



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM QUÍMICA



**UMA BREVE REVISÃO SOBRE AS POTENCIALIDADES DOS PONTOS DE
CARBONO NA AGRICULTURA**

JOSÉ ANTONIO MARQUES LINS NETO

RECIFE/PE – 2024

JOSÉ ANTONIO MARQUES LINS NETO

**UMA BREVE REVISÃO SOBRE AS POTENCIALIDADES DOS PONTOS DE
CARBONO NA AGRICULTURA**

Monografia apresentada como pré-requisito de conclusão do Curso de Licenciatura Plena em Química, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, tendo como orientadora a Professora Dr.^a Mônica Freire Belian e Co-orientador o Me. Arthur Luís Silva de Araújo.

RECIFE/PE - 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L759b Lins Neto, José Antonio Marques
UMA BREVE REVISÃO SOBRE AS POTENCIALIDADES DOS PONTOS DE CARBONO NA
AGRICULTURA / José Antonio Marques Lins Neto. - 2024.
40 f. : il.
- Orientadora: Monica Freire Belian.
Coorientadora: Arthur Luis Silva de. Araujo..
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Licenciatura em Química, Recife, 2024.
1. Pontos de carbono. 2. Fluorescência. 3. Fotossíntese. 4. Plantas. 5. Nanopartículas. I. Belian, Monica Freire, orient. II. Araujo., Arthur Luis Silva de., coorient. III. Título

JOSÉ ANTONIO MARQUES LINS NETO

**UMA BREVE REVISÃO SOBRE AS POTENCIALIDADES DOS PONTOS DE
CARBONO NA AGRICULTURA**

Monografia apresentada como pré-requisito de conclusão do Curso de Licenciatura Plena em Química, da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

MONOGRAFIA APROVADA EM / ____ /

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Mônica Freire Belian – UFRPE

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Nattany Tayany Gomes de Paula – UFPE

Primeira Examinadora

Dr.^a Lidiane Macêdo Alves de Lima – UFRPE

Segunda Examinadora

RECIFE/PE – 2024

RESUMO

A agricultura está entre os setores mais economicamente relevantes entre os países emergentes, incluindo o Brasil. Avanços significativos nos setores de agronegócio e floricultura vêm sendo testemunhados com o uso da nanotecnologia, na produção de insumos, como ferramenta de combates de pragas, recuperação de solos e estimulantes foliares de fotossíntese (EFF). Nos últimos anos os pontos de carbono (PCs) (do inglês, *carbon dots* (CDs)) vêm ganhando cada vez mais destaque em trabalhos envolvendo agricultura e o desenvolvimento vegetal. O desenvolvimento de materiais dessa natureza consiste em uma estratégia tecnológica para o aumento na produção de alimentos e crescimento de plantas. Em virtude dessa relevância e do tema e da escassez de trabalhos que discutam a perspectiva do uso de PCs aplicados na agricultura, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma breve revisão da literatura a respeito desses materiais e sua aplicação na agricultura. A busca bibliográfica foi realizada em bases indexadas no Periódico Capes, com artigos de Qualis A1-A4, utilizando cinco palavras-chave (*CDs*, *fluorescence*, *plants*, *photosynthesis*, *CDs-doping*) como filtro de pesquisa no período de 2019-2023. A partir da pesquisa foi possível observar as mais diversas aplicabilidades dos pontos de carbono na agricultura, em categorias que variam desde a química de materiais a biotecnologia e engenharias.

Palavras-Chave: Pontos de carbono; fluorescência; fotossíntese; plantas; nanopartículas.

ABSTRACT

Agriculture is one of the most economically relevant sectors in emerging countries, including Brazil. Significant advances in the agribusiness and floriculture sectors have been witnessed with the use of nanotechnology in the production of inputs, as a tool for pest control, soil recovery and foliar photosynthesis stimulants (FPS). In recent years, carbon dots (CDs) have been gaining more and more prominence in work involving agriculture and plant development. The development of such materials is a technological strategy for increasing food production and plant growth. Given the relevance of this topic and the scarcity of studies discussing the use of PCs in agriculture, the aim of this paper is to carry out a brief review of the literature on these materials and their application in agriculture. The bibliographic search was carried out in databases indexed in the Capes Journal, with Qualis A1-A4 articles, using five keywords (CDs, fluorescence, plants, photosynthesis, CDs-doping) as a search filter in the period 2019-2023. From the research, it was possible to observe the most diverse applications of carbon dots in agriculture, in categories ranging from materials chemistry to biotechnology and engineering.

Keywords: Carbon dots; fluorescence; photosynthesis; plants; nanoparticles

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família que sem eles eu não chegaria a esse momento, e que dedico todo o esforço e amor do mundo;

Aos meus amigos e companheiros de jornada nesse curso de licenciatura, a turma que ingressou comigo em 2019.1, em especial a Carol, Ladjane, Igor, Layne, Sergiany, Joao Paulo, Duda, Mirian, Julia, Juliana, Matheus, Almir, Lucas, Felipe, Larissa e Isa que sempre estiveram comigo;

As pessoas que sempre estiveram comigo no LaQAF, em especial a Matheus Waterloo, Ila, Danylla e Joane;

Aos amigos que fiz no decorrer do curso, deste e de outros departamentos que paguei disciplinas e sempre levarei comigo, em especial o pessoal do projeto jacaré, que tenho um carinho imenso;

A Jhon meu padrinho durante todo o curso, e que sempre me aconselhou;

A turma de físico-química do PLE e que veio comigo até o final do curso;

A todos que fazem parte do LAMTESA, que estão todos os dias e que deixa o ambiente leve e descontraído, amo vocês;

A todos os professores do departamento de química que contribuíram para que eu chegasse aqui, em especial, a minha orientadora Mônica Belian e ao professor Wagner que sempre acreditaram em mim, que abriram as portas do laboratório, e sabem como foi difícil a trajetória até aqui, e que sei que é apenas o começo;

A Lourinalda que foi a primeira professora que me orientou, deu oportunidade nessa jornada, e a quem tenho imensa gratidão;

Aos professores Marcílio, João Rufino e André Liesen de orgânica, ao professor Luciano e professora Katia de físico-química, professores Severino Carlos e Maria José de analítica, aos de inorgânica, área na qual me descobri e que amo, professora Mônica, professor Wagner, professora Ivoneide e professora Flávia,

e aos de educação professora Rute, professor Euzébio, professora Suely e professora Bete;

Aos técnicos dos laboratórios que com eles aprendi e aprendo a cada dia, em especial a Arthur, Lidiane e Shirley;

A Escola Paroquial Nossa Senhora de Fátima, onde pude fazer meus estágios, a todos os professores, servidores e colaboradores, e em especial André Bezerra que foi meu supervisor, a quem tive o privilégio de aprendi muito e torço sempre por seu sucesso.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
2 METODOLOGIA	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1 HISTÓRICO	18
3.2 COMPOSIÇÃO, ESTRUTURA QUÍMICA E PROPRIEDADES	19
3.3 MÉTODOLOGIAS DE SÍNTESE DE PCs	20
3.4 PROCESSOS DE DOPAGEM	22
3.5 PROCESSOS DE FUNCIONALIZAÇÃO/CONJUGAÇÃO	24
3.6 APLICAÇÕES DE PCs NA AGRICULTURA	25
3.6.1 Mecanismo de nutrição e crescimento de plantas - fotossíntese	26
3.6.2 Limitações da fotossíntese e uso de PCs como EFF	29
3.7 ESTADO DA ARTE SOBRE PCs NA AGRICULTURA NOS ÚLTIMOS 5 ANOS	
31	
3.7.1 Resultados preliminares das buscas nas bases de dados	31
3.7.2 Relatos sobre pesquisas sobre o uso de PCs na agricultura	33
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5 REFERÊNCIAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem apresentando os principais alótropos do carbono com suas.....	14
Figura 2 - (a) Diferentes frações vistas na eletroforese em gel; (b) imagem das frações isoladas sob a radiação UV; (c) micrografias dos nanotubos cortados	19
Figura 3 - Esquema geral sobre as metodologias top-down e bottom-up.....	21
Figura 4 - Tipos de materiais condutores.....	23
Figura 5 - Ilustração representativa fotossíntese e respiração	26
Figura 6 - Estruturas das clorofilas a e b	27
Figura 7 - Sistemas fotossintéticos I e II juntamente com a transferência de elétrons.	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de busca no <i>Web of Science</i>	31
Quadro 2 - Relação de publicações sobre PCs nos últimos 5 anos	32
Quadro 3 - Tipos de documento	33

LISTA DE ACRÔNIMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS

π	elétrons pi
Φ	rendimento quântico
ATP	adenosina trifosfato
CDs	<i>carbon dots</i>
EFF	estimulantes foliares de fotossíntese
HOMO	orbital molecular de maior energia ocupado
LUMO	orbital molecular de menor energia desocupado
NADPH	fosfato de dinucleótido de nicotinamida e adenina
ONU	Organização das Nações Unidas
PCs	pontos de carbono
UV	radiação ultravioleta
UVA	radiação ultravioleta de faixa A
UVB	radiação ultravioleta de faixa B

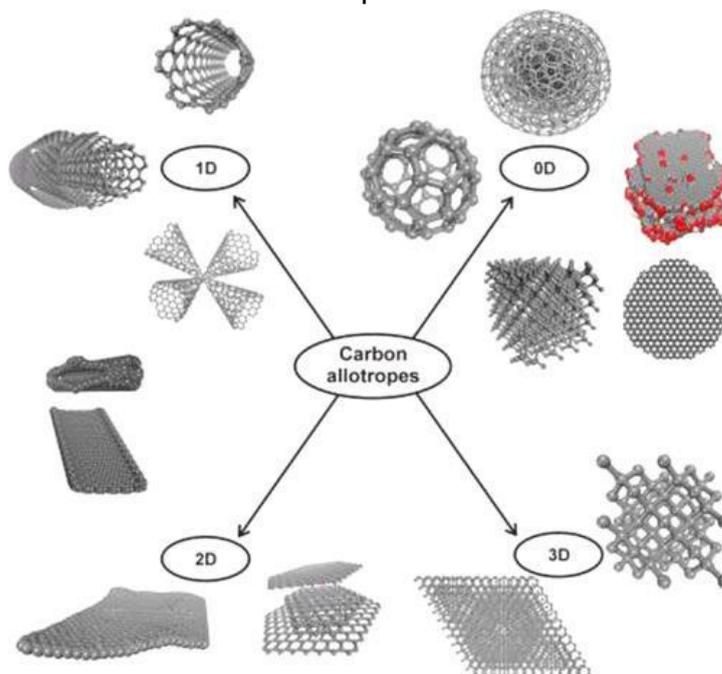
1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia vem desenvolvendo materiais capazes de promover produtos e processos capazes de reduzir impactos ambientais antropogênicos e otimizar processos de garantam a saúde da população mundial. Esses materiais aliados à princípios da química verde podem gerar protótipos alternativos aos materiais tradicionais. Dentre os principais nanomateriais, os pontos quânticos apresentaram muitos avanços no setor industrial. O uso de fontes de produção ricos em matéria orgânica, principalmente proveniente de resíduos, sem valor agregado, tem sido uma estratégia de baixo custo. Daí a relevância do desenvolvimento de pontos de carbono com base em metodologias sintéticas que apresentaram bons resultados cujo balanço energético, fonte de carbono e ausência de solventes orgânicos, constituem estratégia promissora na obtenção de nanomateriais (Georgakilas *et al.*, 2015).

Pontos de carbono (PCs), do inglês *Carbon dots* (CDs), é um alótropo do carbono considerado como nanopartículas quase esféricas, com diâmetro entre 1 e 10 nm, e de dimensão zero, que apresentam fluorescência dependente do comprimento de onda de excitação, alta biocompatibilidade, resistência à fotodegradação e baixa toxicidade (Figura 1). Os PCs são compostos por sua grande maioria de carbonos do tipo sp^2 , com formas hexagonais e organizados de forma cristalina (Ullal; Muthamma; Sunil, 2022) (Georgakilas *et al.*, 2015).

A primeira menção a materiais com propriedades semelhantes aos pontos de carbono foi em 2004, quando a equipe liderada por Xu *et al.* (2004). Os pesquisadores estavam estudando formas em purificar nanotubos de carbono de parede única e observaram a presença de algo que chamou de “impureza interessante”. A impureza apresentava fluorescência e em decorrência disso foram chamados de “carbonos fluorescentes” (Hjort *et al.*, 2023).

Figura 1 - Ilustração apresentando os principais alótropos do carbono com suas respectivas dimensões.



Fonte: Georgakilas et al., (2015)

A síntese de PCs pode ser realizada por meio de uma variedade de métodos, sendo que a escolha do procedimento varia de acordo com às características desejadas, bem como às aplicações específicas buscadas. Os procedimentos sintéticos baseiam-se em duas abordagens, que são conhecidas como *top-down* e *bottom-up* (Banger et al., 2023).

As pesquisas nesse campo progrediram rapidamente e diversos grupos de cientistas começaram a explorar e sintetizar os pontos de carbono com diferentes propriedades e aplicações em todo o mundo (Jing et al., 2023). Os pontos de carbono juntamente com outros materiais nanométricos possuem uma gama de aplicações nas mais diversas áreas, sendo amplamente explorada em campos da medicina, eletrônica, energia, materiais, sensores, entre outros. Suas aplicações incluem a fabricação de materiais mais leves e resistentes, dispositivos eletrônicos miniaturizados e com maior capacidade, sistemas de liberação controlada de medicamentos e diagnósticos mais precisos (Pham et al., 2017).

As aplicações mais recentes dos PCs estão concomitantemente ligadas a criação de novos materiais cujas propriedades visam estabilidade e facilidade na obtenção, bem como estudos em catálise, células solares, produção de dispositivos eletroluminescentes e absorção de radiação tanto na esfera industrial como em ramos da agricultura (de Oliveira Lima; Souza Machado; Schiavon, 2023a). Quando aplicados a agricultura, tanto em cultivos hidropônicos, plantio direto e em sistemas de monoculturas, os PCs são diversificados. Suas contribuições em campo possuem abrangente aplicação desde o aumento considerável da produção de biomassa, germinação e aumento da resistência de doenças (Li *et al.*, 2018).

Outros fatores como detecção de agrotóxicos em cultivos de arroz na Ásia e seus usos como nano fertilizantes, via dopagem com nitrogênio, fósforo e outros nutrientes, além da suas já conhecidas aplicações na promoção e aumento dos sistemas fotossintéticos um e dois, fazendo que haja uma absorção maior da radiação nas faixas do azul e do vermelho (Zheng *et al.*, 2017), (Wang *et al.*, 2018).

A absorção de energia solar das plantas é um fenômeno óptico intrínseco que tem recebido cada vez mais atenção na pesquisa científica devido à sua importância como indicador de processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas. Esse fenômeno ocorre quando as moléculas fotossintéticas, como a clorofila, absorvem fótons durante a fotossíntese e, posteriormente, emitem em comprimento de onda mais longo (Wang *et al.*, 2021).

Uma compreensão aprofundada da fluorescência dos PCs e sua contribuição dentro do processo fotossintético das plantas também tem implicações práticas, sendo explorada em áreas agrícolas e de conservação. O monitoramento remoto da fluorescência pode ser usado para avaliar a saúde das culturas em grande escala, identificar áreas de estresse das plantas e otimizar as práticas agrícolas. Além disso, a capacidade de mapear essa fluorescência aplicada nas plantas em ecossistemas naturais fornece informações valiosas sobre a dinâmica ecológica, contribuindo para a compreensão dos processos de adaptação em diferentes ambientes (Li; Li, 2021). Considerando o que foi elencado temos a seguinte questão de pesquisa: Quais as potencialidades e

aplicações dos PCs na agricultura ? Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo produzir um levantamento bibliográfico dos últimos 5 anos dos avanços para aplicações dos PCs na agricultura.

2 METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma pesquisa bibliográfica cuja abordagem tratou-se da temática dos PCs, visando o comportamento nano e fluorescente aplicado em plantas.

Na metodologia de pesquisa foi utilizado o Periódico Capes, com a base de dados do *Web of Science*, tal fonte foi escolhida por ser uma ferramenta de pesquisa ampla e de fácil acesso, com vasto banco de dados, e por compreender boa parte dos periódicos mais relevantes sobre a temática de PCs. Os trabalhos selecionados atendiam ao critério de revistas de alto fator de impacto e Qualis A1-A4. Na ferramenta de busca foi empregadas as seguintes palavras chaves: *Carbon Dots*, *fluorescence*, *plants*, *photosynthesis*, *doping for CDs*, e suas combinações.

Foi-se então definido o período compreendido entre janeiro de 2019 a dezembro de 2023. Por fim, foram selecionados trabalhos que faziam congruência com a temática desta monografia, sendo estes artigos com foco em PCs e seus comportamentos em plantas, bem como estudos dos mesmos e sua influência no processo fotossintético.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para compor a fundamentação teórica desta monografia, foram selecionados os seguintes tópicos: Histórico dos PCs, características e propriedades físico-químicas, estratégias de síntese e especialmente na relação PCs-fotossíntese, como agentes de entrega de micronutrientes e como EFF.

3.1 HISTÓRICO

No decorrer dos primeiros anos do século XXI, mais precisamente no ano de 2004, a equipe coordenada por Xiaoyou Xu, realizou processos de fragmentação de nanotubos de carbono de parede simples pelo método de descarga de arco e se depararam com algo novo durante os seus experimentos, a presença de espécies fluorescentes intensas (Xu *et al.*, 2004).

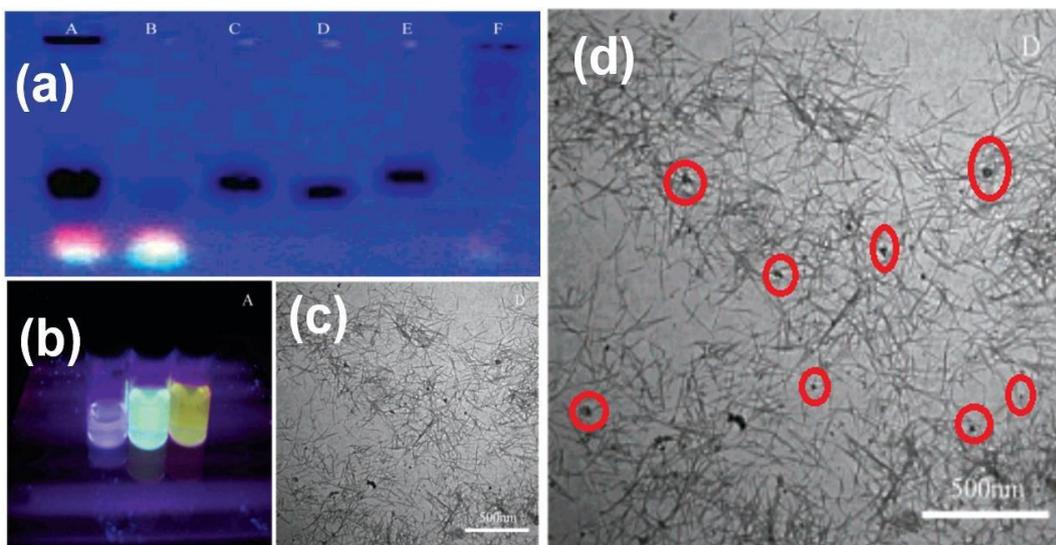
A descoberta acidental dos PCs ocorreu quando os pesquisadores tentavam realizar a purificação do material utilizando via eletroforese em gel. Pela primeira vez foi visto um composto a base de carbono com propriedades de emissão e isso intrigou toda a comunidade científica na época. Durante o isolamento das frações menores dos nanotubos houve a identificação de três frações de cores distintas (Figura 2a) que emitiam desde a região do azul até o vermelho (Zheng *et al.*, 2015).

Os novos materiais foram isolados e submetidos à radiação ultravioleta para avaliação qualitativa de suas fluorescências (Figura 2b). Para entender melhor o comportamento dessa substância inédita análises morfológicas foram realizadas na mistura submetida à eletroforese e foi percebido que as dimensões vistas para essa nova substância eram bem menores que aquelas características dos nanotubos (Figura 2c). Desta forma, foi possível verificar a existência de pequenos pedaços de carbono, que pareciam “pontos de caneta em um papel” quando vistos de cima (Figura 2d), e por tal motivo, o novo material foi nomeado de pontos de carbono, do inglês “*Carbon Dots*” (Xu *et al.*, 2004).

A formação dessas nanopartículas foi devida ao processo inconsciente de passivação dos de carbono do meio com ácido nítrico, mas ainda não se tinha noção do que havia ocorrido do experimento. A partir da divulgação deste estudo foi que se iniciou as investigações sobre a composição e extensão das

aplicações dos PCs (Zhu *et al.*, 2015).

Figura 2 - (a) Diferentes frações vistas na eletroforese em gel; (b) imagem das frações isoladas sob a radiação UV; (c) micrografias dos nanotubos cortados; (d) evidências dos "pontos" de carbono.



Fonte: o autor (2024), adaptado de (Xu *et al.*, 2004)

Já no ano de 2006, Ya-Ping Sun e sua equipe com o objetivo de adquirir materiais que tenham características similares a de Xiaoyou Xu, conseguiram sintetizar nanopartículas fluorescentes usando a técnica de ablação a *laser* em pó de grafite, a qual “batizou” o material como pontos de carbono (Sun *et al.*, 2006).

3.2 COMPOSIÇÃO, ESTRUTURA QUÍMICA E PROPRIEDADES

Dentre as nanopartículas de carbono, aqueles conhecidos como PCs destacam-se por serem enquadrados como uma nova classe de nanomateriais orgânicos com vasta relevância para os ramos da química, física e biologia devido as suas potenciais aplicações (Asadian; Ghalkhani; Shahrokhian, 2019; Ealias; Saravanakumar, 2017).

Os PCs são considerados um alótropo de carbono com dimensões menores que 10 nm, de morfologia pseudo-esférica, veiculado na forma de suspensão coloidal em meio aquoso. O seu núcleo é formado por diversos carbonos insaturados ligados em arranjo hexagonal remetendo aos arranjos vistos nas estruturas do grafite e grafeno. Por tal, alguns trabalhos também classificam os PCs com grafite-PCs ou grafeno-PCs, levando em consideração o aspecto estrutural do centro da partícula. A obtenção dos PCs passa por

etapas de condensação dos átomos de carbono, em seguida passivação na presença de um agente oxidante e, por fim, a etapa de funcionalização com grupos orgânicos, dando origem a que após a fluoróforos bastante promissores. A superfície das partículas apresenta grupos propositalmente ancorados nela para conferir boa afinidade com meio de interesse. O resultado é notável ao elencar as propriedades dos PCs como biocompatibilidade, vasta possibilidade de funcionalização superficial, elevada afinidade com água, alta fotoestabilidade, baixa toxicidade e zona de fluorescência modulável (controle no tamanho das partículas)(Lim; Shen; Gao, 2015).

Diferente das demais formas alotrópicas de carbono cujas aplicações são limitadas à modulação de propriedades mecânicas e térmicas de materiais, destacam-se os PCs por estes apresentarem pela primeira vez propriedades ópticas e eletrônicas apreciáveis, além da aplicabilidade em meio aquoso nunca antes relatada(Ealías; Saravanakumar, 2017; Pereira; Mendes, 2019). O perfil químico inédito obtido com esse tipo de compósito abriu portas para inúmeras aplicações em várias áreas da ciência como fotocatalise, biomedicina e eletrônica(Tuerhong; XU; YIN, 2017).

Os estudos com PCs já se propagam há quase duas décadas, contudo os pesquisadores ainda não chegaram a um consenso final sobre qual o real mecanismo responsável de emissão deste tipo de material. Muitos trabalhos apontam para o fenômeno de confinamento quântico como uma razão pela luminescência da espécie devido ao “aprisionamento” destas partículas entre o *gap* referente a diferença energética do orbital molecular de maior energia ocupado (*Highest Occupied Energy Orbital – HOMO*) e o orbital molecular de menor energia desocupado (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital – LUMO*)(Reshma; Mohanan, 2019).

Outra vertente científica alega que o mecanismo se dá pela soma de fatores interligados como a presença de grupos fluóforos com elevada conjugação π na superfície dos PCs; nível de passivação da superfície; defeitos e estados das superfícies(Esteves da Silva; Gonçalves, 2011) e por fim o grau de recombinação(Srivastava; Gajbhiye, 2011) elétron- buraco de aglomerados de carbono sp^2 dentro de uma matriz sp^3 .

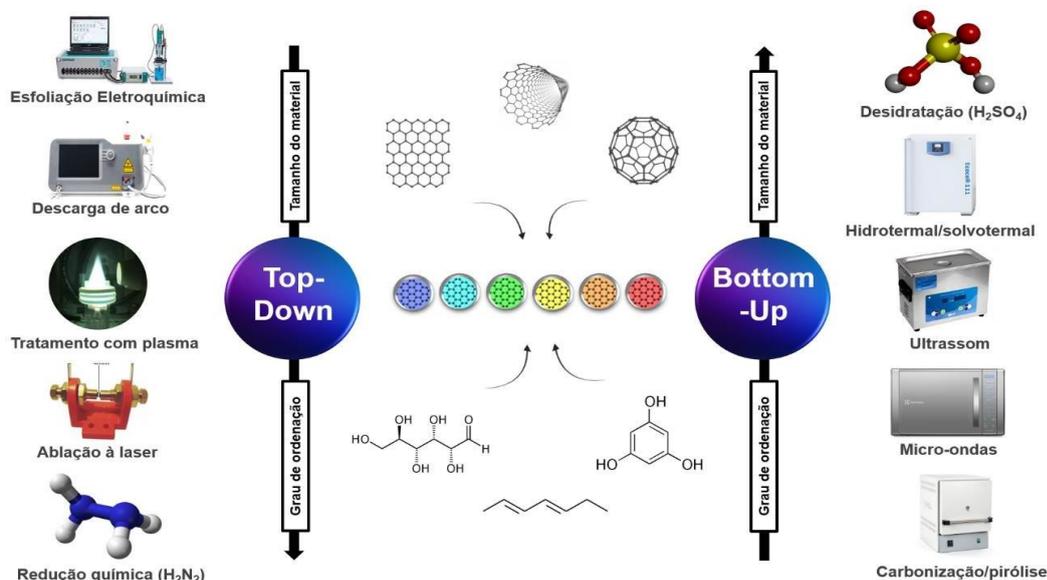
3.3 MÉTODOLOGIAS DE SÍNTESE DE PCs

Ao longo das duas últimas duas décadas diversos tipos de PCs têm sido

sintetizados a partir de diferentes fontes carbonáceas, como sacarídeos, proteínas, resíduos de frutas e vegetais, esterco de gado e carvão derivado de biomassa (Bhamore *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2022). As características desses precursores devem ser levadas em consideração no momento do planejamento dos experimentos. Os fatores como concentração de carbono na fonte, solubilidade dos reagentes, estado de oxidação do material, e arranjo estrutural do esqueleto de carbono, norteiam o método adequado para a obtenção dos PCs (Ghosh *et al.*, 2022).

As metodologias de síntese de PCs são divididas em dois grupos na literatura: o procedimento via “refinamento” (*bottom-up*) e rota de “craqueamento” (*top-down*). Na primeira abordagem os precursores moleculares apresentam um arranjo carbônico estrutural simples, com dimensões pequenas, que a princípio não se enquadram na escala de nanométrica (Zhu *et al.*, 2015). A partir de processos de condensação/polimerização são obtidos núcleos de carbono sp^2 com alto grau de insaturação e hiperconjugação, além de um arranjo bastante ordenado que dão origem aos “pontos” pseudoesféricos, conhecidos como PCs. No segundo grupo de metodologias parte-se de um alótropo de carbono de estrutura mais complexa, e dimensões superiores a tradicional escala dos PCs (1-10 nm). Nesse tipo de materiais, as grandes cadeias de carbono sofrem fragmentações por meio de métodos físicos sob condições drásticas, porém controladas, que originam partículas de diâmetro menor como os PCs (Machado *et al.*, 2015). A representação dessas metodologias citadas é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 - Esquema geral sobre as metodologias de síntese de PCs.



Fonte: O autor (2024)

As principais rotas sintéticas utilizadas para o craqueamento são a esfoliação/oxidação eletroquímica, técnica de descarga de arco, tratamento com plasma, redução química com hidrazina e ablação a laser(Namdari; Negahdari; Eatemadi, 2017). Estas metodologias têm como principais características o emprego de reagentes caros, alto consumo energético e elevado tempo de finalização. Em contrapartida, os métodos de refinamento fazem uso de precursores de fácil acesso, equipamentos de baixos risco de operação e complexidade, além da capacidade de produção de PCs em grande quantidade. Dentre estas cita-se os processos hidrotermal/solvotermal, tratamentos assistidos de ultrassom e micro-ondas, pirólise, e desidratação ácida(Zhu *et al.*, 2015). Recorrentemente a via *bottom-up* é mais utilizada para produção de PCs, pela maior economia financeira associada ao emprego de reagentes de fácil aquisição. Outra vantagem é a maior diversidade de técnicas aplicáveis para produção do nanomaterial(Zhu *et al.*, 2015).

3.4 PROCESSOS DE DOPAGEM

Esse novo tipo de nanopartícula ganhou destaque no campo de aplicação das ciências de materiais e biológicas devido às suas propriedades fluorescentes que a diferenciam dos outros alótropos de carbono que antecedem sua descoberta. Desta forma, a intensidade de emissão de luz é algo que deve ser considerado para produção de PCs(Machado *et al.*, 2015).

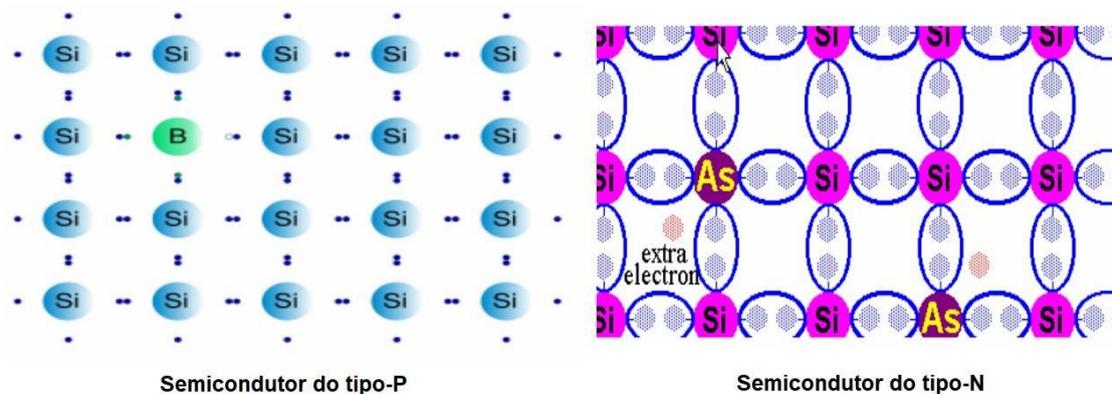
As propriedades ópticas dos PCs são decorrentes de características estruturais da partícula, como defeitos cristalinos e efeitos de borda. A princípio, um núcleo de carbono de arranjo grafítico ou de grafeno poderia apresentar propriedades fluorescentes com altos rendimentos quânticos (Φ), contudo a amplificação da intensidade da radiação era algo de difícil modulação para esse tipo de material. Felizmente para os PCs isso se tornou uma prática trivial e quase que obrigatória para otimização da fluorescência do composto e assim, expandir o seu campo de aplicação e eficiência fotônica(Ghosh *et al.*, 2022).

A elevação do rendimento quântico dos PCs pode ser realizada via dopamento químico, tendo em vista seu comportamento semicondutor (Figura 4). A introdução controlada de heteroátomos com valência distinta do carbono cria excessos de carga negativa ou vacâncias na rede cristalina que ajudam na diminuição do *gap* energético associado a transição eletrônica. Desta forma, o emprego de reagentes químicos distintos cria defeitos na superfície da

pseudoesférica acarretando mudanças consideráveis na fluorescência do material(Oba; Kumagai, 2018).

A dopagem pode ser classificada como positiva (tipo-P) ou negativa (tipo-N) a depender do tipo de átomo que será incorporado na rede de carbono. Ametais e semimetais de das famílias 13, 15 e 16 da Tabela Periódica podem ser empregados como ferramentas de potencialização da emissão de fluorescência. Elementos com tendência a formar ligações covalentes como B, N, P, O, S e Se são potenciais dopantes para os PCs. O carbono está localizado na família 14, sendo este tetravalente e quando associado ao boro cria lacunas positivas em sua rede devido à ausência de elétrons fornecidos pelo dopante. Esse tipo de combinação gera um semicondutor do tipo-P como visto na Figura 4. A geração de um semicondutor do tipo-N se dá pela introdução de espécies com o número de elétrons maior que o carbono, e por tal, haverá um excesso de carga negativa no cristal o que ocasionará um “deslocamento” na banda de valência. Dentre os dopantes negativos mais comuns temos o N e P com um excesso de 1 elétron de valência enquanto os átomos de O e S excedem a equivalência eletrônica em duas unidades(Rahman, 2014).

Figura 4 - Tipos de materiais condutores



Fonte: (Rahman, 2014)

Diversos trabalhos exemplificam a baixa taxa de emissão de PCs oriundos de ácido cítrico, e como a introdução de outros reagentes (principalmente compostos nitrogenados) pode elevar o rendimento quântico em até 500% em alguns casos(Silva de Araújo *et al.*, 2023). Vale salientar que a quantificação do Φ de PCs leva em consideração o tempo de vida do estado excitado e as constantes de decaimentos radioativos e não-radioativos. Já para métodos de medição de intensidade de fluorescência, a concentração das nanopartículas tem grande influência, e devem ser realizadas com cautela devido à possibilidade de efeitos de filtro interno primário e secundário(Ciotta;

Prosposito; Pizzoferrato, 2019).

Sínteses de PCs também podem ser realizadas com codopagem onde mais de um heteroátomo é introduzido no núcleo de carbono sp^2 . Sistemas binários (N-S; N-P; S-P, B-N-PCs...) e ternários (N-P-S; B-N-P; B-N-S-PCs...) já vêm sendo estudados ao longo dos anos, mas os melhores resultados em eficiência de emissão ainda são obtidos com dopagem com altos teores de N(Chen *et al.*, 2023; de Paula *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2023; Saravanan *et al.*, 2024; Sattariazar *et al.*, 2023). A inserção multielementar é uma estratégia desafiadora para muitos pesquisadores da área de nanotecnologia devido à dificuldade da caracterização morfológica dos PCs que comprove que as impurezas estão realmente no arranjo de carbono do material ou ancorados na superfície da partícula(Liu *et al.*, 2024).

3.5 PROCESSOS DE FUNCIONALIZAÇÃO/CONJUGAÇÃO

O uso de reagentes fornecedores de grupos auxocromos também ajuda na elevação do rendimento quântico dos PCs. A princípio, partículas a base de ácido cítrico só teriam átomo de O como dopante, mas a presença de pequenas agentes ancorados como -COOH; -OH; $-O^-$ ajuda na captação de energia e transferência desta ao núcleo hiperconjugado de C_{sp^2} . Quanto maior a tendência de doação de pares de elétrons isolados ao sistema ressonante, maior será a contribuição da “antena” para a luminescência do processo(Silva de Araújo *et al.*, 2023). Dentre os principais grupos destacam-se o amino e tiol em razão de suas basicidades e tendências de compartilhamento de pares isolados. Outras espécies como -X; $-PO_4$; $-HSO_3$; $-CONH_2$; -BOH e derivados também podem agir como antenas, mas com eficácia reduzida quando comparada aos grupos anteriores(Tan *et al.*, 2020).

Além do dopamento, há outras formas de realçar a fluorescência de um PCs já produzido, conhecidos como métodos de funcionalização ou conjugação(Zhou *et al.*, 2020). Nessas abordagens, são empregadas nanopartículas prontas que são submetidas a reações químicas para “aglutinar” novas espécies aos grupos superficiais a partir da formação de uma ligação química covalente. Fazer uso de moléculas orgânicas simples para esse propósito dá-se o nome de funcionalização/conjugação, já quando se associa os PCs a espécies bioativas o processo é conhecido como bioconjugação(Foubert *et al.*, 2016).

A possibilidade de funcionalização depende da interação dos sítios principais e da tendência da formação dos produtos de interesse. Um grupo -NH₂ dos PCs é facilmente convertido à imina (bases de Schiff) quando reage com grupos aldoxila do ligante escolhido (Tachapermon *et al.*, 2022). O raciocínio se estende a outros substratos, como quando se é utilizado aminas primárias para ancorar aminoácidos na nanopartícula via formação de ligação peptídica com os terminais de -COOH dos PCs (de Souza *et al.*, 2023; Hazra *et al.*, 2023). Desta forma, processos de conjugação permitem a modulação dos estabilizantes do PCs, melhorando assim sua solubilidade em meio biológico. Esse processo permite o melhor direcionamento da aplicação destas partículas, tendo em vista que o analito pode ser atraído com maior facilidade para a “isca” adicionada à superfície do material (em casos de sensoriamento) (Liu *et al.*, 2024).

A experimentação necessária para conjugação de novos ligantes aos PCs é de baixa complexidade levando em consideração a grande tendência da geração dos produtos. Os sistemas reacionais são submetidos a aquecimentos brandos ou sistemas de refluxo para obtenção dos produtos desejados. A etapa de purificação geralmente é realizada por meio de membranas de diálises com diâmetro de poro adequado (Liu *et al.*, 2024).

3.6 APLICAÇÕES DE PCs NA AGRICULTURA

As aplicações dos PCs são vastas devido às suas características que tornam essas nanopartículas um conjunto de ferramenta bastante útil na área de bioimagem (Zheng *et al.*, 2015), bio- e quimissensores, agentes de carreamento e distribuição controlada e fotocatalise (Tian *et al.*, 2017). Todos estes campos foram exaustivamente estudados e uma nova vertente das pesquisas com PCs vem ganhando atenção nos últimos anos: uso de PCs na agricultura (Guo *et al.*, 2022).

Com relatórios mais recentes da Organização das Nações Unidas (ONU) para a alimentação e a agricultura, observa-se que desde 2014 há uma crescente na fome em todo o planeta e que com o advento das guerras recentes tal fator tende a se agravar. Com tal cenário, pesquisas nas mais diversas áreas tentam aumentar a produção de alimentos e abastecimento ao redor do planeta (Dufil *et al.*, 2022). Das aplicações dos PCs na agricultura, aqueles voltados ao aumento da fotossíntese e da dopagem com nutrientes para as plantas possuem mais destaque. Dos fatores que provem o aumento do

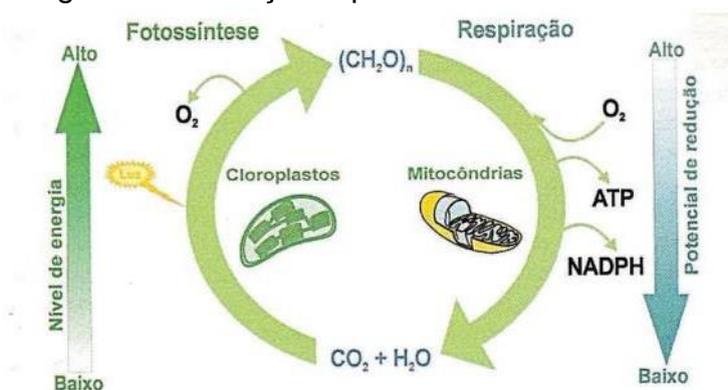
desenvolvimento vegetal e da produção de alimentos, o aumento da fotossíntese e uma melhor nutrição das plantas possuem mais destaque, devido as necessidades fisiológicas das plantas estarem diretamente ligadas aos mesmos(Guirguis *et al.*, 2023).

Das aplicações com PCs na agricultura destacam-se os trabalhos voltados para EFF e da dopagem com nutrientes para as plantas com o intuito de promover a nutrição e manutenção.

3.6.1 Mecanismo de nutrição e crescimento de plantas - fotossíntese

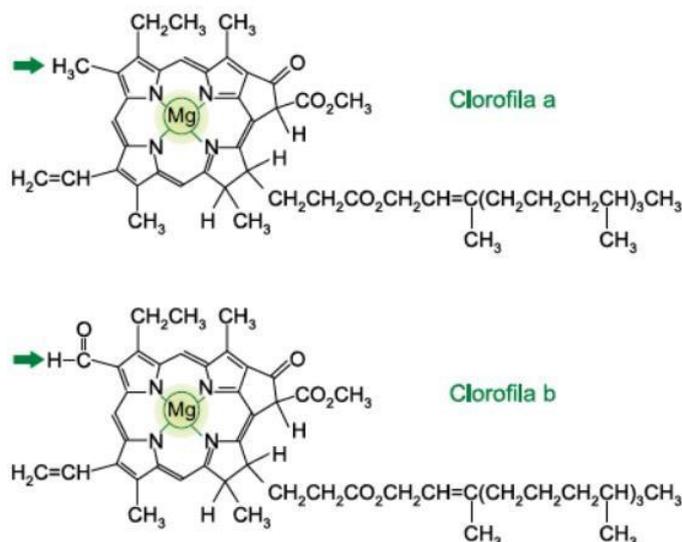
A fotossíntese é um conjunto complexo de reações bioquímicas que utilizam a luz como fonte energética, que têm como resultado a produção de glicose, adenosina trifosfato (ATP) e fosfato de dinucleótido de nicotinamida e adenina (NADPH), como visto na Figura 5. Nas plantas superiores a energia solar é captada por células especializadas localizadas na região do mesofilo, as clorofilas(Modesto; Siqueira, 2010). As clorofilas são pigmentos fotossintéticos, como os carotenoides e as ficobilinas, são insolúveis em água e existem dois tipos, as clorofilas *a* e *b*, como visto na Figura 6. São classificadas como porfirinas, onde um conjunto de anéis de pirrol ficam ao redor de um átomo de magnésio. Também possui cadeias laterais de carbono, conhecidos como fitol, que serve na fixação das mesmas às paredes internas do cloroplasto(Taiz *et al.*, 2017).

Figura 5 - Ilustração representativa fotossíntese.



Fonte: (Peixoto, 2020)

Figura 6 - Estruturas das clorofilas a e b.

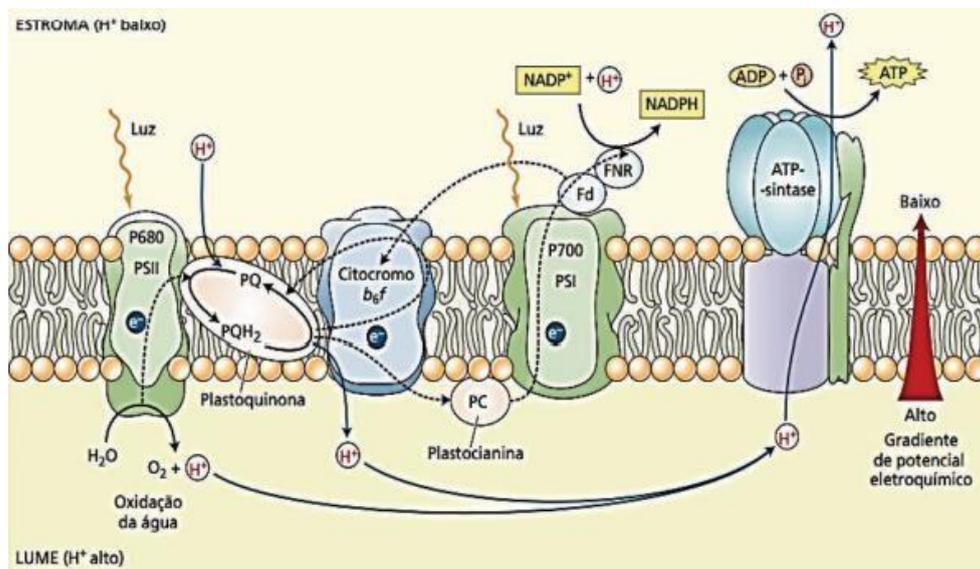


Fonte: Internet, (2024) < <https://estudeprisma.com/questoes/1b95718a-b9>>

Na fotossíntese há dois sistemas, o primeiro é mais conhecido como fase clara da fotossíntese, onde ocorre três processos, o de fotólise da água, onde a mesma na presença de luz quebra em 4H⁺, 4 elétrons e uma molécula de gás oxigênio, e de fotofosforilação acíclica e cíclica, onde ao final de seis ciclos teremos doze moléculas de água gerando seis de oxigênio (Peixoto, 2020). No segundo sistema, também conhecido como fase escura da fotossíntese, também conhecido como ciclo de Calvin ou ciclo das pentoses, Figura 7, que é uma sucessão de reações que envolvem a transformação de dióxido de carbono em moléculas orgânicas, açúcares, através de processos enzimáticos e bioquímicos. Ao final de seis ciclos temos a conversão de CO₂ em glicose e água (Kerbaui, 2019).

Fatores que restringem a fotossíntese de um modo geral são internos e externos. Os internos nos vegetais superiores, como enzimas, coenzimas e deficiência de nutrientes que constituem a fisiologia das plantas. Os externos estão associados a fatores edafoclimáticos, principalmente luz, temperatura, e concentrações de água e gás carbônico (Taiz *et al.*, 2017).

Figura 7 - Sistemas fotossintéticos I e II juntamente com a transferência de elétrons.



Fonte:(Taiz *et al.*, 2017)

Por definição os elementos essenciais para a nutrição mineral das plantas são aqueles cuja ausência dele afeta diretamente o vegetal, que não poderá completar o ciclo de vida(Brown; Zhao; Dobermann, 2022). Dividido em macronutrientes e micronutrientes, os elementos que constituem os ciclos naturais para o desenvolvimento das plantas são, os macronutrientes, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, e os micronutrientes, sendo estes o ferro, cloro, boro, manganês, zinco, cobre e molibdênio (Santa-María; Lavres; Rubio, 2023). Cada nutriente tem sua importância para a plena funcionalidade das plantas, sua ausência ou excesso no vegetal traz consequências ao metabolismo e funcionalidade dos sistemas. Sintomas como, clorose, embranquecimento foliar, pontas necróticas e quedas foliares são perceptíveis nas primeiras semanas(Kerbaui, 2019).

Além da divisão em macro e micronutrientes, atualmente temos também a classificação por grupos de acordo com a função bioquímica a qual cada nutriente exerce, sendo estes: Grupo 1, dos que pertencem a cadeias de carbono, que são o nitrogênio, presente na constituição de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas, entre outros, e o enxofre, que compõe as principais enzimas (Paulilo; Viana; Randi, 2015). O segundo grupo temos os responsáveis pelo armazenamento, sendo estes o fósforo, o boro e o silício. A

presença de fósforo nas plantas é fundamental em reações que envolvem ATP, pois o mesmo constitui as moléculas de ATP, já o boro é extremamente importante para alongamento celular e metabolismo de ácidos nucleicos e o silício contribui para as propriedades mecânicas das paredes celulares, como sua elasticidade e rigidez (Taiz *et al.*, 2017). O terceiro constitui dos nutrientes que continuam na sua forma iônica, caso do potássio, responsável pelo equilíbrio da pressão osmótica celular, e cofator em processos enzimáticos. O cálcio, sendo este responsável pela regulação metabólica, além de ser constituinte base da lamela média das paredes celulares. O magnésio, que é constituinte da molécula de clorofila e atua em processos enzimáticos que envolvem fosfatos e suas transferências. O cloro e o zinco também fazem parte do grupo três, atuam como catalisadores e constituintes de enzimas na fotossíntese (Peixoto, 2020).

No último grupo, ficam os nutrientes envolvidos em reações de oxirredução, sendo estes o ferro, o manganês, o cobre e o molibdênio. Os primeiros envolvidos diretamente na fotossíntese como fixadores de nitrogênio no oxigênio, já os dois últimos exercem função na composição de enzimas e processos metabólicos secundários (Mandal *et al.*, 2023).

A utilização de PCs com o intuito da nutrição mineral está diretamente ligada a presença de grupos carboxilas e hidroxilas que interagem com cátions metálicos muitos sendo nutrientes essenciais para sobrevivência e metabolismo dos vegetais tais como potássio, cálcio, magnésio, ferro entre outros (Li *et al.*, 2020) A presença de dopantes na constituição de PCs no intuito de promover a nutrição é amplamente discutida em países asiáticos como China e Japão, sendo muito mais visto por especialistas como um aditivo a um adubo foliar.

3.6.2 Limitações da fotossíntese e uso de PCs como EFF

Dentro do metabolismo das plantas existem inúmeros agentes envolvidos para o processo de fotossíntese ocorrer e ocasionar no crescimento do organismo. As clorofilas *a* e *b* são componentes extremamente importantes para que desempenham um papel fundamental para o crescimento saudável dos vegetais. Esses pigmentos presentes nas folhas são responsáveis pela captação de energia proveniente do sol e sua transferência para os cloroplastos para

prosseguir com o a conversão de energia luminosa em energia química(Lanfer-Marquez, 2003).

A radiação emitida pelo sol apresenta grande energia associada que recobre diferentes faixas do espectro eletromagnético. Os comprimentos de onda incidentes abrangem as regiões do ultravioleta até o infravermelho próximo, contudo nem todas as parcelas energéticas podem ser aproveitadas pelas plantas(Braga *et al.*, 2015). As clorofilas *a* e *b* agem como “antenas” que captam a radiação em frações específicas do espectro solar e tem zonas ideais para o processo de absorção. Há duas zonas onde a absorção das clorofilas são desfavorecidas, no ultravioleta (região 1) entre 200-400 nm e no infravermelho próximo (região 3) 740-2500 nm, sendo a primeira a mais enérgica de acordo com a relação da mecânica quântica (equação 1). Por consequência toda a energia associada a essas regiões deixa de ser aproveitada para o benefício das plantas.

$$E = \frac{nhc}{\lambda} \quad (1)$$

No que tange o espectro visível (região 2), as clorofilas apresentam bandas de absorção no azul e vermelho e uma forte transmissão na região do verde, o que explica a coração das folhas dos vegetais. Desta forma, somente duas fragmentos do visível conseguem ser efetivamente absorvidos e a partir delas é que são captados os fótons necessários à fotossíntese (Braga *et al.*, 2015).

Como fórmula de estimular o processo de absorção energética na agricultura diferentes compostos vêm sendo adicionados as plantas como estratégia sinérgicas para o melhoramento do metabolismo vegetal. A implantação de novas “antenas” que estariam “sintonizadas” em frequências diferentes das clorofilas *a* e *b* causariam uma maior absorção da energia solar, potencializando assim a fotossíntese. Esses materiais são conhecidos como estimulantes foliares de fotossíntese (EFF), onde os PCs vêm ganhando bastante destaque nos últimos anos(Guo *et al.*, 2022).

Levando em consideração sua escala nanométrica e biocompatibilidade, os PCs se apresentam com fortes candidatos a EFF, por apresentar eficiência fotônica adequada, zona emissora ideal para as clorofilas, boa miscibilidade em meio orgânico e elevado grau de migração no organismo da planta (chegando

até as organelas como os cloroplastos). Outra vantagem é a composição dos PCs que quando planejada servirá como micronutrientes para a própria planta no momento da degradação da partícula (Verma *et al.*, 2019).

O uso de PCs de diâmetro adequado (2-3 ou 9-10 nm) nas superfícies das folhas prometem melhorar a captação energética via processos de absorção-emissão-reabsorção. As nanopartículas quando excitadas pela fração solar no UVA e UVB emitiriam na região do azul ou vermelho, que são as zonas ideais absorção das clorofilas *a* e *b*, que por sua vez receberiam mais fótons (internamente convertidos) no mesmo período de exposição solar. Essa relação amplifica o ganho energético para os vegetais e impulsionam os processos de fotossíntese por mais tempo, aumentando os sistemas I e II, até mesmo nos horários noturnos (Liang *et al.*, 2021; Seesuea *et al.*, 2024).

3.7 ESTADO DA ARTE SOBRE PCs NA AGRICULTURA NOS ÚLTIMOS 5 ANOS

3.7.1 Resultados preliminares das buscas nas bases de dados

No decorrer deste trabalho foram selecionados um total de 131 trabalhos acadêmicos, divididos nos seguintes tópicos: Categorias, editoras, tipos de documentos e países. No Quadro 1, os trabalhos acerca da temática e seguindo a metodologia adotada, foram divididos em categorias pela área de pesquisa, na qual pode-se destacar as de química, com setenta e dois trabalhos.

Quadro 1 - Resultados de busca no *Web of Science*.

Áreas	Tradução	Contagem
<i>Chemistry</i>	Química	72
<i>Materials Science</i>	Ciência dos Materiais	43
<i>Science Technology Other Topics</i>	Ciência, Tecnologia e outros Tópicos	31
<i>Engineering</i>	Engenharias	15
<i>Physics</i>	Física	13
<i>Environmental Sciences Ecology</i>	Ciências Ambientais e Ecologia	11
<i>Food Science Technology</i>	Ciência de Alimentos e Tecnologia	7
<i>Spectroscopy</i>	Espectroscopia	7
<i>Biochemistry Molecular Biology</i>	Biologia Bioquímica Molecular	6
<i>Biotechnology Applied Microbiology</i>	Biotecnologia Aplicada à Microbiologia	3
<i>Energy Fuels</i>	Combustíveis Energéticos	3

<i>Nutrition Dietetics</i>	Dietética Nutricional	3
<i>Pharmacology Pharmacy</i>	Farmacologia	3
<i>Plant Sciences</i>	Ciências Vegetais	3
<i>Agriculture</i>	Agricultura	2
<i>Biophysics</i>	Biofísica	2
<i>Electrochemistry</i>	Eletroquímica	2
<i>Instruments Instrumentation</i>	Instrumentação de Materiais	2
<i>Optics</i>	Óptica	2
<i>Toxicology</i>	Toxicologia	2
<i>Marine Freshwater Biology</i>	Biologia Marinha de Água Doce	1
<i>Polymer Science</i>	Ciência dos Polímeros	1

Fonte: O autor (2024)

No Quadro 2 temos os anos de publicação e o quantitativo de trabalhos, foi-se possível observar uma crescente nos últimos anos, com uma leve oscilação entre os anos de 2020 e 2022, muito por conta da pandemia da Covid-19 e a volta dos trabalhos nano e caracterização para o aumento vegetativo da produção de alimentos básicos para a população asiática nas produções de arroz, milho, e produtos voltados a alimentação bovina e suína.

No Quadro 3 temos os tipos de documentos, destacando-se a produção de artigos entre A1 e A4 e artigos de revisão, estes de suma importância para os pesquisadores, como relata (Araújo; Da Costa; Lima, 2021)em seu artigo onde retrata a importância do gênero textual artigo científico e a necessidade de uma comunidade que interaja não somente com seus pares como com a sociedade, bem como trabalhos de revisão que auxiliam toda uma comunidade científica como dito em (Dorsa, 2020).

Quadro 2 - Relação de publicações sobre PCs nos últimos 5 anos

Ano da publicação	Publicações
2023	36
2022	29
2021	31
2020	17
2019	18

Fonte: O autor (2024)

Quadro 3 - Tipos de documento

Tipo de Documento	Publicações
Artigos	120
Artigo de Revisão	10
Artigo de Dados	01
Artigo de Conferência	01
Artigo com Acesso Antecipado	04

Fonte: O autor (2024)

3.7.2 Relatos sobre pesquisas sobre o uso de PCs na agricultura

No campo da química, exemplos apresentados por Zhang et al., (2022), utilizando PCs a partir de romã no controle do metabolismo e crescimento com foco na fluorescência, (Özcan, 2023) onde a detecção de Fe^{3+} a partir de PCs advindos de sementes de papoula deu-se de forma bem-sucedida, (Kou et al., 2021) onde foi detectado a correlação da resistência a seca e a utilização dessas *nanopartículas* nas culturas de tomate e feijão mungu.

Outra categoria de destaque foi a ciência dos materiais com quarenta e três trabalhos, tendo destaque para (Alikhani et al., 2023), onde avaliou o índice de crescimento e produtividade do trigo utilizando um fertilizante a base de zinco dopado em PCs. Na pesquisa desenvolvida por (Salha et al., 2023), onde a dopagem de nitrogênio fez com que o crescimento e rendimento no morango tivesse ótimos índices de carboidratos, compostos fenólicos e área foliar, e em suma no trabalho de (Han et al., 2022) onde o efeito positivo da presença de PCs na germinação de sementes de algodão, fizeram que diminuísse o tempo de espera na germinação de uma das culturas mais importantes do sudeste asiático.

Os trabalhos mais recentes envolvendo os pontos de carbono na agricultura têm um enfoque nas atribuições das relações dessas nanopartículas principalmente pelas características fluorescentes e com utilização para estimulante foliar de fotossíntese nas mais diversas plantas, principalmente alimentícias. Relações estas envolvendo também o crescimento vegetativo, dados biométricos e aumento da produção (Choi; Zheng; Tan, 2020; Lima; Machado; Schiavon, 2023)

Trabalhos como de Hu e colaboradores em 2020 comprovam a eficiência da utilização desses materiais em diversas culturas, focando na

entrega do desenvolvimento foliar. Já em Li e colaboradores, seu trabalho teve enfoque na redução de danos em plantas de alface, vegetal amplamente consumido em todo mundo(Hu *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022).

Outros trabalhos contribuíram para a crescente dos pontos de carbono tinham foco na quebra de dormência de sementes, tendo destaque para Han e colaboradores em 2022, e seu estudo com sementes de algodão, que obteve resultados primorosos, fazendo com que diminuísse o tempo de espera na germinação de uma das culturas mais importantes do sudeste asiático(Han *et al.*, 2022).

Recentes evidencias constataram que nos pontos de carbono, a depender de seu material de origem, há em suas estruturas nutrientes como, ferro, magnésio, cobre, e demais, quando estes são liberados, proporcionam aos vegetais uma melhora significativa em produções e ganho de biomassa. Em culturas como alface, tomate, arroz, feijão e milho tiveram aumento significativos na produção, bem como na eficiência fotossintética(Cheng *et al.*, 2023; Guirguis *et al.*, 2023).

Trabalhos também acrescentam aplicações como antibactericidas tomando como base pontos de carbono produzidos através de plantas, como evidência Prathap e colaboradores em 2023, traz em seu estudo também as aplicações envolvendo a fluorescência destes materiais(Prathap *et al.*, 2023).

Outros estudos publicados remetem as utilizações dos pontos de carbono em sistemas hidropônicos, estudos que remetiam o uso de detecção de ATP, como nos trabalhos de Jindal e colaboradores, e a utilização dos pontos de carbono na detecção de ferro como em Hjort e colaboradores, ambos no ano de 2023(Hjort *et al.*, 2023; Jindal; Kaur, 2023).

Outras colaborações envolveram o crescimento de culturas como a do morangueiro, visto no trabalho de Abu Salha e colaboradores, e em soja, por Ji e colaboradores, ambos em 2023, utilizando os pontos de carbono como fertilizante bastante eficaz e na biossíntese de aminoácidos e condições de estresse hídrico(Ji *et al.*, 2023; Salha *et al.*, 2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão forneceu uma visão abrangente dos emergentes campos de estudo envolvendo pontos de carbono e seu impacto nos desenvolvimentos de plantas a partir do seu papel como ERF fluorescente. Olhando para a última meia década de investigação, houve uma evolução notável na compreensão dos efeitos desses nanomateriais sobre processos fisiológicos e bioquímicos das plantas. As evidências apresentadas indicam que os pontos de carbono têm grande potencial nas propriedades fotofísicas das plantas, com repercussões diretamente observáveis nas taxas de fluorescência, bem como no crescimento das plantas.

5 REFERÊNCIAS

- ALIKHANI, Mina *et al.* Effect of a new slow-release zinc fertilizer based on carbon dots on the zinc concentration, growth indices, and yield in wheat (*Triticum aestivum*). **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 200, n. May, p. 107783, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107783>.
- ARAÚJO, Jussara Maria Oliveira de; DA COSTA, Maeli Araújo; LIMA, Raiclei Silva. a Importância Do Artigo Científico Na Vida Acadêmica. **Criar Educação**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 64, 2021.
- ASADIAN, Elham; GHALKHANI, Masoumeh; SHAHROKHIAN, Saeed. Electrochemical sensing based on carbon nanoparticles: A review. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [s. l.], v. 293, n. January, p. 183–209, 2019.
- BHAMORE, Jigna R. *et al.* Green synthesis of multi-color emissive carbon dots from Manilkara zapota fruits for bioimaging of bacterial and fungal cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, [s. l.], v. 191, n. December 2018, p. 150–155, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.12.023>.
- BRAGA, Gilberto U.L. *et al.* Molecular and physiological effects of environmental UV radiation on fungal conidia. **Current Genetics**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 405–425, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00294-015-0483-0>.
- BROWN, Patrick H.; ZHAO, Fang Jie; DOBERMANN, Achim. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 476, n. 1–2, p. 11–23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05171-w>.
- CHEN, Lin *et al.* Long-lived room-temperature phosphorescent complex of B, N, P co-doped carbon dots and silica for afterglow imaging. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [s. l.], v. 390, n. April, p. 133946, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133946>.
- CIOTTA, E.; PROSPPOSITO, P.; PIZZOFERRATO, R. Positive curvature in Stern-Volmer plot described by a generalized model for static quenching. **Journal of Luminescence**, [s. l.], v. 206, n. August 2018, p. 518–522, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.10.106>.
- DE PAULA, Nattany T.G. *et al.* Use of carbon dots synthesized from citrate as a fluorescent probe for quercetin determination in tea and beer samples. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], v. 30, n. 11, p. 2355–2366, 2019.
- DE SOUZA, A. P. *et al.* One-pot functionalization of carbon dots with ecPis-4s antimicrobial peptide. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 307, n. December 2022, p. 128101, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128101>.
- DORSA, Arlinda Cantero. O papel da revisão da literatura na escrita de artigos

científicos. **Interações (Campo Grande)**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 681–684, 2020.

DUFIL, Gwennaël *et al.* Plant Bioelectronics and Biohybrids: The Growing Contribution of Organic Electronic and Carbon-Based Materials. **Chemical Reviews**, [s. l.], v. 122, n. 4, p. 4847–4883, 2022.

EALIAS, Anu Mary; SARAVANAKUMAR, M. P. A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 263, n. 3, 2017.

ESTEVEZ DA SILVA, Joaquim C.G.; GONÇALVES, Helena M.R. Analytical and bioanalytical applications of carbon dots. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 1327–1336, 2011.

FOUBERT, Astrid *et al.* Bioconjugation of quantum dots: Review & impact on future application. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 83, p. 31–48, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2016.07.008>.

GAO, Qichao *et al.* N, S/P co-doped hemicellulose-based carbon dots with tunable fluorescence for anti-counterfeiting. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 253, n. P6, p. 126332, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126332>.

GHOSH, Trisita *et al.* Current scenario and recent advancement of doped carbon dots: a short review scientocracy update (2013–2022). **Carbon Letters**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 953–977, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42823-022-00339-5>.

GUIRGUIS, Albert *et al.* Boosting Plant Photosynthesis with Carbon Dots: A Critical Review of Performance and Prospects. **Small**, [s. l.], v. 19, n. 43, 2023.

GUO, Baoyan *et al.* The role of fluorescent carbon dots in crops: Mechanism and applications. **SmartMat**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 208–225, 2022.

HAN, Shuai *et al.* Fabrication of sodium dinitrophenol derived carbon dots and its effect on seed germination of cotton. **Micro and Nano Letters**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 149–154, 2022.

HAZRA, Niladri *et al.* Surface modification of carbon dots *via* peptide covalent conjugation. **Chemical Communications**, [s. l.], v. 59, n. 33, p. 4931–4934, 2023.

KERBAUY, Gilberto Barbante. **Fisiologia Vegetal**. 3 edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019.

KOU, Erfeng *et al.* Nitrogen and Sulfur Co-doped Carbon Dots Enhance Drought Resistance in Tomato and Mung Beans. **ACS Applied Bio Materials**, [s. l.], v. 4, n. 8, p. 6093–6102, 2021.

LANFER-MARQUEZ, Ursula Maria. O papel da clorofila na alimentação humana: uma revisão. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 227–242, 2003.

- LI, Yadong *et al.* A review on the effects of carbon dots in plant systems. **Materials Chemistry Frontiers**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 437–448, 2020.
- LIANG, Shaofeng *et al.* Fluorescent carbon dots derived from magnolia withered leaves for promoting growth and fluorescent labeling of bean sprouts. **Carbon Trends**, [s. l.], v. 4, p. 100063, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2021.100063>.
- LIM, Shi Ying; SHEN, Wei; GAO, Zhiqiang. Carbon quantum dots and their applications. **Chemical Society Reviews**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 362–381, 2015.
- LIU, Huaxin *et al.* A review of carbon dots in synthesis strategy. **Coordination Chemistry Reviews**, [s. l.], v. 498, p. 215468, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215468>.
- MACHADO, Cláudia Emanuele *et al.* Carbon quantum dots: Chemical synthesis, properties and applications. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 1306–1346, 2015.
- MANDAL, Sayanti *et al.* Retraction Note: Plant nutrient dynamics: a growing appreciation for the roles of micronutrients (Plant Growth Regulation, (2023), 100, 2, (435-452), 10.1007/s10725-023-01006-z). **Plant Growth Regulation**, [s. l.], p. 10–11, 2023.
- MODESTO, Zulmira Maria Mota; SIQUEIRA, Nilza Janete Baraldi. **Botânica: estudo e ensino**. 12 edição. São Paulo: [s. n.], 2010.
- NAMDARI, Pooria; NEGAHDARI, Babak; EATEMADI, Ali. Synthesis, properties and biomedical applications of carbon-based quantum dots: An updated review. **Biomedicine and Pharmacotherapy**, [s. l.], v. 87, n. 88, p. 209–222, 2017.
- OBA, Fumiyasu; KUMAGAI, Yu. Design and exploration of semiconductors from first principles: A review of recent advances. **Applied Physics Express**, [s. l.], v. 11, n. 6, 2018.
- ÖZCAN, Yusuf. Green carbon dots from poppy seeds with conjugated hydrogel hybrid films for detection of Fe³⁺. **Indian Journal of Chemical Technology**, [s. l.], v. 30, n. January, p. 57–66, 2023.
- PAULILO, Maria Terezinha Silveira; VIANA, Ana Maria; RANDI, Áurea Maria. **Fisiologia Vegetal**. Florianópolis: Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- PEIXOTO, Clovis Pereira. **Princípios de fisiologia vegetal: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Pod Editora, 2020.
- PEREIRA, Kaio A. B.; MENDES, Luis C. Nanotubos De Carbono Aplicados Como Carga Em Nanocompósitos Poliméricos: Uma Revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693**, [s. l.], v. 11, p. 38, 2019.
- QIN, Fuwei *et al.* Functional carbon dots from a mild oxidation of coal liquefaction residue. **Fuel**, [s. l.], v. 322, n. March, p. 124216, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124216>.

RAHMAN, Atikur. A Review on Semiconductors Including Applications and Temperature Effects in Semiconductors. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 50–70, 2014. Disponível em: <http://asrjetsjournal.org/>.

RESHMA, V. G.; MOHANAN, P. V. Quantum dots: Applications and safety consequences. **Journal of Luminescence**, [s. l.], v. 205, n. August 2018, p. 287–298, 2019.

SALHA, Belal Abu *et al.* Plant-Derived Nitrogen-Doped Carbon Dots as an Effective Fertilizer for Enhanced Strawberry Growth and Yield. [s. l.], 2023.

SANTA-MARÍA, Guillermo Esteban; LAVRES, José; RUBIO, Gerardo. The concept of mineral plant nutrient in the light of evolution. **Plant Science**, [s. l.], v. 334, n. May, p. 0–2, 2023.

SARAVANAN, Arumugam *et al.* Heteroatom co-doping (N, NS, NB) on carbon dots and their antibacterial and antioxidant properties. **Surfaces and Interfaces**, [s. l.], v. 46, n. January, p. 103857, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.103857>.

SATTARIAZAR, Simin *et al.* Encapsulation of thymol and menthol loaded N/S co-doped carbon dots derived from a mixture of herbal extracts as theranostic agents with anticancer properties. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, [s. l.], v. 232, n. May, p. 113603, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113603>.

SEESUEA, Chuleekorn *et al.* Green synthesis of elephant manure-derived carbon dots and multifunctional applications: Metal sensing, antioxidant, and rice plant promotion. **Sustainable Materials and Technologies**, [s. l.], v. 39, n. August 2023, p. e00786, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00786>.

SILVA DE ARAÚJO, Arthur Luís *et al.* Bottom-Up Synthesis Optimization Through The Design Of Experiments Using Blue N,S-Carbon Dots With Interesting Affinity For Potentially Toxic Elements. **ChemistrySelect**, [s. l.], v. 8, n. 34, 2023.

SRIVASTAVA, Sachchidanand; GAJBHIYE, Namdeo S. Carbogenic nanodots: Photoluminescence and room-temperature ferromagnetism. **ChemPhysChem**, [s. l.], v. 12, n. 14, p. 2624–2632, 2011.

SUN, Ya Ping *et al.* Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence. **Journal of the American Chemical Society**, [s. l.], v. 128, n. 24, p. 7756–7757, 2006.

TACHAPERMPON, Yordkhuan *et al.* Fluorescent carbon dots based phytosensor for indoor formaldehyde pollution monitoring. **Plant Nano Biology**, [s. l.], v. 2, n. May, p. 100015, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plana.2022.100015>.

TAIZ, Lincoln *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6 edição. Porto Alegre: Artmed, 2017.

- TAN, Jing *et al.* Achieving red room temperature afterglow carbon dots in composite matrices through chromophore conjugation degree controlling. **Journal of Luminescence**, [s. l.], v. 223, n. February, p. 117267, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117267>.
- TIAN, Tian *et al.* One-pot synthesis of boron and nitrogen co-doped carbon dots as the fluorescence probe for dopamine based on the redox reaction between Cr(VI) and dopamine. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [s. l.], v. 240, p. 1265–1271, 2017.
- TUERHONG, Mhetaer; XU, Yang; YIN, Xue Bo. Review on Carbon Dots and Their Applications. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 139–150, 2017.
- VERMA, Sandeep Kumar *et al.* Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 667, p. 485–499, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.409>.
- XU, Xiaoyou *et al.* Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. **Journal of the American Chemical Society**, [s. l.], v. 126, n. 40, p. 12736–12737, 2004.
- ZHANG, Y *et al.* Fluorescence Imaging, Metabolism, and Biodistribution of Biocompatible Carbon Dots Synthesized Using *Punica granatum* L. Peel. **JOURNAL OF BIOMEDICAL NANOTECHNOLOGY**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 381–393, 2022.
- ZHENG, Min *et al.* Self-Targeting Fluorescent Carbon Dots for Diagnosis of Brain Cancer Cells. **ACS Nano**, [s. l.], v. 9, n. 11, p. 11455–11461, 2015.
- ZHOU, Yiqun *et al.* Direct conjugation of distinct carbon dots as Lego-like building blocks for the assembly of versatile drug nanocarriers. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 576, p. 412–425, 2020.
- ZHU, Shoujun *et al.* The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective. **Nano Research**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 355–381, 2015.