métodos mais utilizados. A aplicação foliar é simples, eficiente e de baixo custo, atuando diretamente sobre as folhas e independentemente das condições do solo ou do sistema radicular, o que permite maior controle sobre o material aplicado. O *nanoprimering*, por sua vez, também garante aplicação precisa, mas apresenta

maior complexidade e custo, o que pode limitar seu uso em campo. Métodos como a aplicação no solo e a irrigação com solução de *Hoagland* ou água (três casos cada) também se mostraram alternativas viáveis, destacando-se pela simplicidade e acessibilidade econômica.

3.4 Respostas fisiológicas e moleculares de plantas à salinidade mediadas por nanomateriais à base de carbono

A análise dos resultados obtidos a partir dos artigos científicos revisados possibilitou a identificação dos principais mecanismos fisiológicos, bioquímicos e/ou moleculares modulados por CNMs. A aplicação de diferentes CNMs foi capaz de favorecer o crescimento e o desempenho geral de diferentes espécies vegetais, resultando em melhorias agronômicas significativas. No arroz exposto ao NaCl (100 μM), a aplicação foliar de 150 $\mu\text{g/mL}$ de CQDs funcionalizados com magnésio aumentou a altura e a biomassa das plantas (Liu *et al.*, 2024). De forma semelhante, GO-NPs funcionalizadas com glicina betaína elevaram a altura, o número de inflorescências, nós e folhas em manjerição sob estresse salino [NaCl até 100 μM ; (Ganjavi *et al.*, 2021)]. Em *C. annuum* L., GQDs reduziram em cerca de 40% a perda de produção de frutos causada pelo NaCl [NaCl 100 μM ; (Ye *et al.*, 2022)].

Entre outros mecanismos modulados por CNMs, destaca-se a melhoria da eficiência fotossintética, frequentemente comprometida pela salinidade. Esse efeito negativo foi atenuado pela aplicação de diferentes nanomateriais à base de carbono, que promoveram o aumento de pigmentos fotossintéticos, como clorofilas (Mahmoud & Abdelhameed, 2021; Nauman *et al.*, 2024) e carotenoides (Malekzadeh; Roosta & Kalaji, 2023; Xu, *et al.*, 2023), além de protegerem os complexos fotossintéticos (Guo, *et al.*, 2024; Xu, *et al.*, 2023).

Além disso, a intensificação da atividade antioxidante também contribui para o desenvolvimento vegetal sob condições adversas. O aumento das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) foi observado em tomateiros após o *priming* de sementes com SWCNTs ou G-NPs (González-García *et al.*, 2022). Essas enzimas reduzem os danos causados pelas espécies reativas de oxigênio (ROS), cuja produção é estimulada pelo estresse salino. Resultados semelhantes foram relatados em colza (Nauman *et al.*, 2024), arroz (Xu *et al.*, 2023) e alfafa (Chen *et al.*, 2023) tratadas, respectivamente, com CQDs, MWCNTs e G-NPs.

Em outros casos, o tratamento com CNMs também pode aliviar os impactos negativos da exposição ao sal, promovendo o acúmulo de metabólitos secundários antioxidantes como fenóis e flavonoides (Gohari *et al.*, 2021a; Hassanpouraghdam *et al.*, 2025). Esses compostos também atuam no processo de eliminação de indicadores de estresse oxidativo como malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). A ativação do sistema antioxidante também pode ocorrer por meio da modulação da expressão gênica, como observado no arroz (Guo *et al.*, 2024). Nesse caso, a aplicação de CQDs induziu a expressão dos genes BX1 e IGL, envolvidos na síntese de indol. O indol é um precursor utilizado nas vias biossintéticas do triptofano e da benzoxazina, compostos relacionados à defesa antioxidante.

Em paralelo, também tem sido demonstrado que a aplicação de CNMs pode reduzir o estresse iônico e osmótico em plantas submetidas a salinidade. Um caso representativo foi observado na aplicação de CQDs funcionalizados com açúcares (trealose ou glicose), que atenuaram os efeitos deletérios do NaCl (até 100 μM) em

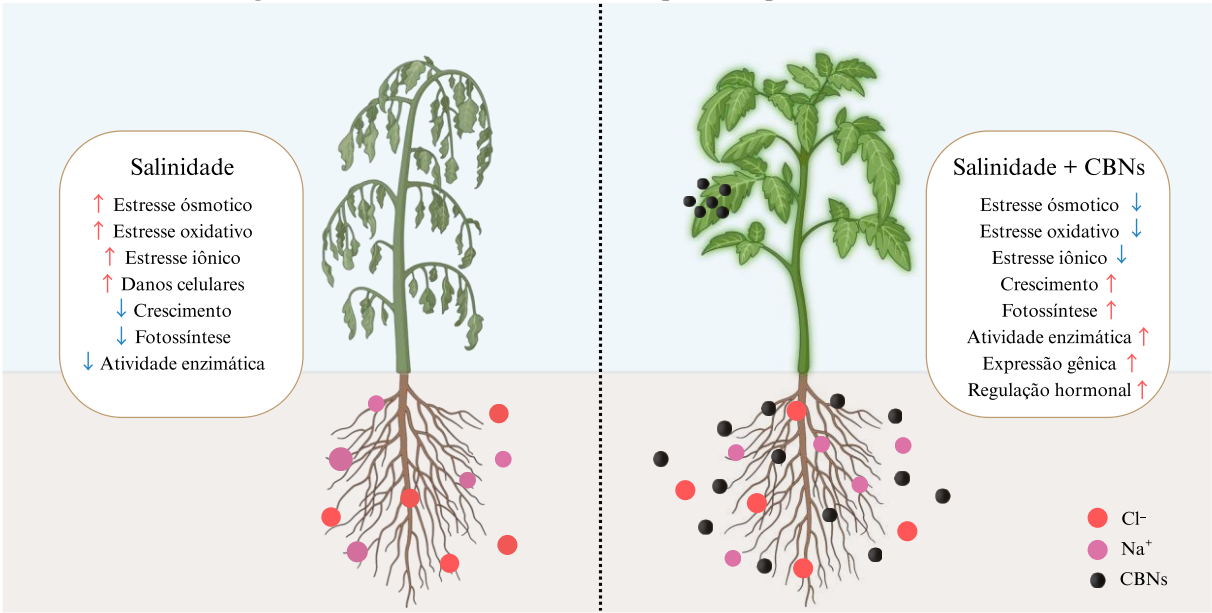
mudas de *V. radiata* (Sarkar *et al.*, 2022). Nesse caso, os benefícios foram parcialmente atribuídos à capacidade destes nanomateriais promoverem positivamente o balanço iônico e a manutenção da homeostase osmótica. Outros estudos relatam que a aplicação de CNMs induziu o desenvolvimento do sistema radicular, favorecendo a captação de água, promovendo consequentemente homeostase osmótica nas plantas estressadas. Assim como observado no uso de MWCNTs em arroz (Xu *et al.*, 2023) e GO-NPs no morangueiro (Malekzadeh *et al.*, 2023).

Outro mecanismo de resposta de ajuste ao estresse osmótico induzido pela salinidade consiste na síntese de osmólitos, como a prolina, ou açúcares. Tais processos foram documentados no arroz (Ganjavi *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2023), na videira (Gohari *et al.*, 2021b; Zahedi *et al.*, 2023) e na colza (Nauman *et al.*, 2024). Sob estresse, prolina e açúcares também contribuem para estabilidade funcional das macromoléculas. Além disso, a prolina também possui ação antioxidante, enquanto os açúcares contribuem para o acúmulo de reservas energéticas (Zulfikar, Akram, & Ashraf, 2020).

A modulação da expressão gênica na presença nanomateriais a base de carbono também é relatada. Conforme demonstrado nos estudos de (Rezaei *et al.*, 2021), a aplicação de SWCNTs ou G-NPs induziu a expressão de 1.620 genes no tomate exposto ao estresse salino. Dentre o conjunto de genes induzidos, destacam-se genes codificadores de aquaporinas, desidrinas, proteínas de choque térmico, fatores de transcrição e genes atuantes em vias de sinalização como MAPK (proteína quinase ativada por mitógeno). A modulação da expressão gênica por GO-NPs também foi documentada no amendoim (Yan *et al.*, 2024). De modo similar, vias de sinalização por fitormônios também podem ser moduladas, como observado no aumento de jasmonato e citocinina promovido pela aplicação de CQDs em sementes de trigo submetidas a quatro dias de estresse salino (Liu *et al.*, 2025).

Vale ressaltar que os estudos analisados indicam que os nanomateriais à base de carbono podem aumentar a tolerância das plantas ao estresse salino, embora seus efeitos dependam da dosagem aplicada. Concentrações elevadas (acima de 100 mg L⁻¹) podem provocar fitotoxicidade (Ganjavi *et al.*, 2021; Gohari *et al.*, 2020). Além disso, os resultados disponíveis foram obtidos em condições controladas, sendo necessário um maior aprofundamento destas pesquisas em condições de campo. A Tabela 2 apresenta os principais resultados dos estudos analisados, e a Figura 2 sintetiza visualmente os mecanismos envolvidos. De forma geral, a atuação conjunta desses mecanismos evidencia o potencial dos CNMs para aplicação em plantas sob estresse salino.

Figura 2. Influência dos CNMs na resposta de plantas à salinidade.



Fonte: Elaborada pelos autores. Criado com BioRender.com

Tabela 2 – Respostas moduladas por nanomateriais a base de carbono em plantas submetidas ao estresse de salinidade.

CNMs	Funcionalização	Espécie	Mecanismos associados a tolerância a salinidade	Referências
SWCNTs	Ausente	<i>Sorghum bicolor</i> L.; <i>Solanum lycopersicum</i>	Indução da expressão de genes envolvidos na resposta a estresses (NAC, WRKY) e vias de sinalização (ABA, insp3, MAPK).	(Rezaei <i>et al.</i> , 2021)
SWCNTs	Ausente	<i>Solanum lycopersicum</i>	Indução do sistema antioxidante; aumento da concentração de compostos bioativos e modulação da fotossíntese.	(González-García <i>et al.</i> , 2022)
MWCNTs	Ausente	<i>Oryza sativa</i> L.	Melhora na absorção de água (raízes); aumento de pigmentos e eficiência fotossintética; indução da atividade enzimática e síntese de sacarose.	(Xu <i>et al.</i> , 2023)
MWCNTs	NPs Selênio	<i>Oryza sativa</i> L.	Melhorias no crescimento e produtividade.	(Garg <i>et al.</i> , 2025)
MWCNTs	Ausente	<i>Zea mays</i> L.	Melhorias no acúmulo de osmólitos e hormônios; redução no teor de Na ⁺ .	(Luo <i>et al.</i> , 2022)
MWCNTs	Ácido carboxílico	<i>Ocimum basilicum</i> L.	Aumento de clorofila, carotenoides e antioxidantes; indução do crescimento e no conteúdo de óleo essencial.	(Gohari <i>et al.</i> , 2020)
G-NPs	Ausente	<i>Medicago sativa</i> L.	Melhoria do crescimento; indução da fotossíntese e atividade antioxidante.	(Chen & Wang, 2021)
G-NPs	Ausente	<i>Medicago sativa</i> L.	Melhoria no crescimento; fotossíntese; homeostase osmótica; equilíbrio iônico; indução do sistema antioxidante; Redução nos níveis de Na ⁺ e ROS.	(Chen <i>et al.</i> , 2023)
G-NPs	Ausente	<i>Sorghum bicolor</i> L.; <i>Solanum lycopersicum</i>	Indução da expressão de genes envolvidos na resposta a estresses (NAC, WRKY) e vias de sinalização (ABA, insp3, MAPK).	(Rezaei <i>et al.</i> , 2021)
G-NPs	Ausente	<i>Solanum lycopersicum</i>	Indução do sistema antioxidante; aumento da concentração de compostos bioativos; modulação da fotossíntese.	(González-García <i>et al.</i> , 2022)
GO-NPs	Glicina betáína	<i>Ocimum basilicum</i> L.	Aumento na concentração de pigmentos fotossintéticos, prolina e fenóis; indução de atividades de enzimas antioxidantes, diminuição do MDA e H ₂ O ₂ .	(Ganjavi <i>et al.</i> , 2021)
GO-NPs	Ausente	<i>Fragaria chiloensis</i> × <i>virginiana</i>	Aumento nos teores de clorofila e carotenoides; indução do rendimento inicial e do peso seco (folhas e raízes).	(Malekzadeh <i>et al.</i> , 2023)
GO-NPs	Metionina e lisina	<i>Pennisetum glaucum</i> L.	Melhoria no crescimento; aumento no conteúdo de proteína total, pigmentos fotossintéticos e rendimento; redução de ROS.	(Mahmoud & Abdelhameed, 2021)

Continua...

Tabela 2 – Continuação

CNBs	Funcionalização	Espécie	Mecanismos associados a tolerância a salinidade	Referências
------	-----------------	---------	---	-------------

GO-NPs	Ausente	<i>Arachis hypogaea</i>	Estimulação da germinação, crescimento, fotossíntese, integridade de membranas, acúmulo de nutrientes, atividade antioxidante e expressão de genes associados à defesa e produtividade.	(Yan <i>et al.</i> , 2024)
GO-NPs	Prolina	<i>Vitis vinifera</i>	Proteção aos pigmentos fotossintéticos; aumento de osmólitos; ativação do sistema antioxidante.	(Zahedi <i>et al.</i> , 2023)
CQDs	Ausente	<i>Oryza sativa</i>	Indução da expressão do gene psac do PSI.	(Guo <i>et al.</i> , 2024)
CQDs	Selênio	<i>Brassica napus</i>	Melhorias no crescimento; aumento da atividade de endo- β -mananase; acúmulo de açúcares, proteínas, respiração e ATP; indução de enzimas antioxidantes	(Nauman <i>et al.</i> , 2024)
CQDs	Ausente	<i>Triticum aestivum</i> L.	Aumento no teor de ácido jasmônico; indução da biossíntese de citocinina	(Liu <i>et al.</i> , 2025)
CQDs	Ausente	<i>Solanum lycopersicum</i>	Melhoria das propriedades físico-químicas e da fertilidade do solo; redução da salinidade e da alcalinidade	(Chen <i>et al.</i> , 2022)
CQDs	Nitrogênio	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Promoção do crescimento; incremento na biomassa, teor de clorofila; redução do estresse oxidativo.	(Jing <i>et al.</i> , 2023)
CQDs	Trealose e glicose	<i>Vigna radiata</i> L.	Melhoria na germinação e crescimento; aumento no conteúdo de pigmentos; promoção do equilíbrio iônico e osmótico; indução do sistema antioxidante.	(Sarkar <i>et al.</i> , 2022)
CQDs	Putrescina	<i>Vitis vinifera</i>	Aumento na atividade de enzimas antioxidantes e maior acúmulo de prolina.	(Panahirad <i>et al.</i> , 2023)
CQDs	Magnésio	<i>Oryza sativa</i> L.	Melhoria no crescimento; ativação da expressão de genes envolvidos em vias relacionadas à fotossíntese, defesa e estresse.	(Liu <i>et al.</i> , 2024)
CQDs	Prolina	<i>Vitis vinifera</i>	Aumento de compostos antioxidantes, pigmentos fotossintéticos e atividades enzimáticas; redução de marcadores de estresse.	(Gohari <i>et al.</i> , 2021b)
CQDs	Putrescina	<i>Vitis vinifera</i>	Melhoria nos pesos frescos e secos das folhas, conteúdo de K ⁺ , pigmentos fotossintéticos, prolina e fenóis; aumento da atividade antioxidante; diminuição de marcadores de estresse.	(Gohari <i>et al.</i> , 2021a)
GQDs	Manganês	<i>Capsicum annuum</i> L.	Melhoria na atividade fotossintética.	(Ye <i>et al.</i> , 2022)
GOQDs	Ausente	<i>Capsicum annuum</i> L.	Aumento no conteúdo de compostos bioativos; aumento no diâmetro do caule e número de frutos.	(Hassanpouraghdam <i>et al.</i> , 2025)

Fonte: elaborada pelos autores.

4 CONCLUSÃO

A presente revisão apresentou evidências consistentes que sustentam o uso dos CNMs como uma alternativa promissora para mitigar os efeitos adversos da salinidade. De maneira geral, a aplicação desses materiais tem mostrado potencial para induzir o crescimento e aprimorar o sistema de defesa das plantas, modulando diferentes mecanismos bioquímicos, fisiológicos e moleculares. No entanto, é importante ressaltar que o uso dessa tecnologia pode gerar efeitos negativos, especialmente em função da concentração administrada. Portanto, antes da adoção desses materiais em larga escala, é fundamental que mais estudos sejam conduzidos, no intuito de compreender melhor os mecanismos envolvidos na interação CNMs-plantas, bem como otimizar seus protocolos de aplicação. Espera-se que a integração da nanotecnologia com áreas como a genética e a fisiologia vegetal favoreça o desenvolvimento de novas cultivares mais tolerantes, contribuindo para uma agricultura mais resiliente em condições de salinidade.

Agradecimentos e Financiamento

Agradecemos à CAPES, ao CNPq e ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia (RENORBIO/UFPE) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

Todos os autores contribuíram igualmente para a elaboração e desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ayanda, O. S., Mmuoegbulam, A. O., Okezie, O., Durumin Iya, N. I., Mohammed, S. E., James, P. H., ... Badamasi, H. (2024). Recent progress in carbon-based nanomaterials: Critical review. *Journal of Nanoparticle Research*, 26(5), 106. <https://doi.org/10.1007/s11051-024-06006-2>
- Butcher, K., Wick, A. F., DeSutter, T., Chatterjee, A., & Harmon, J. (2016). Soil Salinity: A Threat to Global Food Security. *Agronomy Journal*, 108(6), 2189–2200. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.06.0368>
- Chen, Q., Cao, X., Li, Y., Sun, Q., Dai, L., Li, J., ... Ci, L. (2022). Functional carbon nanodots improve soil quality and tomato tolerance in saline-alkali soils. *Science of The Total Environment*, 830, 154817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154817>
- Chen, Z., Guo, Z., Xu, N., Cao, X., & Niu, J. (2023). Graphene nanoparticles improve alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth through multiple metabolic pathways under salinity-stressed environment. *Journal of Plant Physiology*, 289, 154092. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2023.154092>

- Chen, Z., & Wang, Q. (2021). Graphene ameliorates saline-alkaline stress-induced damage and improves growth and tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.039>
- Descoings, B., Eggli, U., & Newton, L. E. (2022). Vitaceae. Em U. Eggli & R. Nyffeler (Org.), *Dicotyledons: Rosids* (p. 1–6). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85239-9_62-1
- Eswar, D., Karuppusamy, R., & Chellamuthu, S. (2021). Drivers of soil salinity and their correlation with climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.10.015>
- Ganjavi, A. S., Oraei, M., Gohari, G., Akbari, A., & Faramarzi, A. (2021). Glycine betaine functionalized graphene oxide as a new engineering nanoparticle lessens salt stress impacts in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.028>
- Garg, T., Joshi, A., Kumar, A., Kumar, V., Jindal, N., Awasthi, A., & Kaur, S. (2025). Foliar application of selenium nanoparticles, multiwalled carbon nanotubes and their hybrids stimulates plant growth and yield characters in rice (*Oryza sativa* L.) under salt stress. *Plant Nano Biology*, 11, 100146. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100146>
- Gohari, G., Panahirad, S., Sadeghi, M., Akbari, A., Zareei, E., Zahedi, S. M., ... Fotopoulos, V. (2021a). Putrescine-functionalized carbon quantum dot (put-CQD) nanoparticles effectively prime grapevine (*Vitis vinifera* cv. ‘Sultana’) against salt stress. *BMC Plant Biology*, 21(1), 120. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02901-1>
- Gohari, G., Panahirad, S., Sepehri, N., Akbari, A., Zahedi, S. M., Jafari, H., ... Fotopoulos, V. (2021b). Enhanced tolerance to salinity stress in grapevine plants through application of carbon quantum dots functionalized by proline. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 42877–42890. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13794-w>
- Gohari, G., Safai, F., Panahirad, S., Akbari, A., Rasouli, F., Dadpour, M. R., & Fotopoulos, V. (2020). Modified multiwall carbon nanotubes display either phytotoxic or growth promoting and stress protecting activity in *Ocimum basilicum* L. in a concentration-dependent manner. *Chemosphere*, 249, 126171. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126171>
- González-García, Y., López-Vargas, E. R., Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Valdés-Reyna, J., ... Juárez-Maldonado, A. (2022). Seed Priming with Carbon Nanomaterials Improves the Bioactive Compounds of Tomato Plants under Saline Stress. *Plants*, 11(15), 1984. <https://doi.org/10.3390/plants11151984>
- Guo, B., Chen, F., Liu, G., Li, W., Li, W., Zhuang, J., ... Liu, Y. (2024). Effects and mechanisms of proanthocyanidins-derived carbon dots on alleviating salt stress in rice by multi-omics analysis. *Food Chemistry: X*, 22, 101422. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101422>
- Hassanpouraghdam, M. B., Mehrabani, L. V., Khoshmaram, L., & Rasouli, F. (2025). Amelioration of the growth and physiological responses of *Capsicum annum* L. via quantum dot-graphene oxide, cerium oxide, and titanium oxide nanoparticles foliar application under salinity stress. *Scientific Reports*, 15(1), 467. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84706-4>
- Jing, X., Liu, Y., Liu, X., Wang, X.-F., You, C., Chang, D., & Zhang, S. (2023). Nitrogen-doped carbon dots enhanced seedling growth and salt tolerance with distinct requirements of excitation light. *RSC Advances*, 13(18), 12114–12122. <https://doi.org/10.1039/D3RA01514A>
- Liu, J., Cao, X., Mao, T., Wen, Q., Zhang, D., Bao, L., ... Zhai, Y. (2025). Enhancing wheat tolerance to salinity using wolfberry-derived carbon dots. *Journal of Integrative Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2025.02.045>

- Liu, Y., Liu, D., Han, X., Chen, Z., Li, M., Jiang, L., & Zeng, J. (2024). Magnesium-Doped Carbon Quantum Dot Nanomaterials Alleviate Salt Stress in Rice by Scavenging Reactive Oxygen Species to Increase Photosynthesis. *ACS Nano*, 18(45), 31188–31203. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c09001>
- Luo, Y., Zeng, W., Lei, G., Hou, Y., Ao, C., Chen, H., ... Srivastava, A. K. (2022). The effects of multiwalled carbon nanotubes and *Bacillus subtilis* treatments on the salt tolerance of maize seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1093529. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1093529>
- Mahmoud, N. E., & Abdelhameed, R. M. (2021). Superiority of modified graphene oxide for enhancing the growth, yield, and antioxidant potential of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) under salt stress. *Plant Stress*, 2, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100025>
- Mahra, S., Tripathi, S., Tiwari, K., Sharma, S., Mathew, S., Kumar, V., & Sharma, S. (2025). Harnessing nanotechnology for sustainable agriculture: From seed priming to encapsulation. *Plant Nano Biology*, 11, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100124>
- Malekzadeh, M. R., Roosta, H. R., & Kalaji, H. M. (2023). GO nanoparticles mitigate the negative effects of salt and alkalinity stress by enhancing gas exchange and photosynthetic efficiency of strawberry plants. *Scientific Reports*, 13(1), 8457. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35725-0>
- Nauman Khan, M., Fu, C., Liu, X., Li, Y., Yan, J., Yue, L., ... Wu, H. (2024). Nanopriming with selenium doped carbon dots improved rapeseed germination and seedling salt tolerance. *The Crop Journal*, 12(5), 1333–1343. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2024.03.007>
- Panahirad, S., Dadpour, M., Gohari, G., Akbari, A., Mahdavinia, G., Jafari, H., ... Fotopoulos, V. (2023). Putrescine-functionalized carbon quantum dot (put-CQD) nanoparticle: A promising stress-protecting agent against cadmium stress in grapevine (*Vitis vinifera* cv. Sultana). *Plant Physiology and Biochemistry*, 197, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107653>
- Rezaei Cherati, S., Shanmugam, S., Pandey, K., & Khodakovskaya, M. V. (2021). Whole-Transcriptome Responses to Environmental Stresses in Agricultural Crops Treated with Carbon-Based Nanomaterials. *ACS Applied Bio Materials*, 4(5), 4292–4301. <https://doi.org/10.1021/acsaabm.1c00108>
- Rice | USDA Foreign Agricultural Service. (s. d.). Recuperado 9 de junho de 2025, de <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0422110>
- Sarkar, M. M., Pradhan, N., Subba, R., Saha, P., & Roy, S. (2022). Sugar-terminated carbon-nanodots stimulate osmolyte accumulation and ROS detoxification for the alleviation of salinity stress in *Vigna radiata*. *Scientific Reports*, 12(1), 17567. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22241-w>
- Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil Salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. Em M. Zaman, S. A. Shahid, & L. Heng (Org.), *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques* (p. 43–53). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Singh, G. B., Sharma, A., Thapa, J., & Nidhi. (2024). Foliar-Based Nanoformulations: Leads and Flaws. Em S. Kaur, V. Dwibedi, & P. K. Sahu (Org.), *Metabolomics, Proteomics and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry* (p. 223–245). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2910-4_12
- Speranza, G. (2021). Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications. *Nanomaterials*, 11(4), 967. <https://doi.org/10.3390/nano11040967>
- Status of the world's soil resources: Main report*. (2015). Rome: FAO : ITPS.

- Xu, Z., Liu, H., Yu, Y., Gao, D., Leng, C., Zhang, S., & Yan, P. (2023). MWCNTs Alleviated saline-alkali stress by optimizing photosynthesis and sucrose metabolism in rice seedling. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2283357. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2283357>
- Yan, N., Cao, J., Wang, J., Zou, X., Yu, X., Zhang, X., & Si, T. (2024). Seed priming with graphene oxide improves salinity tolerance and increases productivity of peanut through modulating multiple physiological processes. *Journal of Nanobiotechnology*, 22(1), 565. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02832-7>
- Yang, Z., Zheng, H., Wei, X., Song, J., Wang, B., & Sui, N. (2018). Transcriptome analysis of sweet Sorghum inbred lines differing in salt tolerance provides novel insights into salt exclusion by roots. *Plant and Soil*, 430(1–2), 423–439. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3736-0>
- Ye, Y., Landa, E. N., Cantu, J. M., Hernandez-Viezcas, J. A., Nair, A. N., Lee, W.-Y., ... Gardea-Torresdey, J. L. (2022). A double-edged effect of manganese-doped graphene quantum dots on salt-stressed *Capsicum annuum* L. *Science of The Total Environment*, 844, 157160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157160>
- Zahedi, S. M., Abolhassani, M., Hadian-Deljou, M., Feyzi, H., Akbari, A., Rasouli, F., ... Gohari, G. (2023). Proline-functionalized graphene oxide nanoparticles (GO-Pro NPs): A new engineered nanoparticle to ameliorate salinity stress on grape (*Vitis vinifera* L. cv Sultana). *Plant Stress*, 7, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100128>
- Zulfiqar, F., Akram, N. A., & Ashraf, M. (2020). Osmoprotection in plants under abiotic stresses: New insights into a classical phenomenon. *Planta*, 251(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03293-1>