

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação
Mestrado Profissional em Tecnologia em Química e Bioquímica

ADRIANO ANTONIO DOS ANJOS NETO

**AVALIAÇÃO E ELUCIDAÇÃO DO MECANISMO DE AÇÃO
DE POLÍMEROS NATURAIS MODIFICADOS UTILIZADOS
NA AGRICULTURA**

Versão corrigida da dissertação conforme Resolução CoPGr 5890
O original se encontra disponível na Secretaria de Pós-Graduação do IQ-USP

São Paulo
Data do depósito da SPG
26/07/2022

ADRIANO ANTONIO DOS ANJOS NETO

**AVALIAÇÃO E ELUCIDAÇÃO DO MECANISMO DE AÇÃO DE
POLÍMEROS NATURAIS MODIFICADOS UTILIZADOS NA
AGRICULTURA**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Química da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de mestre em Ciências,
Área de Concentração Tecnologia em
Química e Bioquímica

Orientadora: Profa. Dra. Denise F. S. Petri

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha Catalográfica elaborada eletronicamente pelo autor, utilizando o programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP e adaptado para a Divisão de Biblioteca e Documentação do Conjunto das Químicas da USP

Bibliotecária responsável pela orientação de catalogação da publicação:
Marlene Aparecida Vieira - CRB - 8/5562

d583a dos Anjos Neto, Adriano Antonio
Avaliação e elucidação do mecanismo de ação de polímeros naturais modificados utilizados na agricultura / Adriano Antonio dos Anjos Neto. - São Paulo, 2022.
106 p.

Dissertação (mestrado) - Instituto de Química da Universidade de São Paulo. Departamento de Química Fundamental.

Orientador: Petri, Denise Freitas Siqueira

1. Agricultura. 2. Solo. 3. Estresse hídrico. 4. Polissacarídeo. 5. Produtividade. I. T. II. Petri, Denise Freitas Siqueira, orientador.



Universidade de São Paulo
Instituto de Química

"Avaliação e elucidação do mecanismo de ação de polímeros naturais modificados utilizados na agricultura"

ADRIANO ANTONIO DOS ANJOS NETO

Dissertação de Mestrado submetida ao Instituto de Química da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Programa: Mestrado Profissional em Tecnologia em Química e Bioquímica.

APROVADO(A) POR:

**Profa. Dra. Denise Freitas Siqueira Petri
(Orientadora e Presidente)**

**Profa. Dra. Roselena Faez
UFSCAR - ARARAS**

**Dra. Lidiane de Oliveira
Solvay (Rhodia Brasil S/A)**

**SÃO PAULO
04 de outubro de 2022**

Dedico este trabalho à minha mãe, a quem devo absolutamente tudo e que nunca mediu esforços para garantir a minha educação. Não haveria o dia de hoje sem a dedicação e amor que ela me dá desde sempre.

AGRADECIMENTOS

Serei eternamente grato a todos os meus familiares, que me acompanharam de perto ao longo deste trabalho, dedicando apoio e afeto em todos os momentos e contribuindo para a realização deste sonho. Menciono especialmente a Ivone, Ijanete, Heloíse, Leonardo, Reginaldo e Rodrigo, que não arredaram o pé em nenhum momento e tornaram o caminho mais tranquilo de ser percorrido;

Especialmente ao Leonardo pelas horas dedicadas às discussões sobre a pesquisa, com sugestões, críticas e companheirismo;

Aos cientistas e aos gestores que confiaram na ciência em meio ao maior desafio da nossa geração, a pandemia de Covid-19, e entenderam que a pressa, angústia e ansiedade pelas vacinas se justificavam. Foram o desenvolvimento e a aquisição de vacinas que viabilizaram o combate dessa doença e o retorno das atividades com segurança;

À professora Dra. Denise Petri pela paciência, sugestões, dedicação de tempo e esforço que, através de sua orientação, permitiram a realização e conclusão deste trabalho;

Aos colegas de laboratório e trabalho pelas discussões e sugestões que indubitavelmente contribuíram para o enriquecimento deste trabalho;

Aos meus gestores atuais e anteriores que a mim creditaram confiança, investindo tempo, recurso e incentivo para conclusão deste trabalho e colaborando para meu desenvolvimento profissional e pessoal;

À Solvay, que me abriu as portas em 2014 e me confiou essa oportunidade de estudar a fundo um projeto tão significativo e importante para os objetivos comerciais e de sustentabilidade da companhia;

Ao Instituto de Química da Universidade de São Paulo pela acolhida e oportunidade de regressar à instituição, agora como pós-graduando, em um programa tão bem desenhado e executado;

À DSchultz Consultoria Agronômica e à Efficaciam Estudos Agronômicos que, através dos seus colaboradores Alexandre Mansano, Cristiane Oliveira, Diego Fienga e Dieter Schultz, abriram as portas de suas instalações para realização de ensaios relevantes a este trabalho e promoveram um excelente ambiente para compartilhamento do robusto conhecimento existente nessas companhias;

À Nossa Senhora Aparecida.

“I have the audacity to believe that people everywhere can have three meals a day for their bodies, education and culture for their minds and dignity, equality and freedom for their spirits.”

(LUTHER KING JR., 1964)

RESUMO

dos Anjos Neto, A. A. **Avaliação e elucidação do mecanismo de ação de polímeros naturais modificados utilizados na agricultura** 2022. 105 p. Dissertação – Programa de Mestrado Profissional de Tecnologia em Química e Bioquímica do Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Atualmente a agricultura ocupa um papel de extrema importância na conjuntura global e nacional e está inserida em um contexto de enormes desafios devido ao aumento da população mundial e maior demanda por alimentos. Ao mesmo tempo, é o setor mais afetado pelos impactos negativos das mudanças climáticas, que têm espalhado suas consequências de maneira cada vez mais frequente e intensa. Um dos principais efeitos é a alteração do regime de chuvas ao redor do globo, ocasionando estiagens intensas e duradouras, capazes de reduzir a produtividade de safras e comprometer a produção alimentícia.

As abordagens atualmente existentes no mercado para mitigar as consequências negativas da escassez hídrica demandam alto investimento de implementação e manutenção, ou possuem um perfil ecotoxicológico insatisfatório.

Polímeros de origem natural modificados quimicamente foram avaliados em termos de desempenho e capacidade de prover às plantas uma maior disponibilidade de água através de retenção hídrica. Os resultados alcançados demonstraram que os polímeros modificados com grupos iônicos foram capazes de promover um melhor gerenciamento hídrico no microambiente ao redor de sementes e entregar ganhos de produtividade a lavouras de soja. O mecanismo de ação da tecnologia estudada foi elucidado através de ensaios de determinação de capacidade de campo, análise de elipsometria, microscopia de força atômica, ensaios de germinação de soja sob estresse hídrico e implementação de áreas de soja a céu aberto a partir da aplicação em tratamento de sementes e sulco de plantio. As interações intra e intermoleculares entre as partículas de solo, moléculas de polímero e de água se mostraram ponto chave para a mudança de patamar de desempenho de polímeros naturais modificados utilizados na agricultura, quando comparados com os grupos controle.

A tecnologia aqui estudada é, portanto, recomendada para utilização na agricultura, com capacidade de potencializar o efeito de tecnologias dependentes de água, resultando em maior produtividade na colheita.

Palavras-chave: agricultura, solo, estresse hídrico, polissacarídeo, produtividade, soja

ABSTRACT

dos Anjos Neto, A. A. **Evaluation and mode of action elucidation for modified natural polymers used in agriculture** 2022. 105 p. Dissertação – Programa de Mestrado Profissional de Tecnologia em Química e Bioquímica do Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Nowadays agriculture occupies an extremely important role both in the global and national scenarios. It's included in a very challenging context due to the forecast of increased world population and consequent higher demand for food. At the same time, it is the most affected economic sector by the climate change effects, which have been causing frequent and harsh impacts. One of the main effects is the change in the rainfall pattern worldwide, which causes severe and long-lasting droughts, responsible for causing crops to fail and therefore putting food production at risk. The current available mitigation measures to address hydric scarcity require a huge investment for implementation and maintenance or do not present a satisfactory and safe ecotoxicological profile.

Chemically modified natural polymers have been evaluated in terms of performance and ability to provide the plants with higher water availability through hydric retention. The results obtained show that such ionic group modified polymers are able to promote better water management in a given microenvironment surrounding the seeds and ultimately delivery a higher yield to soy crops. The technology's mode of action has been elucidated through field capacity determination trials, ellipsometry, atomic force microscopy, soy germination trials under hydric stress and, finally, implementation of soy areas under actual field conditions by applying the polymers via seed treatment and in-furrow methods.

Both intra- and intermolecular interaction between soil particles, polymer and water molecules have been proven as key to understanding the agricultural performance improvement of the modified polymers when compared to the control.

The technology is recommended for agricultural applications due to its ability to boost the effect of water-dependent technologies, promoting higher yields.

Keywords: agriculture, soil, hydric stress, polysaccharides, yield, soy

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados detalhados sobre os materiais utilizados no estudo.	28
Tabela 2 - Soluções preparadas para ensaio de elipsometria.	32
Tabela 3 - Listagem dos polímeros e respectivo protocolo adotado no ensaio de germinação em caixa de areia.	35
Tabela 4 - Listagem dos polímeros e respectivo protocolo adotado no ensaio de germinação em rolo de papel.	41
Tabela 5 - Capacidade de retenção de campo imediata, em %, para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo arenoso.	46
Tabela 6 - Capacidade de retenção de campo imediata, em %, para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo argiloso.	50
Tabela 7 - Capacidade de retenção de campo, em %, após uma semana para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo arenoso.	53
Tabela 8 - Comparação entre o incremento da capacidade de retenção de campo após uma semana em relação à imediata em solos arenosos, utilizando o polímero AgRHO 01.	55
Tabela 9 - Comparação entre o incremento da capacidade de retenção de campo após uma semana em relação à imediata em solos arenosos, utilizando o polímero AgRHO 02.	55
Tabela 10 - Comparação entre o incremento da capacidade de retenção de campo após uma semana em relação à imediata em solos arenosos, utilizando o polímero AgRHO 03.	56
Tabela 11 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em caixa de areia, sem restrição hídrica para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.	71
Tabela 12 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em caixa de areia, com restrição hídrica de 30% para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.	73

Tabela 13 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em rolo de papel, sem restrição hídrica para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.	77
Tabela 14 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em rolo de papel, com restrição hídrica de 30% para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.	78
Tabela 15 - Comparação entre a Capacidade de retenção de campo imediata para cada um dos polímeros nas concentrações estudadas em solo arenoso, incluindo as médias e seus respectivos grupos estatísticos	102
Tabela 16 - Comparação entre a Capacidade de retenção de campo imediata para cada um dos polímeros nas concentrações estudadas em solo argiloso, incluindo as médias e seus respectivos grupos estatísticos.	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeção da população mundial até o ano 2100.	18
Figura 2 - Dados de produtividade nacional de áreas produtoras de soja ao longo das últimas décadas.	19
Figura 3 - Dados de produtividade nacional de áreas produtoras de milho ao longo das últimas décadas.....	20
Figura 4 - Precipitação acumulada no Brasil durante o segundo trimestre de (a) 2020; (b) 2021; e (c) 2022.....	22
Figura 5 - Pivô central, uma das estratégias para mitigar os efeitos da irregularidade do regime hídrico atual, instalado em uma área agrícola no Brasil.....	24
Figura 6 - Aparato montado para realização dos ensaios de capacidade de campo dos solos com adição dos polímeros testados.	30
Figura 7 - Microscópio de Força Atômica PICO SPM-LE (Molecular Imaging) utilizado para análises.	33
Figura 8 - 100 sementes tratadas e depositadas no substrato de areia para realização do ensaio de germinação.	36
Figura 9 - Experimento de germinação utilizando areia como substrato no dia de sua implementação.	37
Figura 10 - Caixa de areia no sétimo dia após o estabelecimento do experimento..	37
Figura 11 - Processo de peneiração para segregação do material de interesse (sementes mortas e germinadas) do substrato (areia).....	38
Figura 12 - Material de interesse segregado após peneiração e consequente retirada do substrato.....	39
Figura 13 - Avaliação da massa vegetal de um dos ensaios, através de pesagem em balança portátil previamente tarada.	39
Figura 14 - Aparato posicionado sobre o papel Germitest de modo a permitir o posicionamento ideal das sementes de soja sobre o substrato.	42
Figura 15 - Rolos de papel na incubadora BOD após transcorridos os 7 dias do ensaio proposto.	42
Figura 16 - Sementes de soja mortas e germinadas sobre o papel Germitest após o período de 7 dias de experimento na incubadora BOD.....	43

Figura 17 - Perfil da capacidade de retenção de campo imediata dos três polímeros em estudo, utilizando solo arenoso como substrato.....	46
Figura 18 - Esquematização de possíveis mecanismos de adsorção e aumento da capacidade de retenção de campo em solos condicionados com os polímeros em estudo. Em laranja o grupo iônico do polímero; em cinza os contra-íons do polímero; em marrom está representada a partícula de solo; em azul a carga negativa presente na superfície do substrato. Esquema dividido em A, B e C de forma a representar possíveis conformações assumidas pelos polímeros.....	48
Figura 19 - Perfil da capacidade de retenção de campo imediata dos três polímeros em estudo, utilizando solo argiloso como substrato.....	51
Figura 20 - Perfil da capacidade de retenção de campo após uma semana dos três polímeros em estudo, utilizando solo arenoso como substrato.....	54
Figura 21 - Cinética de adsorção - gráfico de espessura do filme adsorvido pela raiz quadrado do tempo ($h^{1/2}$) para amostras de I a V.....	59
Figura 22 - Cinética de adsorção - gráfico de espessura dos filmes adsorvidos pelo tempo (h) para amostras em solução aquosa (II e IV), além da amostra I.....	60
Figura 23 - Esquematização ilustrando o mecanismo proposto para a adsorção do polímero AgRHO 02 em (a) solução aquosa e (b) solução de força iônica aumentada. Em laranja o grupo iônico do polímero; em verde os ânions oriundos do fertilizante mineral; em cinza os contra-íons do polímero; em marrom está representado o <i>wafér</i> de silício; em azul a carga negativa presente na superfície do substrato, oriunda dos silanóis. Em (a) está destacada em vermelho a região do <i>loop</i> , em amarelo o <i>train</i> , em verde o <i>tail</i> e em roxo a representação da área de superfície não adsorvida devido à repulsão inter e intramolecular entre as moléculas do polímero. A espessura do filme d_{iv} é representada graficamente como maior que a espessura d_{ii} e não inclui a espessura da superfície de SiO ₂	62
Figura 24 - Cinética de adsorção - gráfico de espessura dos filmes adsorvidos pelo tempo (h) para amostras em solução aquosa (III e V), além da amostra I.....	64
Figura 25 - Esquematização ilustrando o mecanismo proposto para a adsorção do polímero AgRHO 03 em (a) solução aquosa e (b) solução de força iônica aumentada. Em laranja o grupo iônico do polímero; em verde os ânions oriundos do fertilizante mineral; em cinza os contra-íons do polímero; em marrom está representado o <i>wafér</i> de silício; em azul a carga negativa presente na superfície do substrato, oriunda dos	

silanóis. Em (b) está destacada em roxo a representação da área de superfície onde o polímero não ancora devido à adsorção competitiva. A espessura do filme d_{III} é representada graficamente como maior que a espessura d_V e não inclui a espessura da superfície de SiO₂.....66

Figura 26 - Imagens topográficas (seção 1 μm x 1 μm) obtidas através de microscopia de força atômica (AFM) para as camadas de polímeros AgRHO 02 e AgRHO 03 adsorvidas na superfície dos wafers de Si/SiO₂, sendo (a) polímero AgRHO 02 em solução aquosa; (b) polímero AgRHO 03 em solução aquosa; (c) polímero AgRHO 02 em solução de fertilizante mineral misto e; (d) polímero AgRHO 03 em solução de fertilizante mineral misto.....67

Figura 27 - Imagens topográficas (seção 5 μm x 5 μm) obtidas através de microscopia de força atômica (AFM) para as camadas de polímeros AgRHO 02 e AgRHO 03 adsorvidas na superfície dos wafers de Si/SiO₂, sendo (a) polímero AgRHO 02 em solução aquosa; (b) polímero AgRHO 03 em solução aquosa; (c) polímero AgRHO 02 em solução de fertilizante mineral misto e; (d) polímero AgRHO 03 em solução de fertilizante mineral misto.....69

Figura 28 - (a) Plantas retiradas das caixas de areia para contagem e classificação entre germinadas normais, anormais e mortas. Em (b) o destaque para as plantas normais (azul), anormais (laranja) e mortas (vermelho).....72

Figura 29 - Retrato do procedimento de contagem de plantas normais, anormais e mortas após a abertura do rolo de papel. Nesta imagem destaca-se a alta contagem de plantas mortas.....76

Figura 30 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o incremento percentual alcançado com a tecnologia em comparação com o branco.....79

Figura 31 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o incremento absoluto alcançado com cada um dos polímeros em estudo, independentemente do modo de aplicação80

Figura 32 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho da tecnologia em estudo em diferentes regimes pluviométricos (versus a condição regular daquela área)82

Figura 33 - Comparação entre três plantas de soja retiradas de área sem tratamento (à esquerda) e com tratamento com a tecnologia em estudo (à direita), evidenciando

melhor desenvolvimento radicular e da parte aérea a partir da aplicação do polímero	84
Figura 34 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho da tecnologia em estudo em diferentes tipos de solo. .	85
Figura 35 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos a partir do incremento percentual alcançado a partir da aplicação do polímero AgRHO 02 através do tratamento de sementes	86
Figura 36 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho do polímero AgRHO 02 em diferentes regimes de chuva.	87
Figura 37 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos a partir do incremento percentual alcançado a partir da aplicação do polímero AgRHO 04 através do tratamento de sementes.	88
Figura 38 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho do polímero AgRHO 04 em diferentes regimes de chuva.	89
Figura 39 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos a partir do incremento percentual alcançado a partir da aplicação do polímero AgRHO 04 através do sulco de plantio.....	91
Figura 40 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho do polímero AgRHO 04 aplicado em sulco de plantio em diferentes regimes de chuva.	92
Figura 41 - Esquematização das etapas de atuação dos polímeros em estudo e como elas levam à maior produtividade de áreas tratadas	93

Sumário

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização	17
1.2 Mudanças climáticas e produtividade	21
1.3 Estresse hídrico	23
1.4 Estratégias para mitigação dos efeitos negativos da irregularidade de suprimento hídrico	23
1.4.1 Pivô Central	23
1.4.2. Polímeros super absorventes.....	24
1.4.3 Avaliação de desempenho de polímeros super absorventes	25
1.4.4 Opções para aplicação de polissacarídeos modificados na agricultura.....	26
2. OBJETIVOS	26
2.1 Objetivos Gerais	26
2.2 Objetivos Específicos	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Materiais	27
3.2 Determinação da capacidade de campo	28
3.3 Determinação da capacidade de campo após saturação prolongada	30
3.4 Determinação de espessura do filme polimérico adsorvido e o seu respectivo perfil de adsorção	31
3.4.1 Espessura do filme polimérico adsorvido	31
3.4.2 Análise do perfil de adsorção dos filmes poliméricos	33
3.5 Ensaio de Germinação	34
3.5.1 Germinação em caixa de areia	34
3.5.2 Germinação em rolo de papel.....	40
3.6 Implementação de ensaios em áreas de teste e comerciais	43
3.6.1 Aplicação dos polímeros no tratamento de sementes	44
3.6.2 Aplicação do polímero no sulco de plantio	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Determinação da capacidade de retenção de campo imediata	45
4.1.1 Solo Arenoso - Capacidade de Retenção de Campo Imediata.....	45
4.1.1.1 Análise Comparativa entre todos os polímeros	46
4.1.2 Solo Argiloso - Capacidade de Retenção de Campo Imediata	50
4.1.2.1 Análise Comparativa entre todos os polímeros	51
4.1.3 Solo Arenoso - Capacidade de Retenção de Campo após uma semana	53
4.1.3.1 Análise Comparativa entre todos os polímeros	54

4.2 Cinética de adsorção dos polímeros sobre wafers de Si/SiO ₂	57
4.3 Perfil de adsorção através microscopia de força atômica	66
4.4 Germinação em caixa de areia	70
4.5 Germinação em rolo de papel	75
4.6 Ensaios práticos em áreas de teste e comerciais.....	78
4.7 Ensaios práticos com aplicação do polímero AgRHO 04 no sulco de plantio.....	90
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
Apêndice A - Comparação estatística entre todos os polímeros estudados no ensaio de capacidade de retenção de campo imediata em solo arenoso.....	101
Apêndice B - Comparação estatística entre todos os polímeros estudados no ensaio de capacidade de retenção de campo imediata em solo argiloso.....	103
Apêndice C - Comparação estatística entre todos os polímeros estudados no ensaio de capacidade de retenção de campo após uma semana em solo arenoso	105

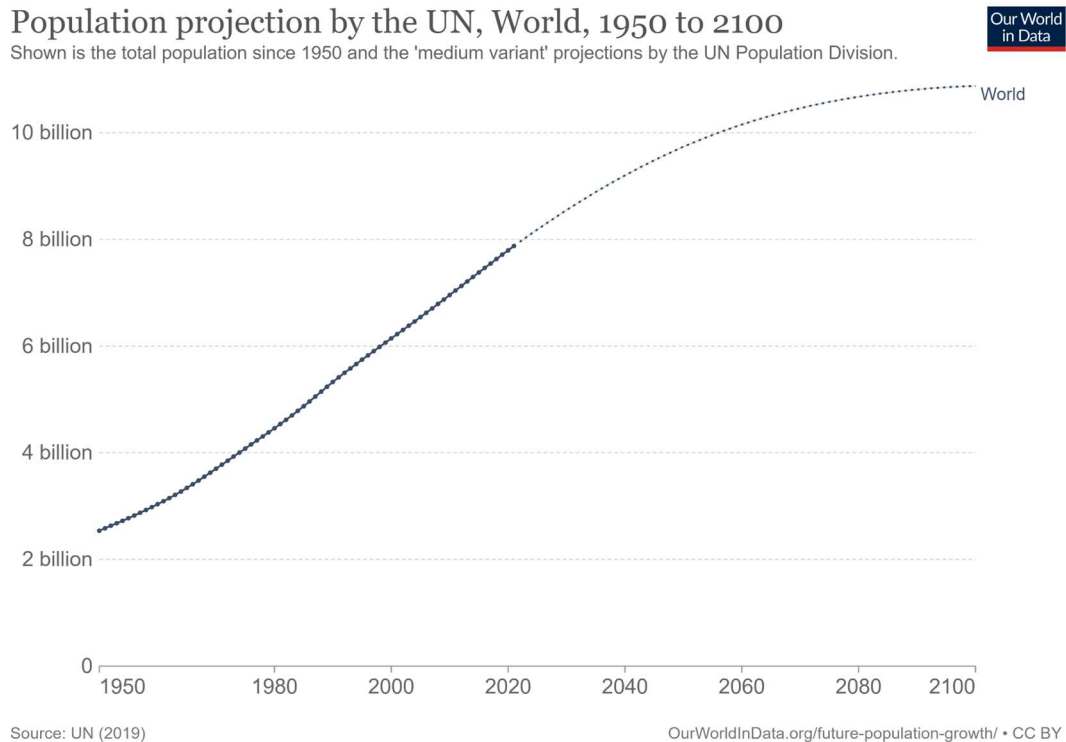
1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O agronegócio ao longo do tempo vem se firmando como um setor essencial para a sociedade brasileira, não somente pelo óbvio resultado da atividade, que é a produção de alimentos, mas também por configurar um pilar da economia nacional. A relevância do agronegócio brasileiro vai além das fronteiras, dada a posição de destaque do país no cenário internacional: em 2020 o Brasil foi o quarto maior produtor mundial de grãos, somente atrás de China, Estados Unidos e Índia, na ordem; e a importância do agro na geração de riquezas é evidenciada pela primeira posição global em valor de exportação em 2020, aproximadamente 37 bilhões de dólares (ARAGÃO; CONTINI, 2021). É também confirmada pela crescente contribuição do agronegócio ao PIB do país: 27,4% do total em 2021, maior valor desde 2004, quando atingiu 27,53% (CEPEA, 2022).

Enquanto o passado e o presente do agronegócio confirmam uma trajetória de crescimento robusto ano após ano, o futuro também indica um cenário otimista para o setor. De acordo com estimativas da Organização das Nações Unidas (2019), a população mundial total chegará a 9,7 bilhões de pessoas em 2050 e atingirá o pico de 10,9 bilhões em 2100, seguido por estabilidade populacional, conforme figura 1. A partir dessa estimativa, é, portanto, projetada uma crescente demanda por alimentos ao longo das próximas décadas.

Figura 1 - Projeção da população mundial até o ano 2100.



Fonte: ROSER (2014)

Tais dados são claros em conferir um grande desafio ao setor: aumentar a produção de alimentos sem aumentar, na mesma proporção, a área plantada. Alcançar o crescimento necessário da produção expandindo proporcionalmente a área plantada significaria, indubitavelmente, o avanço do agronegócio sobre terras nativas e protegidas, o que a longo prazo é uma ação contraproducente contra o próprio setor, dado o reconhecido papel desempenhado por áreas nativas e preservadas na manutenção da biodiversidade, clima, regimes hídricos e, conseqüentemente, na viabilidade produtiva de áreas agricultáveis. A apropriação desenfreada de recursos naturais pelo homem tem o potencial de definir uma trajetória de transformação negativa nos ecossistemas, reduzindo consideravelmente sua capacidade de manter a produção de alimentos, disponibilidade de água doce, florestas nativas, regular clima e a qualidade do ar, além de expor a humanidade a doenças infecciosas (FOLEY et al., 2005).

De fato, o agronegócio no mundo inteiro está sob pressão devido aos impactos causados pela atividade agropecuária, sabidamente: desmatamento de áreas nativas, degradação dos solos e conseqüente impacto negativo em ecossistemas naturais,

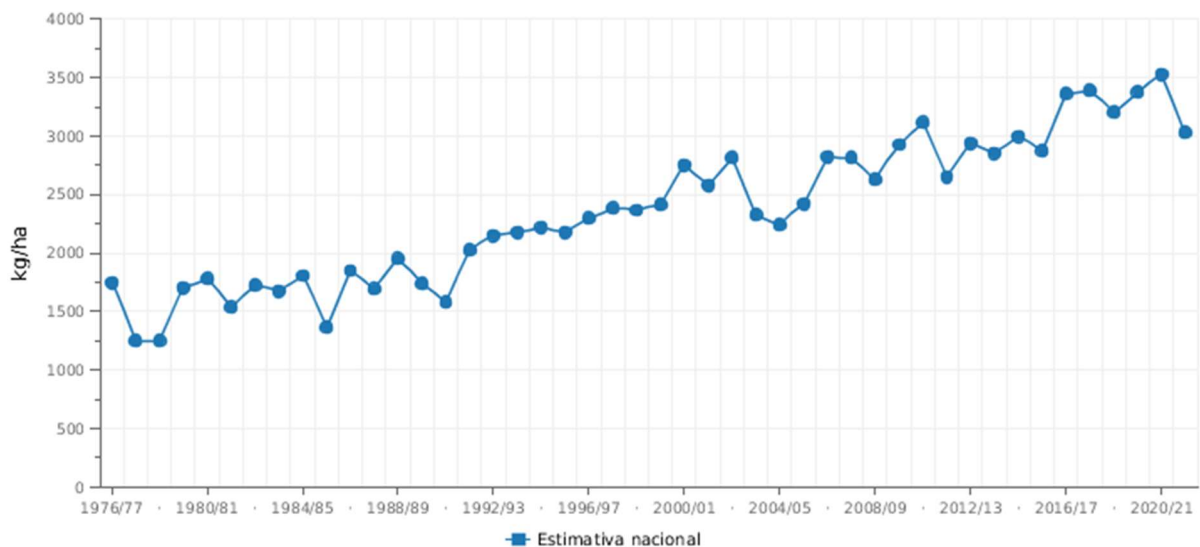
além dos efeitos oriundos de contaminação do meio ambiente através do uso descontrolado de fertilizantes e agroquímicos nas lavouras. Assim, a trajetória da atividade agropecuária deixa uma pegada de carbono já a partir de sua implementação, ao desmatar áreas para instalação de lavouras ou pastagens e também durante a sua existência, como por exemplo a emissão de metano, gás estufa, como resultado da fermentação gástrica de alimentos, que ocorre durante o processo digestivo de bovinos.

Em 2019 o sistema global de produção de alimentos emitiu 16,5 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, respondendo por 31% das emissões antrópicas, sendo o Brasil o terceiro globalmente (TUBIELLO et al., 2022).

Elevar a produtividade sem comprometer os recursos naturais existentes demandará intenso investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para utilização no campo, preferencialmente de perfil sustentável, para que os impactos sejam reduzidos e a atividade possa seguir uma trajetória de redução de seus efeitos negativos no ambiente.

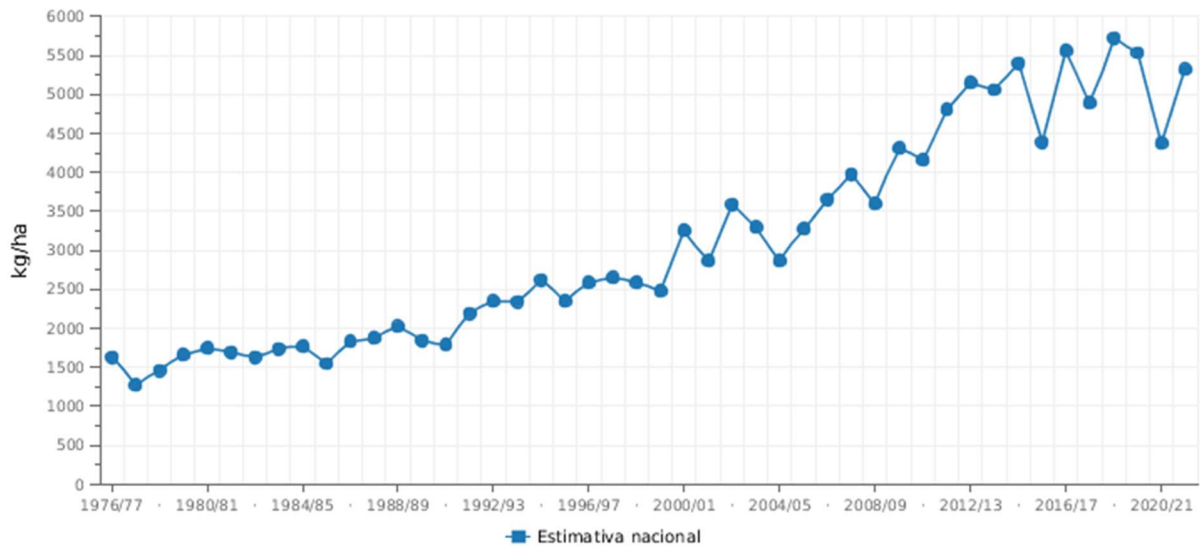
O histórico da agricultura no Brasil mostra como a disponibilização de novas tecnologias aos agricultores permitiu a esse setor atingir níveis outrora inimagináveis de produtividade. As figuras 2 e 3 mostram a evolução da produtividade nacional para dois dos principais produtos agrícolas: soja e milho, respectivamente.

Figura 2 - Dados de produtividade nacional de áreas produtoras de soja ao longo das últimas décadas.



Fonte: CONAB (2022)

Figura 3 - Dados de produtividade nacional de áreas produtoras de milho ao longo das últimas décadas.



Fonte: CONAB (2022)

Os dados mostram que a produtividade média das áreas de soja saltou aproximadamente 74% entre a safra 1976/77 e a safra 2021/22, alcançando 3,0 toneladas por hectare. De forma ainda mais pronunciada, a produtividade média das áreas de milho aumentou aproximadamente 226% no mesmo período, alcançando em torno de 5,3 toneladas por hectare ("Conab - Portal de Informações Agropecuárias", 2022).

Tamanho melhora no aproveitamento das áreas plantadas só foi possível a partir da pesquisa e utilização de novas tecnologias. Não por acaso, ao longo das últimas décadas os agricultores passaram a ter diversas ferramentas à sua disposição, desde técnicas de irrigação avançadas, maquinários agrícolas para mecanização e automação do funcionamento das lavouras até produtos químicos e biológicos capazes de elevar a produtividade ao proteger a lavoura de ataques de agentes externos bióticos ou abióticos. Dentre os produtos químicos e biológicos se destacam os fertilizantes químicos e defensivos agrícolas, como inseticidas, herbicidas, fungicidas, nematicidas, entre outros.

Além de evidenciar o aumento da produtividade média ao longo dos anos para os grãos apresentados, as figuras 2 e 3 mostram que o crescimento não é linear e constante ao longo do tempo. A produção em kg por hectare cai por diversas vezes na série histórica quando comparada à safra imediatamente anterior, potencialmente como resultado de fatores climáticos adversos.

1.2 Mudanças climáticas e produtividade

Mudanças climáticas oriundas do agravamento do efeito estufa e consequente elevação da temperatura média do planeta são fatos preocupantes quando analisados sob diversas óticas, sendo que sob a ótica da agricultura não é diferente. A disponibilidade de água e, conseqüentemente, sua escassez está diretamente relacionada ao desempenho da produção agrícola em campos agricultáveis ao redor do mundo (VALLINO; RIDOLFI; LAIO, 2020).

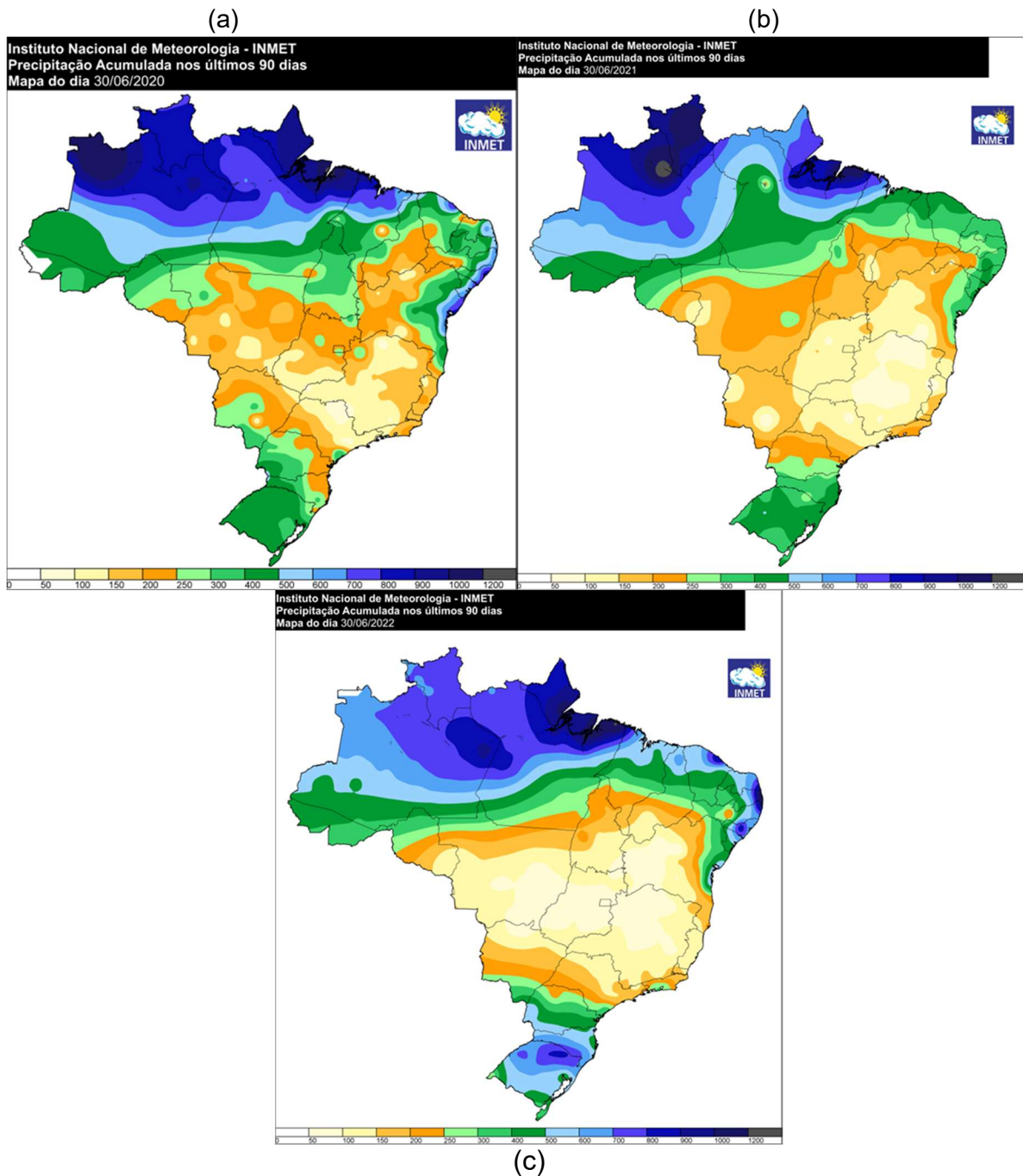
Dada a elevada relevância dos regimes hídricos na manutenção da adequada oferta de alimentos ao redor do mundo, Wang *et al.* (2018) pesquisou a tendência de redução de disponibilidade hídrica nas áreas agricultáveis produtoras de grãos globalmente e seus achados confirmam uma tendência de diminuição de disponibilidade de água, com eventos extremos ocorrendo com cada vez mais frequência e maior severidade como consequência do aquecimento global, com impacto mais pronunciado em nações subdesenvolvidas, que possuem menos acesso à tecnologias mitigadoras. Para exemplificar, altas temperaturas durante o ciclo de desenvolvimento de culturas de soja e milho induzem uma condição de estresse hídrico e causam diminuição diária de produtividade de até 6% quando as lavouras são expostas a temperaturas superiores a 30°C (SCHAUBERGER *et al.*, 2017).

De fato, a agricultura é uma indústria à céu aberto, com sua boa produtividade intimamente ligada com condições ambientais adequadas ao desenvolvimento de vida vegetal ou animal, de forma que qualquer deslocamento para os extremos de condições leva à problemas produtivos que não estão ligados apenas à lucratividade dessa indústria, mas também à segurança alimentar global.

Resta óbvio que o Brasil não está ileso aos efeitos deletérios do aquecimento global e variação de regime hídrico na sua produção agropecuária total. O resultado do PIB agropecuário brasileiro do primeiro trimestre de 2022 coloca em evidência essa situação: houve recuo de 8% em comparação com o mesmo período de 2021. Este resultado foi consequência direta da falta de chuvas no Mato Grosso do Sul e região Sul do país, que enfrentaram situação dramática de estiagem, causando um decréscimo de produção ao redor de 12% na sua principal *commodity*, a soja ("Falta de chuva em várias regiões do país compromete o resultado das safras do começo de 2022", 2022). Ao longo das últimas safras foi consideravelmente recorrente a ocorrência de longos períodos de estiagem nas mais diversas regiões do país, fato

que impõe às lavouras uma condição de estresse hídrico que fatalmente ocasiona perdas produtivas. A figura 4 apresenta o nível de precipitação acumulado no Brasil durante o segundo trimestre dos anos de 2020, 2021 e 2022, a partir dos dados oficiais divulgados pelo Instituto Nacional de Meteorologia ("INMET Tempo", 2022).

Figura 4 - Precipitação acumulada no Brasil durante o segundo trimestre de (a) 2020; (b) 2021; e (c) 2022.



Fonte: "INMET Tempo" (2022)

Os dados apresentados na Figura 4 evidenciam essa irregularidade do regime pluviométrico no país, sobretudo nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, sendo que a região Centro-Oeste é a principal região produtora de grãos a nível nacional. Ou seja, chuvas irregulares e suas consequências já são uma realidade a ser enfrentada no Brasil atual. É de extrema importância que novas tecnologias sejam pesquisadas, desenvolvidas e disponibilizadas ao produtor agrícola nacional de forma a prover ferramentas que permitam um melhor gerenciamento de crise, quando essa ocorrer.

1.3 Estresse hídrico

Condições de estresse hídrico são aquelas nas quais as plantas estão submetidas a um cenário de excesso ou falta de água (estiagem) em relação às condições ideais para o seu adequado desenvolvimento. Estresse hídrico causado por alterações no regime pluviométrico através de chuvas irregulares, insuficientes ou inexistentes são os mais comuns de ocorrerem em áreas agrícolas e tem o maior potencial deletério sobre a qualidade da colheita (MAHAJAN TUTEJA, 2005). Escassez de água afeta diretamente os processos fisiológicos vitais das plantas, uma vez que há quantidade insuficiente de água disponível para a manutenção do processo de respiração e fotossíntese, além de impactar a homeostase vegetal (RANE et al., 2022). Comumente uma situação de estiagem ocorre em consonância com aumento de temperatura média na região, acelerando o processo de perda de água dos vegetais através de evapotranspiração e comprometendo, em última instância, a produtividade da lavoura afetada (COSTA DE OLIVEIRA; MARINI FARIAS, 2014).

1.4 Estratégias para mitigação dos efeitos negativos da irregularidade de suprimento hídrico

1.4.1 Pivô Central

Os produtores rurais lançam mão de algumas estratégias para minimizar os impactos da irregularidade do regime pluviométrico, se destacando entre elas a implantação de pivô central nas suas áreas, tecnologia que permite aumento de produtividade devido à regularidade de suprimento hídrico e maior janela de produção possível. Em 2020 o Brasil possuía uma área superior a 1,6 milhões de hectares irrigada por sistemas pivô (GUIMARÃES; LANDAU, 2020), caracterizando um setor de franco crescimento. Porém, a implantação de tal estrutura demanda um elevado investimento e custos de

manutenção, além de localização próxima aos corpos d'água de onde a água será retirada. Portanto, ainda há exposição, ainda que menor, às condições climáticas da região, pois longos períodos de estiagem podem levar ao colapso do corpo hídrico que alimenta aquela área. A figura 5 apresenta um esquema de pivô central implantado em uma área agrícola no Brasil (LANDAU, 2021).

Figura 5 - Pivô central, uma das estratégias para mitigar os efeitos da irregularidade do regime hídrico atual, instalado em uma área agrícola no Brasil.



Fonte: LANDAU (2021)

1.4.2. Polímeros super absorventes

Polímeros super absorventes têm sido estudados com o objetivo de aplicá-los na agricultura como ferramenta para melhorar a eficiência de uso da água das lavouras. Estes polímeros são macromoléculas de origem natural ou sintética que atraem atenção devido à sua capacidade de reter grandes quantidades de água no interior de suas estruturas tridimensionais, o que pode representar um melhor gerenciamento hídrico quando aplicado no solo, reduzindo perdas de água por percolação e/ou evaporação.

Na área de polímeros super absorventes sintéticos, as poliácridamidas modificadas são um dos mais utilizados em pesquisa e aplicações agrícolas (KIM et al., 2010), porém apresentam desafios importantes relacionados à sua acumulação no solo devido ao seu perfil não-biodegradável, fato que se contrapõe à sua alta capacidade de retenção hídrica e baixo custo (RODRIGUES SOUSA et al., 2021). Neste cenário, os polímeros de origem natural surgem como opções com perfil biodegradável atraente, excelente biocompatibilidade e com potencial de aplicação na agricultura, porém a baixa capacidade de retenção e consequente alta dosagem requerida são empecilhos importante à sua utilização em larga escala (CHANG et al., 2021)

Dado este contexto, surge a necessidade de pesquisa em relação à utilização de polímeros naturais modificados quimicamente de forma a possibilitar um aumento de sua capacidade de retenção hídrica, sem que haja comprometimento de seu ótimo perfil de biocompatibilidade e de biodegradabilidade, que os classificam como uma solução sustentável.

Modificações químicas em polissacarídeos demonstram potencial de alcançar resultados importantes na agricultura e serão explorados neste trabalho.

1.4.3 Avaliação de desempenho de polímeros super absorventes

O desempenho dos polímeros super absorventes pode ser avaliado a partir da determinação da capacidade de campo de solos condicionados com este material. A capacidade de campo pode ser definida como o limite superior de retenção hídrica de um determinado solo, após saturação e drenagem por gravidade (BERNARDO; MANTOVANI; SOARES, 2009). Essa água retida no solo após saturação e drenagem é aquela disponível para absorção pelas plantas, portanto ao elevar a capacidade de campo do solo, é possível aumentar a quantidade de água disponível às plantas através de suas raízes.

A capacidade de campo pode ser determinada a partir da equação 1, onde CC é a capacidade de campo, ma é a quantidade de água retida no solo após percolação gravitacional e ms é a massa de solo inicial submetida ao teste.

$$CC = ma \div ms \times 100\% \quad (1)$$

1.4.4 Opções para aplicação de polissacarídeos modificados na agricultura

As diversas tecnologias disponíveis e aplicadas na agricultura atualmente são levadas às lavouras através de diferentes métodos de aplicação, se destacando a aplicação via tratamento de sementes e sulco de plantio.

No tratamento de sementes, as tecnologias a serem incorporadas são misturadas de forma a compor uma calda de aplicação e são aplicadas sobre as sementes através de um equipamento específico de tratamento que funciona por fluxo contínuo ou batelada. Embora seja um método robusto e bastante utilizado no país, ele apresenta um limite técnico de aplicação de calda, restringindo a quantidade de produtos/tecnologias que podem ser adotados em um mesmo tratamento.

Já na aplicação via sulco de plantio, os produtos são aplicados no local onde a semente será semeada, permitindo uma aplicação precisa e com perdas reduzidas, além de reduzir o risco de dano físico às sementes, fato presente no tratamento de sementes descrito anteriormente. A adoção a este método de aplicação tem crescido no Brasil, cobrindo áreas cada vez maiores ao longo dos anos.

Ambos os métodos são seguros e eficientes em levar as mais diversas tecnologias ao campo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar o desempenho agrônômico de polímeros naturais modificados quando aplicados em solos com diferentes teores de argila e seu potencial de utilização como gerenciador hídrico, sobretudo em situações de estresse abiótico por limitação de água.

Elucidar o mecanismo de atuação desta tecnologia à luz dos potenciais benefícios conferidos às plantas nos estágios iniciais de seu desenvolvimento.

2.2 Objetivos Específicos

Quantificar a retenção hídrica de solos tratados com os polímeros estudados.

A partir das características físico-químicas dos polímeros e de estudo dos polímeros adsorvidos em superfície mimetizante, propor mecanismo pelo qual os materiais estudados favorecem a retenção de água em condições reais.






Agrupar e analisar resultados práticos obtidos a campo a partir da aplicação da tecnologia estudada e buscar correlação entre a produtividade final alcançada com parâmetros controlados do momento da aplicação e desenvolvimento da lavoura.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Dados relevantes dos materiais utilizados nos ensaios descritos na sequência estão apresentados na Tabela 1. A tabela contém informações sobre a descrição química, massa molar relativa entre os polímeros, grau de substituição relativo, estado físico, fornecedor e uma representação gráfica que será utilizada ao longo do trabalho para facilitar a leitura.

Tabela 1 - Dados detalhados sobre os materiais utilizados no estudo.

Material	Descrição	Massa Molar Relativa	Grau de Substituição Relativo	Estado Físico	Fabricante
AgRHO 01 	Polissacarídeo natural sem modificação química	180.000	Zero	Sólido	Solvay
AgRHO 02 	Polissacarídeo natural modificado com grupo catiônico	200.000	1,00	Sólido	Solvay
AgRHO 03 	Polissacarídeo natural modificado com grupo catiônico	1	1,25	Sólido	Solvay
AgRHO 04 	Formulação do polissacarídeo AgRHO 03 a 25% de ativos com ingredientes inertes para estabilização da fórmula	1	1,25	Líquido	Solvay
NPK 10:10:10 	Solução de fertilizante mineral misto	N/A	N/A	Líquido	West Garden

Fonte: Do autor (2022)

3.2 Determinação da capacidade de campo

Amostras de solo argiloso e arenoso foram obtidas através de doação da empresa Campo Verde Pesquisas Agronômicas e retiradas de uma área de pesquisa na região de Piracicaba, interior do estado de São Paulo. Tais amostras de solo foram escolhidas para o trabalho com o objetivo de estudar os polímeros aplicados sob os dois principais tipos de solo, com características distintas e antagônicas entre si em relação ao teor de argila, areia e granularidade. As amostras foram peneiradas e submetidas à secagem sob o sol por 4 h cada. Antes de submetidas ao ensaio de

determinação de capacidade de campo a umidade residual foi determinada através de método termogravimétrico a 105 °C em estufa até massa constante.

Testes preliminares com o procedimento proposto indicaram que o método é reprodutível com os polímeros em estado sólido, ao passo que aqueles em estado líquido inviabilizam o ensaio devido à dificuldade de homogeneização. Assim, os polímeros AgRHO 01 , AgRHO 02 e AgRHO 03 foram submetidos ao ensaio.

Amostras de massa conhecida de solo foram tratadas com quantidades dos polímeros sólidos em estudo de forma a atingir as concentrações desejadas: 0 (branco), 100, 400, 700 e 1000 ppm. As análises foram realizadas em triplicata para cada concentração.

O aparato apresentado na figura 6 foi montado para realizar o ensaio de determinação de capacidade de campo, sob temperatura ambiente devidamente registrada. Neste aparato o solo tratado foi adicionado a um recipiente vazado em sua extremidade inferior e recebeu a adição de quantidade de água de massa conhecida, 1:1 em relação à massa de solo, de forma a simular uma situação de precipitação e/ou irrigação até atingir a saturação. Após receber a água, o sistema foi deixado em repouso por aproximadamente 90 minutos de forma a permitir à água adicionada percolar e drenar completamente por ação da gravidade, até que o equilíbrio fosse atingido. A solução percolante foi então coletada em proveta para determinação de massa drenada, pH e condutividade da solução. Por balanço de massa foi obtida a quantidade de água retida no solo e, a partir daí, foi determinada a capacidade de campo daquele solo, tratado ou não.

Figura 6 - Aparato montado para realização dos ensaios de capacidade de campo dos solos com adição dos polímeros testados.



Fonte: Do autor (2020)

Os resultados, previamente ajustados pela umidade residual do solo antes do ensaio, foram tratados em Microsoft Excel 2013 e submetidos à análise estatística utilizando o software SASM-Agri (CANTERI et al., 2001).

3.3 Determinação da capacidade de campo após saturação prolongada

Amostras de solo argiloso e arenoso previamente peneiradas e submetidas à secagem sob o sol por 4 h tiveram sua umidade residual determinada através de método termogravimétrico a 105°C em estufa até massa constante. De forma semelhante ao método descrito anteriormente, somente os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 foram submetidos a este ensaio. Amostras de massa conhecida de solo foram tratadas com quantidades dos polímeros sólidos em estudo de forma a atingir a concentração desejada, com análises realizadas em triplicata para cada concentração (0, 100, 400, 700 e 1000 ppm).

O mesmo aparato apresentado na Figura 6 foi montado, porém, ao contrário do procedimento anterior, a amostra de solo tratado foi colocada em recipiente sem perfurações na extremidade inferior e recebeu a adição de quantidade de água com massa conhecida, 1:1 em relação à massa de solo. Esse sistema solo + água foi pesado e mantido em repouso em recipiente vedado por 7 dias sob temperatura

ambiente. No sétimo dia o sistema foi pesado e a totalidade do conteúdo foi transferida quantitativamente para um recipiente vazado em sua extremidade inferior de maneira a permitir a percolação e drenagem completa por ação da gravidade, até que o equilíbrio fosse alcançado. Similarmente, a solução percolante foi coletada em proveta para determinação de massa drenada, pH e condutividade da solução. Por balanço de massa foi obtida a quantidade de água retida no solo e, a partir daí, foi determinada a capacidade de campo daquele solo, tratado ou não.

Os resultados, previamente ajustados pela umidade residual do solo antes do ensaio e perdas por evaporação, foram tratados em Microsoft Excel 2013 e submetidos à análise estatística utilizando o software SASM-Agri (CANTERI et al., 2001).






3.4 Determinação de espessura do filme polimérico adsorvido e o seu respectivo perfil de adsorção

3.4.1 Espessura do filme polimérico adsorvido

A técnica de elipsometria foi escolhida para determinação da espessura (D) do filme polimérico adsorvido ao longo do tempo sob uma superfície de Si/SiO₂ e o seu respectivo perfil de adsorção. A superfície de lâminas de Si/SiO₂ é plana e tem composição química semelhante às de partículas inorgânicas do solo. Para tal foi utilizado o elipsômetro vertical DRE-EL02 (Ratzeburg, Alemanha), operando com ângulo de incidência a 70,0° e no comprimento de onda λ de 632,8 nm (laser He-Ne). Para este estudo foi assumido um modelo multicamada composto pelo substrato, camada de polissacarídeo e o meio. A partir deste modelo é possível calcular os valores de espessura (D) e índice de refração (n), uma vez determinados os ângulos elipsométricos Ψ e Δ . A primeira etapa consistiu em determinar a espessura da camada de Si/SiO₂, considerando que a camada imediatamente anterior, de Si, é infinita e que o índice de refração do meio (ar) é igual a 1,00. Para a camada de SiO₂, foi adotado o índice de refração, n, de 1,462, levando ao valor de D para esta camada de $(2,0 \pm 0,1)$ nm a partir de uma medida em triplicata. Já o índice de refração para os polissacarídeos foi definido em 1,50, permitindo o cálculo da espessura de sua camada a partir de medidas em duplicata de duas seções diferentes de cada *wafers*, visando alcançar uma média de espessura (D), uma vez que diferentes padrões de adsorção e, conseqüentemente topografia, podem ser formados.

Optou-se por estudar os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 03 a 1 g/L na ausência e na presença de solução salina de NPK diluído a 1:1000, conforme apresentado na Tabela 2. Estas concentrações foram definidas com base na viabilidade de aplicação em situação real à campo e também de forma de otimizar a resposta ao ensaio.

Tabela 2 - Soluções preparadas para ensaio de elipsometria.

Amostra	Composição	Representação gráfica
I	NPK, 100 mmol/L	
II	AgRHO 02, 1 g/L	
III	AgRHO 03, 1 g/L	
IV	AgRHO 02, 1 g/L + NPK 100 mmol/L	
V	AgRHO 03, 1 g/L + NPK 100 mmol/L	

Fonte: Do Autor (2022)

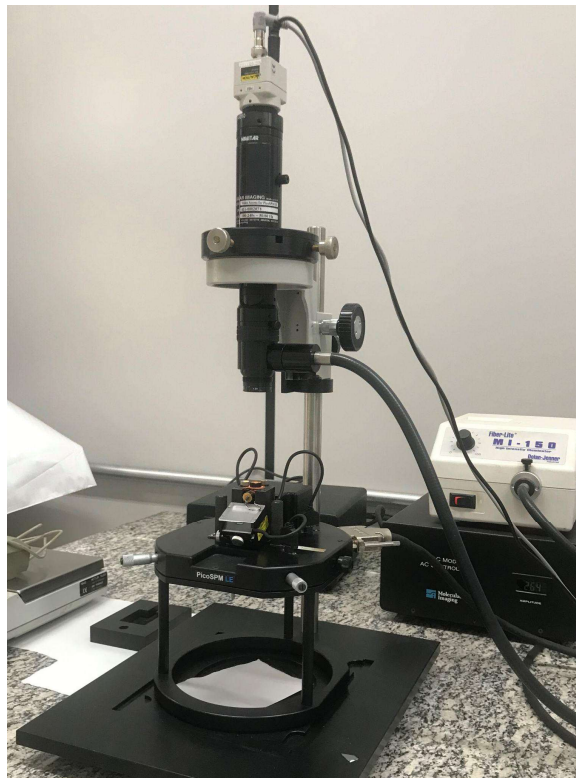
Os *wafers* de Si/SiO₂ foram mergulhados nas soluções de estudo apresentadas na tabela 2 e mantidos imersos na solução, em repouso, pelos seguintes intervalos, em horas: 0,017; 1,25; 1,75; 73,75; 121,75 e 169,75. Ao atingir o tempo de cada um dos intervalos de imersão, os *wafers* foram retirados, lavados com água MilliQ, secos com jato de N₂ e submetidos à medição no elipsômetro para obtenção de *D*. Os dados de espessura dos filmes foram registrados e tratados utilizando Microsoft Excel 2013.

Uma das características da elipsometria é ser uma técnica não destrutiva (CARVALHO, 2016), ou seja, a medida é obtida sem que o objeto em estudo seja degradado. Valendo-se dessa característica e com o objetivo de compreender o padrão de formação de filme das amostras de polissacarídeos testados, bem como a sua topografia, os *wafers* de Si/SiO₂ foram submetidos à técnica de Microscopia de Força Atômica, AFM da sigla em inglês.

3.4.2 Análise do perfil de adsorção dos filmes poliméricos

As análises de Microscopia de Força Atômica foram realizadas em temperatura controlada (22 ± 1)°C utilizando os *wafers* oriundos da técnica de elipsometria após finalização das medidas, ou seja, após imersão nas soluções de estudo por 169,75 h. O equipamento utilizado foi o microscópio PICO SPM-LE (Molecular Imaging), conforme apresentado na figura 7, no modo de contato intermitente, ao passo que as imagens foram processadas através do software Pico Scan. Foram utilizados substratos de silicone e a frequência de ressonância próxima a 300 kHz. Áreas de $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ dos *wafers* com soluções das amostras I a V foram escaneadas com uma resolução de 512×512 pixels. Além disso, um *wafer* de Si sem tratamento foi submetido à análise para servir como referência comparativa.

Figura 7 - Microscópio de Força Atômica PICO SPM-LE (Molecular Imaging) utilizado para análises.



Fonte: Do Autor (2021)




3.5 Ensaio de Germinação

3.5.1 Germinação em caixa de areia

Sementes de soja tratadas industrialmente (TSI – tratamento de sementes industrial), da marca Sementes Boa Nova foram submetidas a ensaios de germinação em caixa de areia seguindo o procedimento descrito na literatura (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009), com o objetivo de avaliar o desempenho de germinação sob condições hídricas normais e sob estresse hídrico, implementado através de restrição hídrica de 30% em relação ao controle. O ensaio foi estabelecido em uma área rural na cidade de Rolândia, Paraná, nas dependências da DSchultz Consultoria Agronômica.

Foram estudados os polímeros tanto na sua versão líquida quanto pó, conforme a Tabela 3 apresentada a seguir. As sementes de soja com tratamento industrial receberam um tratamento adicional de forma a promover a aderência dos polímeros em estudo de forma satisfatória e homogênea. Este tratamento adicional compreendeu a formulação de uma calda de aplicação composta por água potável a uma dosagem de 4,5 mL a cada 0,5 kg de semente tratada. Com isso, permitiu-se a aderência e o recobrimento das sementes tanto com os polímeros líquidos quanto com os pós. Os tratamentos implementados totalizaram 8 experimentos em caixa de areia, cada caixa com 100 sementes plantadas, sendo cada experimento realizado em triplicata. O local utilizado foi uma área coberta dedicada a este tipo de estudo, com monitoramento de condições climáticas.

Tabela 3 - Listagem dos polímeros e respectivo protocolo adotado no ensaio de germinação em caixa de areia.

Tratamento	Polímero	Representação Gráfica	Restrição Hídrica	Tipo de Ensaio	Dosagem Polímero
1	Branco		0%	Caixa de Areia	N/A
3	Branco		30%	Caixa de Areia	N/A
5	AgRHO 04		0%	Caixa de Areia	4 mL/kg semente
7	AgRHO 04		30%	Caixa de Areia	4 mL/kg semente
9	AgRHO 02		0%	Caixa de Areia	4 g/kg semente
11	AgRHO 02		30%	Caixa de Areia	4 g/kg semente
13	AgRHO 01		0%	Caixa de Areia	4 g/kg semente
15	AgRHO 01		30%	Caixa de Areia	4 g/kg semente

Fonte: Do autor (2022)

Bandejas plásticas foram utilizadas para acomodar o experimento, às quais foram adicionados 4,0 kg de areia, sendo 3,5 kg pré-semeadura e 0,5 kg pós-semeadura de modo a garantir a cobertura das sementes. Na figura 8 é possível visualizar um dos ensaios com 100 sementes tratadas depositadas na caixa de areia, a serem submetidas à cobertura com 0,5 kg de substrato. Notar que o espaçamento entre sementes foi definido como 1 cm (mínimo) de forma a gerar espaço adequado para a germinação. Uma vez que o ensaio teve duração de 7 dias, este espaçamento foi suficiente, pois não há competição entre as plantas neste período inicial.

Conforme preconizado na literatura técnica nacional (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009), a areia foi umedecida até atingir 60% de sua capacidade de retenção original, que fora determinada previamente ao estabelecimento do ensaio, totalizando 576 mL de água a cada 4,0 kg de areia. Os ensaios com restrição hídrica tiveram a quantidade de água inicial reduzida a 400 mL, configurando restrição em torno de 30%.

Os ensaios ficaram estabelecidos por 7 dias, com irrigação diária de 200 mL nos ensaios sem restrição hídrica e 140 mL nos ensaios onde a restrição hídrica foi estudada. A figura 9 mostra o experimento no mesmo dia que foi implementado.

Figura 8 - 100 sementes tratadas e depositadas no substrato de areia para realização do ensaio de germinação.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 9 - Experimento de germinação utilizando areia como substrato no dia de sua implementação.



Fonte: Do autor (2022)

Percorridos os 7 dias de ensaio, as caixas de areia foram retiradas do ambiente do ensaio e submetidas à peneiração de forma a segregar o material em estudo: plantas e sementes que porventura não tenham vingado, conforme figuras 10 e 11 .

Figura 10 - Caixa de areia no sétimo dia após o estabelecimento do experimento.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 11 - Processo de peneiração para segregação do material de interesse (sementes mortas e germinadas) do substrato (areia).



Fonte: Do autor (2022)

O conteúdo retido na peneira foi segregado (figura 12) e submetido às análises com o objetivo de avaliar a massa vegetal, através de pesagem em balança portátil utilizando béquer tarado (figura 13) e contagem de germinação total, plantas mortas, anormais e normais.

Figura 12 - Material de interesse segregado após peneiração e consequente retirada do substrato.



Fonte: Do autor (2022)

Figura 13 - Avaliação da massa vegetal de um dos ensaios, através de pesagem em balança portátil previamente tarada.






Fonte: Do autor (2022)

Os resultados obtidos foram tabelados utilizando Microsoft Excel 2013 e a análise estatística realizada no SASM-Agri (CANTERI et al., 2001).

3.5.2 Germinação em rolo de papel

Sementes de soja de mesma origem daquelas utilizadas no experimento em caixa de areia foram utilizadas no ensaio em folha de papel. Como substrato para este ensaio foi utilizado o papel Germitest, umedecido a três vezes o seu próprio peso, conforme literatura técnica nacional (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009). Determinou-se que a massa do papel Germitest é de 22,2g, demandando então aproximadamente 67 mL de água por rolo. De maneira similar ao ensaio anterior, 8 tratamentos diferentes foram realizados, conforme apresentado na tabela 4. Cada tratamento teve 6 repetições, ao passo que cada rolo de papel foi preparado com 50 sementes. Aqueles tratamentos com restrição hídrica de 30% receberam 47 mL de água.

Tabela 4 - Listagem dos polímeros e respectivo protocolo adotado no ensaio de germinação em rolo de papel.

Tratamento	Polímero	Representação Gráfica	Restrição Hídrica	Tipo de Ensaio	Dosagem Polímero
2	Branco		0%	Rolo de Papel	N/A
4	Branco		30%	Rolo de Papel	N/A
6	AgRHO 04		0%	Rolo de Papel	4 mL/kg semente
8	AgRHO 04		30%	Rolo de Papel	4 mL/kg semente
10	AgRHO 02		0%	Rolo de Papel	4 g/kg semente
12	AgRHO 02		30%	Rolo de Papel	4 g/kg semente
14	AgRHO 01		0%	Rolo de Papel	4 g/kg semente
16	AgRHO 01		30%	Rolo de Papel	4 g/kg semente

Fonte: Do autor (2022)

Neste ensaio, de forma idêntica ao anterior, foi formulada uma calda de aplicação de 4,5 mL de água por 0,5 kg de semente, de forma a permitir recobrimento adequado e homogêneo das sementes indiferentemente se utilizado polímero na forma pó ou líquida.

As sementes tratadas são posicionadas sobre o rolo de papel Germitest previamente umedecido utilizando um aparato específico conforme apresentado na figura 14, garantindo espaçamento adequado entre elas. Após, uma nova camada de papel Germitest é posicionada sobre as sementes e umedecida com a respectiva quantidade de água através de pulverização.

Figura 14 - Aparato posicionado sobre o papel Germitest de modo a permitir o posicionamento ideal das sementes de soja sobre o substrato.



Fonte: Do autor (2022)

A amostra é finalizada através da formação de rolos do sistema papel Germitest + sementes e colocação em uma estufa BOD, como pode ser verificado na figura 15, também conhecida como incubadora BOD, onde o sistema fica armazenado sob condições controladas por 7 dias.

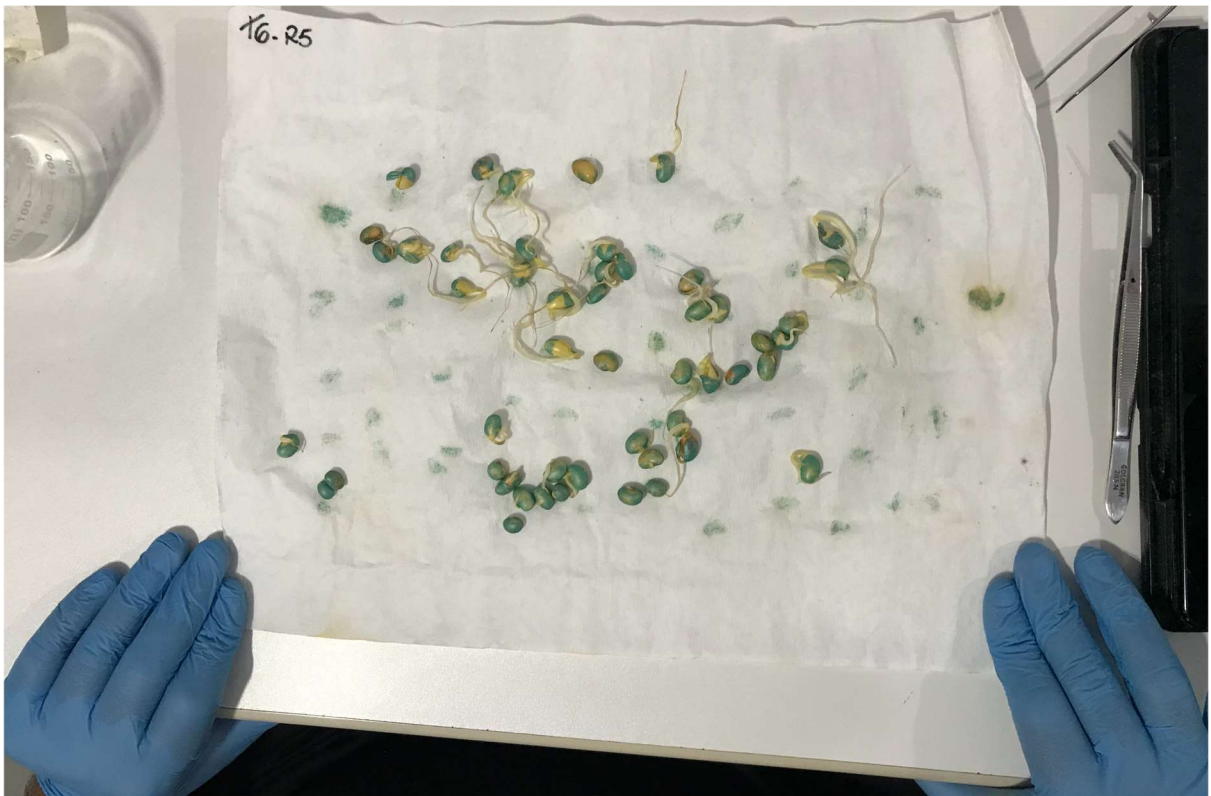
Figura 15 - Rolos de papel na incubadora BOD após transcorridos os 7 dias do ensaio proposto.



Fonte: Do autor (2022)

Ao final dos 7 dias os rolos são desfeitos e é realizada a contagem das plantas seguindo a classificação entre normais, anormais e mortas, além da contagem de germinação total e massa vegetal total, através da pesagem em balança portátil. A figura 16 mostra o ensaio após abertura do rolo e previamente à contagem de plantas descrita.

Figura 16 - Sementes de soja mortas e germinadas sobre o papel Germitest após o período de 7 dias de experimento na incubadora BOD.



Fonte: Do autor (2022)

Os resultados obtidos foram tabulados utilizando Microsoft Excel 2013 e a análise estatística realizada no SASM-Agri (CANTERI et al., 2001).

3.6 Implementação de ensaios em áreas de teste e comerciais

A tecnologia dos polímeros aqui estudados foi testada em campo, a céu aberto, em áreas demonstrativas e comerciais por três safras de soja. Essas áreas foram implementadas ao redor do Brasil, em culturas de soja, com média de tamanho de área de 20 hectares.

3.6.1 Aplicação dos polímeros no tratamento de sementes

Os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 foram aplicados no tratamento de sementes de soja, *on-farm*, com equipamento tratador de sementes de fluxo contínuo ou por batelada a uma dosagem de 4 g/kg de semente e 4 mL/kg de semente, respectivamente para os polímeros pó e líquidos. Ressalta-se que o tratamento foi realizado com o AgRHO 02 ou AgRHO 04 e nunca com ambos juntos para uma mesma área. O tratamento de sementes com os polímeros foi realizado em conjunto ou separado com os outros químicos, a depender da estrutura da fazenda onde a semeadura foi realizada.

As áreas foram implementadas sempre lado a lado com uma área controle, onde as sementes semeadas receberam somente o tratamento padrão da fazenda, sem utilização dos polímeros. Essas áreas foram acompanhadas durante todo o ciclo da cultura e foram classificadas em relação ao índice pluviométrico ao longo do ciclo em comparação com o padrão daquela região. Dessa forma, as áreas foram divididas em: baixo nível de chuva, índice de chuva normal e elevado índice de chuva. Ao final do ciclo as áreas foram colhidas separadamente e as respectivas produtividades foram calculadas e comparadas com as áreas controle.

Os resultados de produtividade obtidos foram compilados em Microsoft Excel 2013 e foram tratados estatisticamente no MiniTab 20.

3.6.2 Aplicação do polímero no sulco de plantio

O polímero AgRHO 04 foi aplicado no sulco de plantio de áreas de semente de soja, geralmente junto do inoculante, visando estudar uma nova modalidade de aplicação. Devido a dificuldades operacionais, a versão pó da tecnologia não foi testada neste caso.

As áreas foram implementadas sempre lado a lado com uma área controle, onde as sementes semeadas receberam somente o tratamento padrão da fazenda, sem utilização do polímero. Essas áreas foram acompanhadas durante todo o ciclo da cultura e foram classificadas em relação ao índice pluviométrico ao longo do ciclo em comparação com o padrão daquela região. Dessa forma, as áreas foram divididas em: baixo nível de chuva, índice de chuva normal e elevado índice de chuva. Ao final do ciclo as áreas foram colhidas separadamente e as respectivas produtividades foram calculadas e comparadas com as áreas controle.

Os resultados de stand e produtividade obtidos foram compilados em Microsoft Excel 2013 e foram tratados estatisticamente no MiniTab 20.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da capacidade de retenção de campo imediata

A capacidade de retenção de campo foi determinada utilizando as amostras de solos arenosos e argilosos, inicialmente após drenagem total através da amostra (tempo de drenagem: 90 minutos por amostra), como forma de simular o cenário de chuva com percolação da água através do perfil do solo.




A análise estatística foi realizada através da utilização do software SASM-Agri (CANTERI et al., 2001) utilizando o método Scott-Knott a um grau de significância de 5% e estruturada de duas formas para cada tipo de ensaio: primeiro os polímeros foram comparados individualmente entre si a concentração crescente (0 a 1000 ppm, a 0, 100, 400, 700 e 1000 ppm) e depois uma análise estatística compreendendo todos os resultados de todos os polímeros em todas as concentrações também foi realizada. O objetivo da primeira análise foi analisar o efeito na retenção hídrica a partir do aumento da concentração polimérica na amostra. Já a segunda análise busca entender os limites de desempenho de cada polímero a uma dada concentração, quando comparados entre si. Em última instância, é possível obter uma recomendação técnica de polímero e concentração indicada para aumentar a capacidade de retenção de campo dos solos estudados.

4.1.1 Solo Arenoso - Capacidade de Retenção de Campo Imediata

A tabela 5 apresenta os resultados de capacidade de retenção de campo imediata para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo arenoso. Os dados de retenção média (%) estão apresentados individualmente em comparação com o branco, bem como os grupos estatísticos obtidos após realização da análise estatística utilizando o método Scott-Knott a 95% de confiança.

O apêndice A apresenta uma análise comparativa e estatística entre os resultados de retenção média (%) imediata para todos os tratamentos estudados entre si, em solo arenoso, também adotando o método de avaliação estatística Scott-Knott a 95% de confiança.

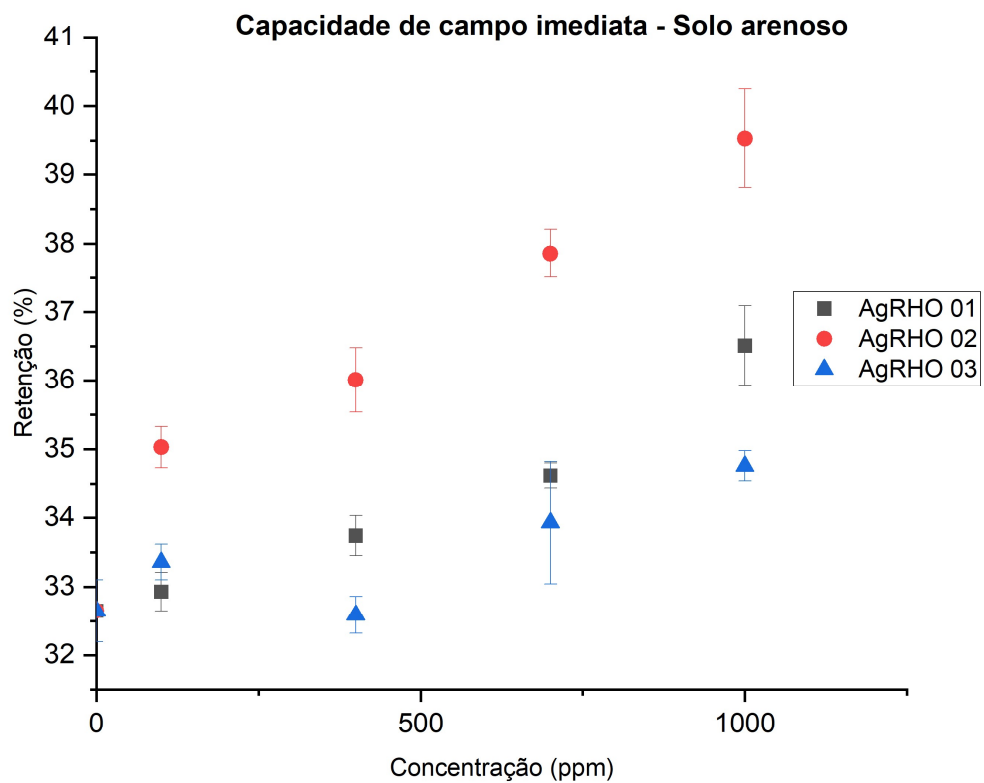
Tabela 5 - Capacidade de retenção de campo imediata, em %, para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo arenoso.

Concentração (ppm)	AgRHO 01 	AgRHO 02 	AgRHO 03 
0 (Branco)	32,65 f	32,65 f	32,65 f
100	32,93 f	35,03 d	33,36 e
400	33,74 e	36,01 c	32,59 f
700	34,62 d	37,86 b	33,93 d
1000	36,51 c	39,53 a	34,76 d

Fonte: Do autor (2022)

4.1.1.1 Análise Comparativa entre todos os polímeros

Figura 17 - Perfil da capacidade de retenção de campo imediata dos três polímeros em estudo, utilizando solo arenoso como substrato.



Fonte: Do Autor (2022)

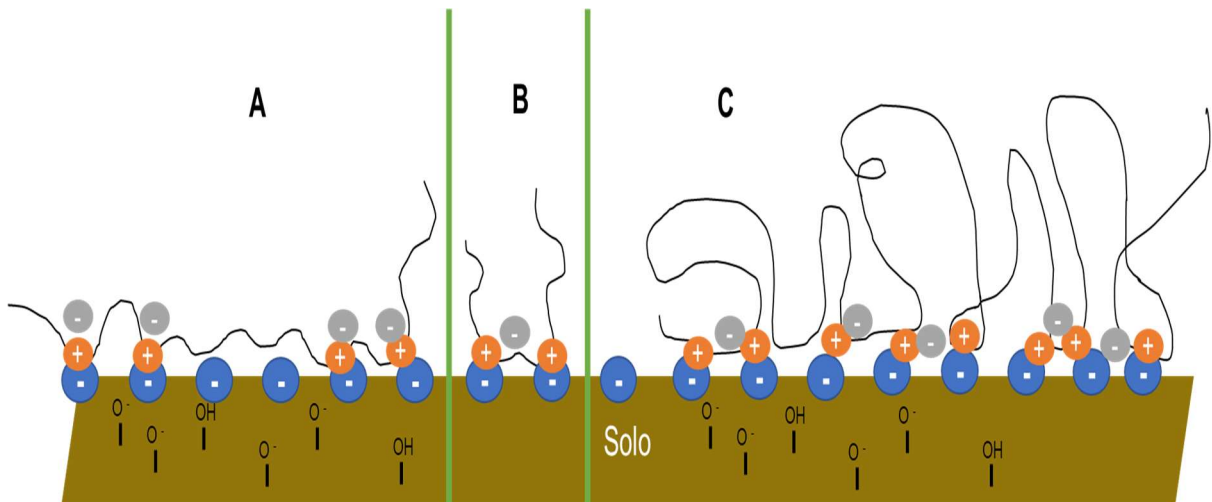
Os resultados obtidos nos ensaios de Capacidade de Retenção de Campo imediata podem ser visualizados graficamente na Figura 17 e mostram que a adição dos polímeros em estudo é capaz de aumentar a retenção hídrica daquele solo a partir de 400 ppm no caso do AgRHO 01 e AgRHO 02 e a partir de 700 ppm no caso do AgRHO 03. Estes são os pontos de concentração nos quais os resultados de retenção diferem estatisticamente do branco. Ao avaliar os resultados obtidos à luz das propriedades físico-químicas dos polímeros estudados, é possível concluir que a massa molar dos polímeros utilizados no tratamento do solo possui relação direta com a capacidade de retenção hídrica de solos arenosos. Na tabela 1 é possível observar que os polímeros AgRHO 01 e AgRHO 02 possuem massa molar, respectivamente, 1,8 e $2,0 \cdot 10^5$ maior do que o polímero AgRHO 03.

Todos os polímeros são de origem natural e possuem em sua estrutura molecular grupos polares covalentemente ligados à sua estrutura, sendo ricos em hidroxilas terminais, responsáveis pela estabilização de suas estruturas tridimensionais a partir de interações dipolo-dipolo e ligações de hidrogênio intramoleculares.

Diversos polissacarídeos assumem conformação em forma de hélice quando em solução e tem sua estrutura secundária alterada quando algum processo altera o sistema (FITTOLANI; SEEBERGER; DELBIANCO, 2019). As moléculas de polissacarídeos adsorvem à superfícies às custas de um ganho entrópico pós-adsorção, quando a organização conformacional da estrutura secundária se arranja de maneira desordenada, mas ainda estabilizada através de interações inter e intramoleculares, e da liberação dos contra-íons para o meio, conforme esquematizado na figura 18. A adsorção dos polímeros em estudo às superfícies negativamente carregadas (solo e *wafers* de Si/SiO₂) ocorre porque a afinidade das moléculas de polímero é maior pela superfície do substrato do que pelo meio no qual está inserido. De fato, quando a afinidade entre o polímero e a superfície é baixa ou repulsiva, o processo de adsorção é desfavorecido, pois o ganho de energia potencial oriunda da adsorção é menor do que a perda energética decorrente do menor grau de liberdade conformacional dos polímeros em solução (KLESHCHANOK; TUINIERLANG, 2008). Portanto, caso existisse ausência de interação atrativa entre os polímeros e a superfície do meio em estudo, estes seriam lixiviados, por exemplo, em um perfil de solo, sendo inviável a retenção hídrica e os seus efeitos benéficos decorrentes. A partir do momento que ocorre a adsorção, as cadeias poliméricas

formam redes desordenadas capazes de manter água no interior dessa estrutura, estabilizada também por ligações de hidrogênio. Por isso, o efeito de aumento da retenção é visto com menor intensidade no polímero AgRHO 03, que contém cadeias mais curtas do que os demais e, portanto, tem menor eficiência de retenção de água (máxima retenção média de 34,76%, enquanto os polímeros AgRHO 01 e 02 alcançaram médias de 36,51% e 39,53%, respectivamente). Dessa forma, a elevação da massa molar permite uma retenção hídrica maior, fato corroborado pelos resultados obtidos.

Figura 18 - Esquemática de possíveis mecanismos de adsorção e aumento da capacidade de retenção de campo em solos condicionados com os polímeros em estudo. Em laranja o grupo iônico do polímero; em cinza os contra-íons do polímero; em marrom está representada a partícula de solo; em azul a carga negativa presente na superfície do substrato. Esquema dividido em A, B e C de forma a representar possíveis conformações assumidas pelos polímeros.



Fonte: Do Autor (2022)

O polímero AgRHO 01 possui uma massa molar de 0,9 vez a massa molar do AgRHO 02, sendo eles, portanto, consideravelmente semelhantes em relação a essa propriedade, mas ainda sim com uma capacidade de retenção de campo imediata estatisticamente superior para o AgRHO 02 em relação ao AgRHO 01. É possível notar essa diferença ao avaliar o apêndice A, onde a comparação estatística é realizada entre os diferentes polímeros nas diferentes concentrações a partir de 0 ppm. À 700 ppm de AgRHO 01 o desempenho é estatisticamente igual a 100 ppm do AgRHO 02 e a 1000 ppm de AgRHO 01 a retenção é equivalente à 400 ppm de AgRHO 02. A partir de 700 ppm de AgRHO 02 os resultados são estatisticamente diferentes de todas as outras médias obtidas, permitindo concluir que a adição deste

polímero a solos arenosos reflete direta e positivamente na capacidade de retenção hídrica destes solos.

Em relação à estrutura molecular, o AgRHO 02 é um polímero de origem natural modificado quimicamente através da substituição de grupos hidroxilas de forma a conferir um caráter iônico à molécula. Tal substituição por um grupamento de maior volume significa maior impedimento estérico da molécula e poderia significar uma desestabilização estrutural das moléculas de polímero desordenadas pós-adsorção. Na prática, hipotetiza-se que o efeito benéfico para atração hídrica a partir da introdução de um novo tipo de interação (íon-dipolo) se sobressaia ao efeito desestabilizador oriundo da adição deste grupamento maior. Este fato permite ao polímero adsorvido nas partículas de solo uma interação intermolecular com a água através também de interações do tipo íon-dipolo, notadamente mais fortes, e portanto, com maior efeito de atração de água para a região, resultando em maior quantidade de água disponível naquele microambiente ao redor da partícula de solo no qual o polímero fora adsorvido.

Solos arenosos são conhecidos como não-coesivos devido à sua alta granularidade e caracterizados por possuírem uma alta proporção de areia (em torno de 70%) e baixa fração de argila (em torno de 15%) e, devido à sua composição, apresentam alta porosidade, existência de macroporos e conseqüente baixa capacidade de retenção de água e nutrientes. Sob essa ótica, é de se esperar que polímeros de menor massa molar relativa tenham menor capacidade de ancoragem neste substrato e percolem o perfil de solo com maior facilidade, tal como ocorre com a água e nutrientes, fato que explica a baixa fertilidade de solos arenosos em geral. Infere-se que uma conseqüência adicional da menor massa molar relativa do polímero AgRHO 03 seja a sua maior tendência de percolar no perfil do solo antes que seja possível a ancoragem à matéria orgânica presente, sendo lixiviado mais facilmente que os demais polímeros em estudo.




Ressalta-se ainda que, mesmo que não nos mesmos patamares de retenção, todos os polímeros em estudo foram capazes de aumentar a capacidade de retenção de campo de solos arenosos em pelo menos duas das concentrações estudadas, sendo que na maior delas (1000 ppm), o aumento percentual foi de 11,82%, 21,07% e 6,46% para o AgRHO 01, 02 e 03, respectivamente.

4.1.2 Solo Argiloso - Capacidade de Retenção de Campo Imediata

A tabela 6 apresenta os resultados de capacidade de retenção de campo imediata para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo argiloso. Os dados de retenção média (%) estão apresentados individualmente em comparação com o branco, bem como os grupos estatísticos obtidos após realização da análise estatística utilizando o método Scott-Knott a 95% de confiança.

O apêndice B apresenta uma análise comparativa e estatística entre os resultados de retenção média (%) imediata para todos os tratamentos estudados entre si, em solo argiloso, também adotando o método de avaliação estatística Scott-Knott a 95% de confiança.

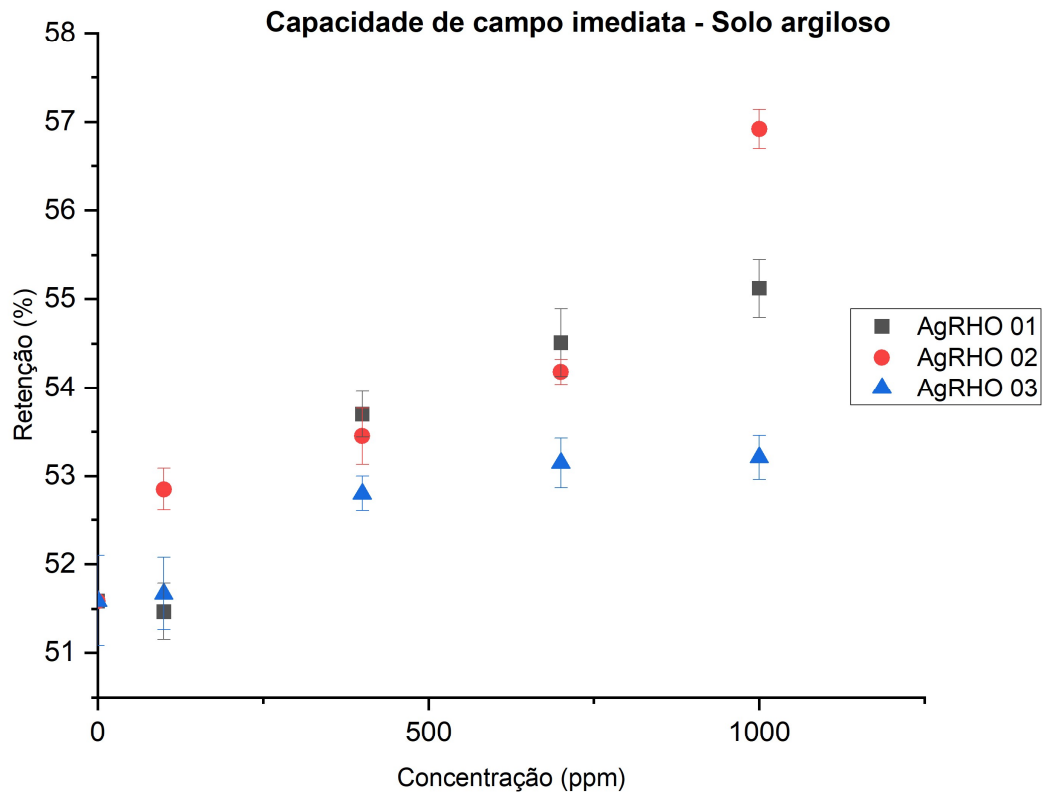
Tabela 6 - Capacidade de retenção de campo imediata, em %, para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo argiloso.

Concentração (ppm)	AgRHO 01 	AgRHO 02 	AgRHO 03 
0 (Branco)	51,59 f	51,59 f	51,59 f
100	51,47 f	52,85 e	51,67 f
400	53,70 d	53,45 d	52,80 e
700	54,51 c	54,18 c	53,15 e
1000	55,12 b	56,92 a	53,21 e

Fonte: Do Autor (2022)

4.1.2.1 Análise Comparativa entre todos os polímeros

Figura 19 - Perfil da capacidade de retenção de campo imediata dos três polímeros em estudo, utilizando solo argiloso como substrato.



Fonte: Do Autor (2022)

Em contraste com o solo arenoso, solos argilosos são conhecidos como coesivos, possuem uma elevada composição de argila (pelo menos 50%), menor granularidade e menos espaços vazios (preenchidos com ar) devido à menor proporção de macroporos em seu perfil. Com isso, apresentam uma melhor capacidade de retenção hídrica através de mecanismos de coesão e adesão, menor granularidade e, portanto, proveem sítios de ancoragem em quantidade maior que um solo rico em areia. Tais sítios permitem ancoragem de água, nutrientes e, neste caso, também dos polímeros. A maior quantidade de pontos de ancoragem em solo argiloso em comparação a um solo arenoso resta evidente nos resultados apresentados na figura 19 quando comparado à figura 17: nota-se que em condições de solo não condicionado (sem a adição de polímero em nenhuma concentração), o patamar da retenção hídrica média

é consideravelmente maior para o solo argiloso: 51,59% versus 32,65% para o solo arenoso.

Em relação ao desempenho comparativo entre os polímeros, quando nas concentrações intermediárias estudadas (400 e 700 ppm), o AgRHO 01 e AgRHO 02 não mostraram resultados estatisticamente diferentes entre si, porém maiores que o branco e o polímero AgRHO 03. Este último promoveu resultado estatisticamente relevante e distinto do branco a partir de 400 ppm. Infere-se que, por possuir mais grupos capazes de ancorar, oriundos de sua maior relação carga:massa, o polímero AgRHO 03 provê ao sistema em estudo maior retenção hídrica a concentrações mais baixas do que em solo arenoso, pois enfrenta maior resistência à percolação no perfil de solo por gravidade, compensando de certa forma a sua menor massa molar. Por outro lado, aqui também fica demonstrado que a substituição de hidroxilas por grupos iônicos é também particularmente importante para elevar a capacidade de retenção de campo de solos argilosos. Sob a ótica das propriedades físico-químicas das moléculas, os mecanismos pelos quais há elevação da retenção hídrica são os mesmos já discutidos anteriormente para os solos arenosos.

De maneira similar ao observado na determinação de capacidade de campo imediata para solo arenoso, é possível notar que todos os polímeros em estudo foram capazes de aumentar a capacidade de retenção de campo de solos argilosos em alguma extensão, em pelo menos três das concentrações estudadas, sendo que na maior delas (1000 ppm), o aumento percentual foi de 6,84%, 10,33% e 3,14% para o AgRHO 01, 02 e 03, respectivamente. O aumento percentual obtido para o solo argiloso na concentração de 1000 ppm dos polímeros é aproximadamente metade daquele alcançado para o solo arenoso, evidenciando que o segundo apresenta, comparativamente, um menor grau de saturação inicial, com interstícios entre as partículas preenchidos majoritariamente com ar em vez de água. Já o solo argiloso possui maior quantidade de água inicialmente nestes interstícios, possuindo capacidade de reter uma maior quantidade de água absoluta, mas menor incremento hídrico percentual, uma vez que mais próximo da saturação.




A combinação dos resultados obtidos em solos arenosos e argilosos permite constatar que a tecnologia dos polímeros em estudo possui potencial de aplicação em ambos os tipos de solo, independentemente do seu grau de saturação inicial. O

posicionamento em termos de modalidade de aplicação e dosagem recomendada deve variar de acordo com a estratégia comercial de interesse.

4.1.3 Solo Arenoso - Capacidade de Retenção de Campo após uma semana

A tabela 7 apresenta os resultados de capacidade de retenção de campo após uma semana para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo arenoso. Os dados de retenção média (%) estão apresentados individualmente em comparação com o branco, bem como os grupos estatísticos obtidos após realização da análise estatística utilizando o método Scott-Knott a 95% de confiança.

Tabela 7 - Capacidade de retenção de campo, em %, após uma semana para os polímeros AgRHO 01, AgRHO 02 e AgRHO 03 em solo arenoso.

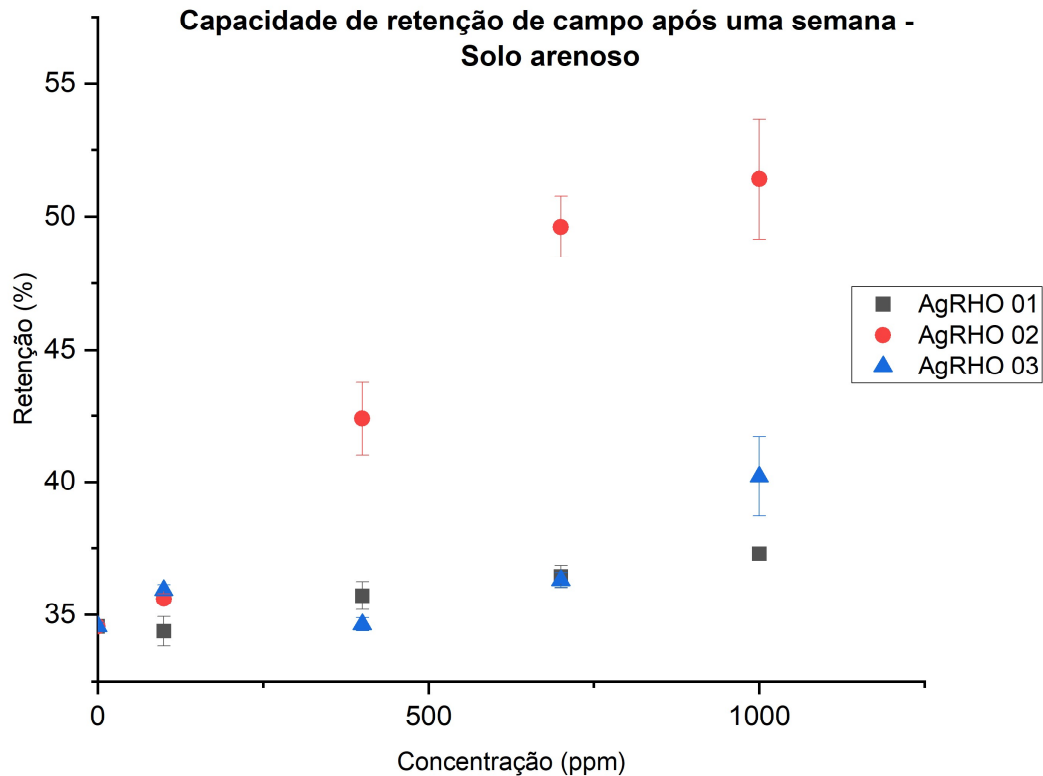
Concentração (ppm)	AgRHO 01 	AgRHO 02 	AgRHO 03 
0 (Branco)	34,56 f	34,56 f	34,56 f
100	34,38 f	35,60 e	35,93 e
400	35,72 e	42,39 c	34,64 f
700	36,44 e	49,62 b	36,31 e
1000	37,30 e	51,41 a	40,21 d

Fonte: Do Autor (2022)

O apêndice C apresenta uma análise comparativa e estatística entre os resultados de retenção média (%) após uma semana para todos os tratamentos estudados entre si, em solo arenoso, também adotando o método de avaliação estatística Scott-Knott a 95% de confiança.

4.1.3.1 Análise Comparativa entre todos os polímeros

Figura 20 - Perfil da capacidade de retenção de campo após uma semana dos três polímeros em estudo, utilizando solo arenoso como substrato.



Fonte: Do Autor (2022)

Utilizando solo arenoso, que possui ao mesmo tempo a maior granularidade e menor eficiência em retenção hídrica, o ensaio foi realizado adotando uma janela de tempo diferenciada, durante a qual a água foi colocada em contato com a matriz em estudo (solo + polímero a diferentes concentrações) pelo período de uma semana. Os resultados estão apresentados na figura 20.

Para todos os polímeros foi observado aumento da capacidade de retenção de campo em pelo menos três das concentrações estudadas, evidenciando que os polímeros possuem potencial de utilização em diferentes condições de regime pluviométrico e umidade de solo, uma vez que este ensaio viabilizou a situação de chuvas constantes ao longo do tempo e baixa taxa de evaporação de água.

Comparando-se a capacidade de retenção de campo imediata com aquela após uma semana, fica demonstrado que sob essa última condição há uma elevação do patamar de retenção média do branco de 32,65% para 34,56%, ou aumento percentual de 5,85%. A diferença para as demais concentrações e polímeros está apresentada nas tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Comparação entre o incremento da capacidade de retenção de campo após uma semana em relação à imediata em solos arenosos, utilizando o polímero AgRHO 01



Concentração (ppm)	Retenção Média Imediata (%)	Retenção Média após uma semana (%)	Incremento de Retenção Média (%)
0 (Branco)	32,65	34,56	5,85
100	32,93	34,38	4,40
400	33,74	35,72	5,87
700	34,62	36,44	5,26
1000	36,51	37,30	2,16

Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 9 - Comparação entre o incremento da capacidade de retenção de campo após uma semana em relação à imediata em solos arenosos, utilizando o polímero AgRHO 02



Concentração (ppm)	Retenção Média Imediata (%)	Retenção Média após uma semana (%)	Incremento de Retenção Média (%)
0 (Branco)	32,65	34,56	5,85
100	35,03	35,60	1,63
400	36,01	42,39	17,72
700	37,86	49,62	31,06
1000	39,53	51,41	30,05

Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 10 - Comparação entre o incremento da capacidade de retenção de campo após uma semana em relação à imediata em solos arenosos, utilizando o polímero AgRHO 03



Concentração (ppm)	Retenção Média Imediata (%)	Retenção Média após uma semana (%)	Incremento de Retenção Média (%)
0 (Branco)	32,65	34,56	5,85
100	33,36	35,93	7,70
400	32,59	34,64	6,29
700	33,93	36,31	7,01
1000	34,76	40,21	15,68

Fonte: Do Autor (2022)

Este ensaio simula uma situação possível no campo, pois comumente a semeadura é realizada após chuvas iniciais na janela da cultura, ou seja, o solo já recebeu água através de chuva ou irrigação e apresenta um nível de saturação maior do que um solo em situação de seca. Porém, mesmo na situação que simula o solo sem ter recebido carga hídrica recente (ensaio de retenção imediata), é possível notar que houve resultado positivo. Então, caso o produtor utilize o produto no solo ou na semente antes do plantio e a semeadura seja realizada *no pó* (como é geralmente chamada a circunstância na qual o produtor opta por plantar antes do início do regime de chuvas, em um solo com baixo teor de água), é possível alcançar resultados expressivos de retenção hídrica no respectivo solo condicionado.

Pelo fato de todos os polímeros mostrarem um incremento positivo da capacidade de retenção média, é possível inferir que, quando em situação de contato com a água e o solo por uma janela de tempo (ou seja, quando não há percolação imediata), há a adsorção de multicamadas das cadeias de polímero às partículas de solo. Quando há tempo suficiente para que ocorra, o fenômeno da adsorção polimérica ao solo condicionado é iniciado e propagado de maneira a formar um filme do polímero, estabilizado pelas interações intermoleculares entre o solo negativamente carregado e o polímero, por interações dipolo-dipolo, ligações de hidrogênio e íon-dipolo. A existência de interações íon-dipolo e eletrostáticas respondem pelo desempenho

superior em retenção hídrica dos solos tratados com os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 03 em comparação com o AgRHO 01.

Outro fato encontrado a partir da análise de resultados deste ensaio mostra que, quando o polímero AgRHO 03 não é submetido à percolação imediata do ensaio de capacidade de retenção imediata, o resultado de retenção hídrica média se mostra estatisticamente superior ou igual àquele do AgRHO 01 nas concentrações estudadas, polímero que nos demais protocolos se mostrou superior neste quesito. A partir deste fato depreende-se que em uma situação habitual a campo, o AgRHO 03 possui uma cinética de ancoragem mais lenta, mas que ocorre e permite àquele solo condicionado um desempenho superior em termos de retenção hídrica quando comparado com o branco. O resultado de retenção a 1000 ppm chama especial atenção porque confirma a relevância de um grupamento iônico na molécula do polímero, uma vez que o polímero de maior massa molar, mas não-iônico, não alcançou o resultado de retenção média daquele de menor massa molar. Dessa forma, conclui-se que a melhor ancoragem dos polímeros à superfície das partículas do solo permite àquele sistema uma maior eficiência na retenção hídrica daquele microambiente.

A compilação dos resultados de todos os ensaios de capacidade de retenção de campo revela que todos os polímeros em estudo são capazes de beneficiar o solo e, por consequência, as plantas que se desenvolverem nele, a partir da elevação da capacidade de retenção hídrica daquela matriz, independentemente da condição inicial de saturação, regime pluviométrico recente ou tipo de solo. Há, contudo, um efeito positivo observado em maior extensão para solos pobres em argila (os chamados arenosos) submetidos a um certo grau de umidade inicial, que pode ter sido alcançado através de precipitação ou irrigação.

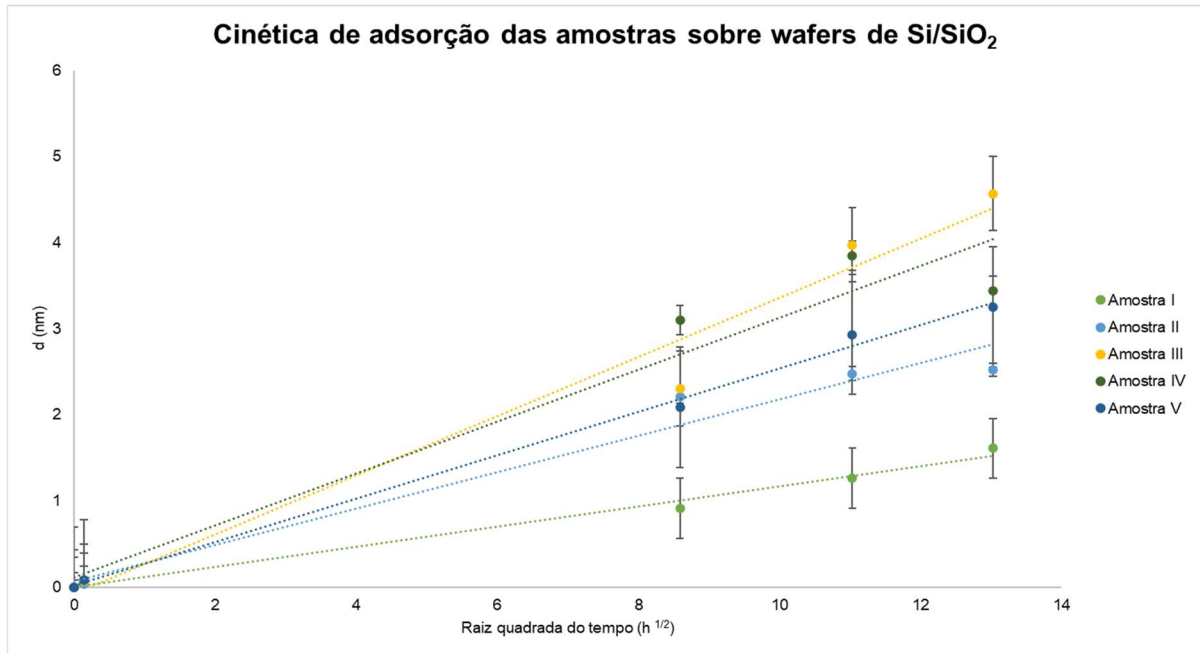
4.2 Cinética de adsorção dos polímeros sobre wafers de Si/SiO₂

A espessura da camada (d) de polímeros adsorvida sobre wafers de Si/SiO₂ foi determinada através da técnica de elipsometria em função do tempo de contato. A cinética de adsorção foi avaliada para os polímeros em solução aquosa (amostras I, II e III) e em condições de força iônica aumentada (amostras IV e V). Uma solução comercial de fertilizante mineral misto contendo macro e micronutrientes para plantas e utilizada em jardinagem para adubação de solos deficientes foi utilizada no ensaio.

Essa solução é composta por: ureia, ácido bórico, sulfato de cobre, molibdato de sódio, sulfato de zinco, sulfato de cobalto, hidróxido de sódio, sulfato de manganês, fosfato monoamônico, ácido fosfórico e sulfato de níquel e foi utilizada como amostra I a uma diluição 1:100.

Para cada uma das amostras em estudo os valores de d (em nm) medidos foram plotados em função da raiz quadrada do tempo. Tal ajuste se mostrou linear no intervalo estudado, com valores de $R^2 > 0,90$ para todas as amostras, indicando que a cinética de adsorção se dá através de um processo difusivo que segue a lei de Fick. A figura 21 apresenta os valores de d em função da raiz quadrada do tempo e confirma a existência de um processo de adsorção das amostras em estudo sobre a superfície de Si/SiO₂, que busca mimetizar as partículas de solo, permitindo, portanto, inferir que há adsorção polimérica nas partículas de solo quando estes polímeros são aplicados. Quanto maior o valor de d , maior a espessura do filme adsorvido sobre a matriz de Si/SiO₂. Dado que fisicamente não há sentido em ter uma espessura (d) diferente de zero no tempo zero, a linearização foi realizada de forma a compreender a existência do ponto (0,0). Ainda a partir da figura 21, é possível visualizar que a espessura final das camadas adsorvidas medidas foi maior para a amostra III, seguido pelas IV, V, II e I, respectivamente (III > IV > V > II > I). Considerando as barras de erros apresentadas, nota-se que as amostras I e III diferem das demais, ao passo que há intersecção dos intervalos para o par das amostras II e V e também IV e V.

Figura 21 - Cinética de adsorção - gráfico de espessura do filme adsorvido pela raiz quadrado do tempo ($h^{1/2}$) para amostras de I a V.

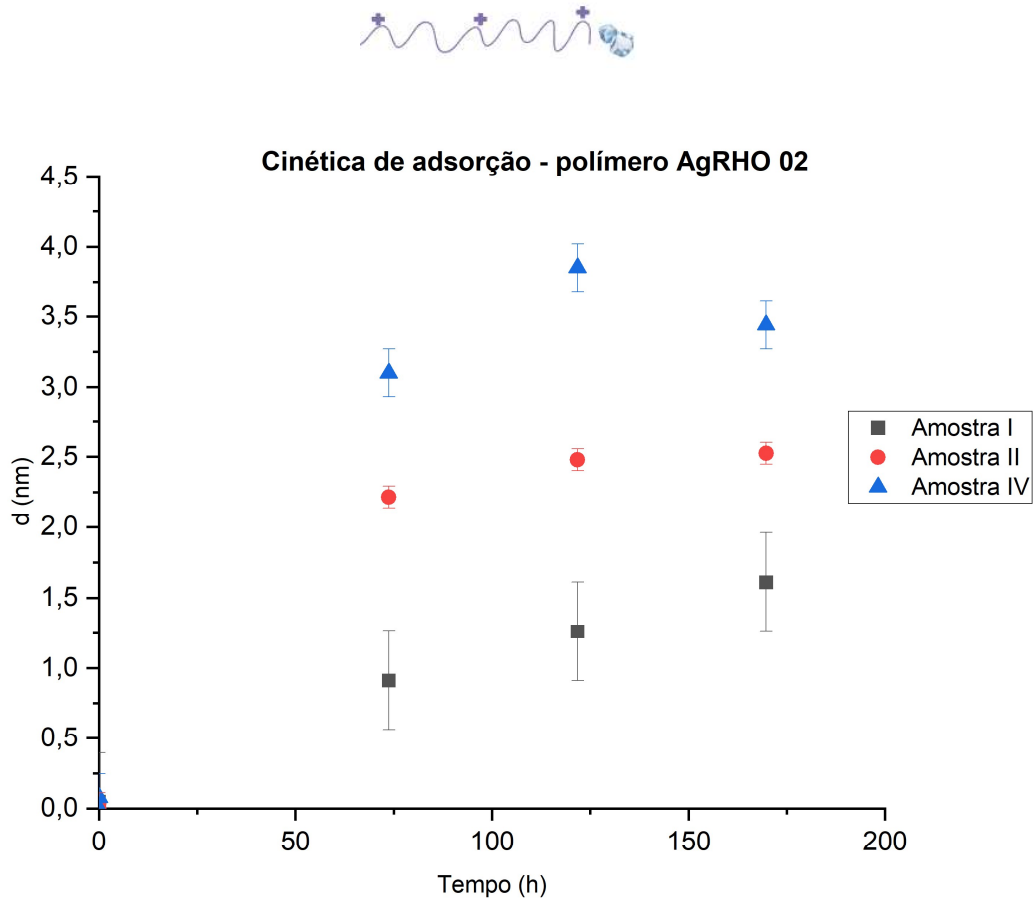


Fonte: Do Autor (2022)

Optou-se, então, por avaliar isoladamente o perfil de adsorção das amostras dos polímeros em solução aquosa e em solução de força iônica aumentada a partir da adição do fertilizante mineral misto, de modo a compreender como as características físico-químicas dos polímeros e a força iônica do meio podem afetar o perfil de adsorção polimérico. A figura 22 mostra o perfil de adsorção das amostras do polímero AgRHO 02 comparadas entre si e com a amostra I.

Nota-se que há adsorção da amostra I na superfície em estudo, atingindo 1,61 nm na última medida. Considerando a barra de erro e dentro do intervalo estudado, apresenta uma estabilização da espessura do filme a partir do ponto $x = 73,75$ h. Portanto, conclui-se que os cátions da solução de fertilizante mineral misto (H^+ , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Na^+ , Co^{2+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , Ni^{2+}) adsorvem na superfície negativamente carregada do wafer de Si/SiO₂ e atraem os contra-íons da solução (OH^- , SO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) de forma a contribuir com a formação e com o aumento da espessura do filme até atingir um patamar de estabilidade, dentro do intervalo estudado, em torno de 1,61 nm.

Figura 22 - Cinética de adsorção - gráfico de espessura dos filmes adsorvidos pelo tempo (h) para amostras em solução aquosa (II e IV), além da amostra I.



Fonte: Do Autor (2022)

A figura 22 evidencia também que as amostras do polímero AgRHO 02 em solução aquosa e solução de força iônica aumentada geraram um filme de espessura maior do que a amostra I, confirmando que há adsorção dos polímeros ao longo do tempo. Com base nas barras de erro, nota-se que as medidas de espessura do filme são diferentes entre si, considerando as amostras I, II e IV. Por outro lado, tal como observado para a amostra I, as amostras II e IV (individualmente) chegam a um patamar estável de espessura do filme, dentro do intervalo de tempo estudado, a partir do ponto $x = 73,75$ h.

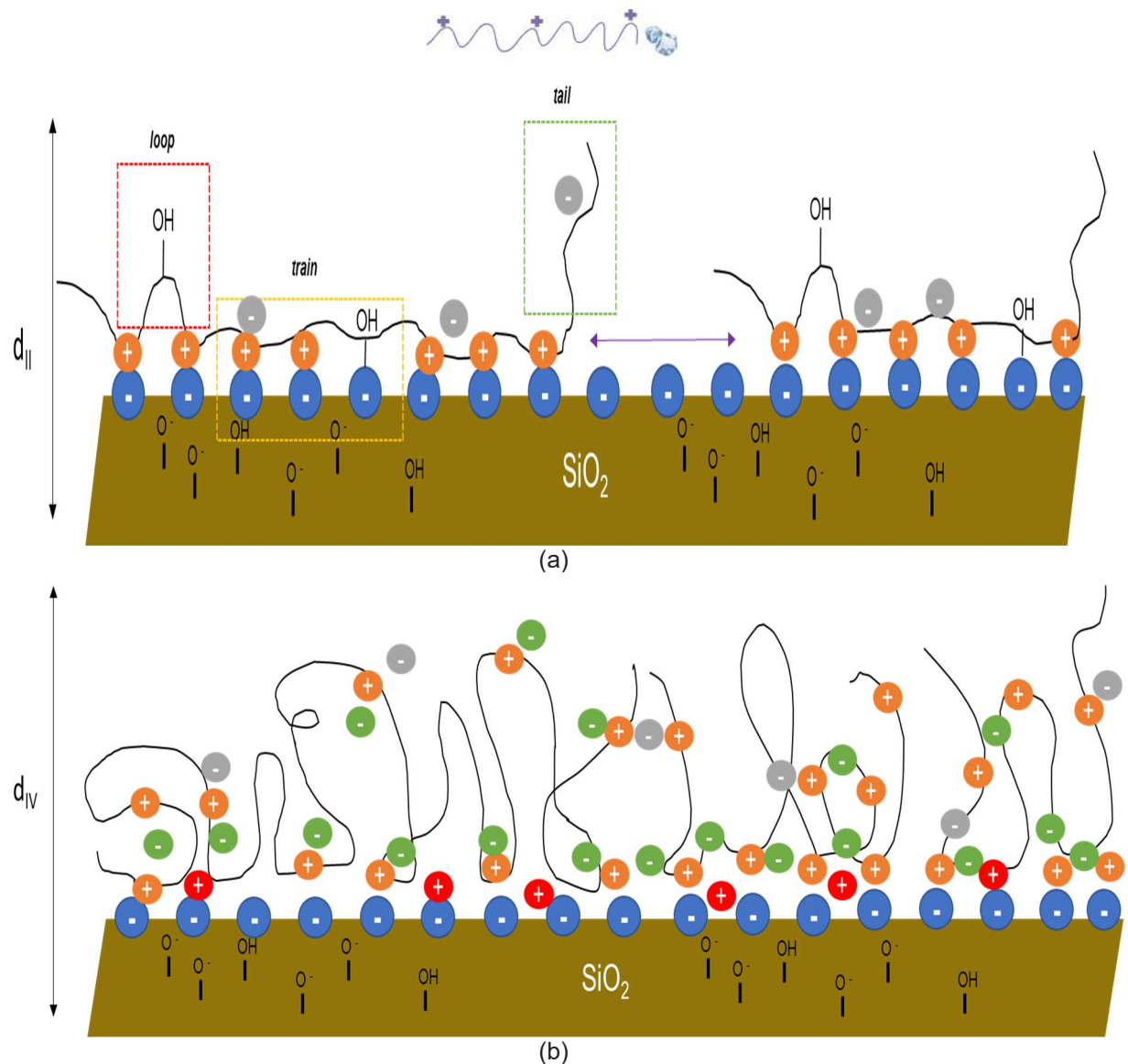
Sugere-se que os sítios disponíveis na superfície do wafer de Si/SiO₂ são pontos de adsorção para os polímeros substituídos com grupamentos iônicos, permitindo a ancoragem, sobretudo por interação eletrostática, mas também por interações íon-dipolo, e consequente formação do filme. A partir do dado de aumento de espessura

do filme pelo tempo, conclui-se que ocorre um processo de adsorção multicamadas, viabilizado também pela estabilização das cadeias expostas ao meio através de ligações de hidrogênio e íon-dipolo.

Conforme os dados da tabela 1, o polímero AgRHO 02 possui alta massa molar relativa e é substituído, possuindo uma menor densidade de carga (relação carga:massa) em comparação ao AgRHO 03. Propõe-se que, ao adsorver na superfície negativamente carregada do substrato, segmentos do polímero AgRHO 02 em solução aquosa assumam diferentes conformações: *trains*, que estão diretamente adsorvidos à superfície através de interação eletrostática; *loops*, regiões não adsorvidas em formato de curva e; *tails*, segmentos em forma de cauda, que são também regiões poliméricas não adsorvidas e expostas ao meio (WELCH et al., 2015). A repulsão eletrostática intra e intermoleculares entre os grupos iônicos da molécula aponta uma depressão da qualidade do empacotamento, ocasionando a adsorção do polímero com maior espaçamento entre as moléculas e, conseqüente menor espessura (d), quando comparado ao cenário de força iônica aumentada pela solução de fertilizante mineral misto.

Quando em solução de maior força iônica, as cadeias do polímero AgRHO 02 sofrem menor repulsão eletrostática intra e intermoleculares devido ao efeito de blindagem ocasionado pelos ânions oriundos da solução de fertilizante mineral, fazendo que o polímero assumira a conformação de novelo gaussiano, capaz de ocupar de maneira mais eficiente a superfície, melhorando o empacotamento e diminuindo o espaçamento entre moléculas de polímero. Além disso, a presença dos cátions oriundos do fertilizante mineral, que concorrem pela adsorção à superfície, ocasiona uma competição por esses sítios de ancoragem e também contribui para maior espessura do filme. Estes fatores favorecem, então, a maior espessura do filme polimérico adsorvido na superfície quando a força iônica do meio é aumentada. A figura 23 apresenta uma esquematização do mecanismo proposto para adsorção do polímero AgRHO 02 nos dois meios estudados.

Figura 23 - Esquemática ilustrando o mecanismo proposto para a adsorção do polímero AgRHO 02 em (a) solução aquosa e (b) solução de força iônica aumentada. Em laranja o grupo iônico do polímero; em verde os ânions oriundos do fertilizante mineral; em cinza os contra-íons do polímero; em marrom está representado o *wafer* de silício; em azul a carga negativa presente na superfície do substrato, oriunda dos silanóis. Em (a) está destacada em vermelho a região do *loop*, em amarelo o *train*, em verde o *tail* e em roxo a representação da área de superfície não adsorvida devido à repulsão inter e intramolecular entre as moléculas do polímero. A espessura do filme d_{II} é representada graficamente como maior que a espessura d_{II} e não inclui a espessura da superfície de SiO_2 .



Fonte: Do Autor (2022)

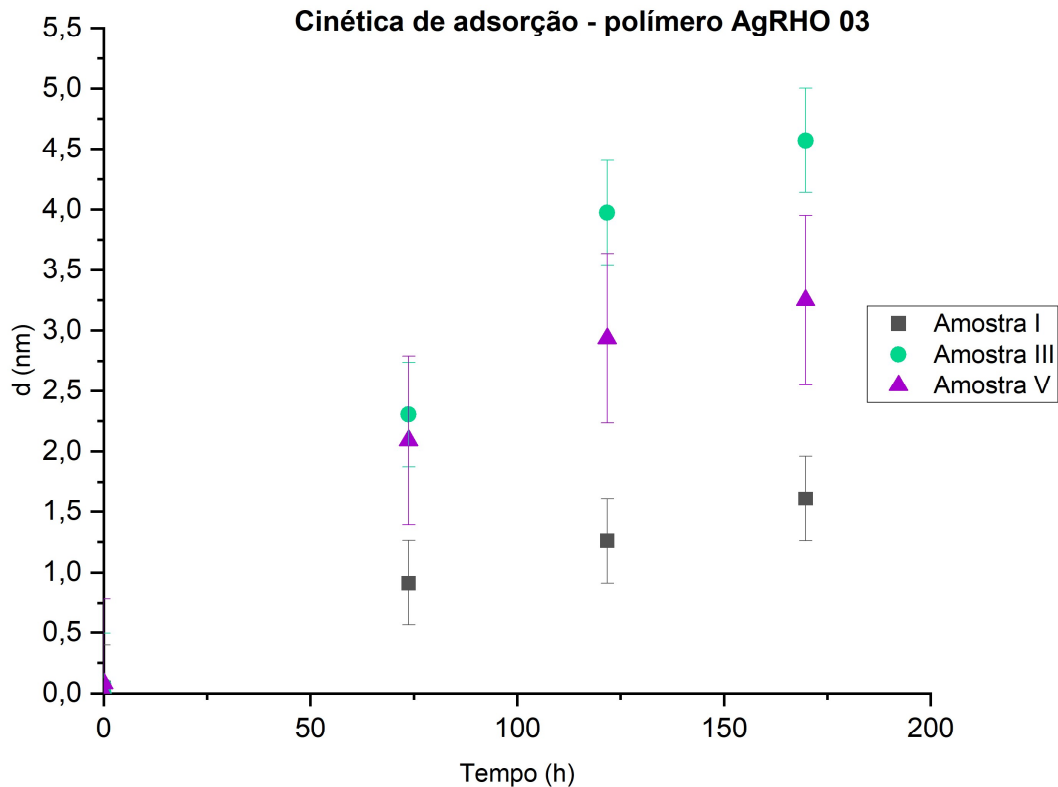
A figura 24 apresenta o perfil de adsorção do polímero AgRHO 03 sob as duas condições estudadas e sua respectiva comparação com a amostra I. Diferente do observado para o polímero AgRHO 02, o polímero AgRHO 03 apresenta a maior espessura do filme adsorvido quando em solução aquosa e em equilíbrio (4,57 nm,

amostra III), ao passo que o valor de d é 3,25 nm no equilíbrio quando a força iônica da solução é aumentada (amostra V). Novamente, com base nas barras de erro, nota-se que as medidas de espessura do filme são diferentes entre si, considerando as amostras I, III e V. Por outro lado, para o AgRHO 03, a estabilidade de espessura dos filmes adsorvidos é alcançada, dentro do intervalo de tempo estudado, a partir do ponto $x = 121,75$ h.

De acordo com os dados da tabela 1, nota-se que a massa molar do AgRHO 03 é expressivamente menor do que o AgRHO 02, enquanto seu grau de substituição é 25% maior, permitindo concluir que se trata de um polímero com maior relação carga massa. Ao correlacionar os dados elipsométricos com as características físico químicas do polímero AgRHO 03, hipotetiza-se que o efeito da diminuição do tamanho da cadeia seja mais relevante para entender a mudança no perfil de adsorção do que o aumento do grau relativo de substituição de 1,00 para 1,25.

O polímero em solução aquosa, devido às suas cadeias mais curtas, é capaz de realizar uma adsorção uniformemente distribuída e sobre uma maior extensão da superfície, culminando em um melhor empacotamento e na maior espessura do filme ao longo do tempo estudado. Ao ancorar na superfície, sugere-se que este polímero se apresenta na conformação conhecida como *brush*, estabilizada também por ligações de hidrogênio e íon dipolo e responsável por conferir um maior valor de d , conforme representado na figura 24.

Figura 24 - Cinética de adsorção - gráfico de espessura dos filmes adsorvidos pelo tempo (h) para amostras em solução aquosa (III e V), além da amostra I

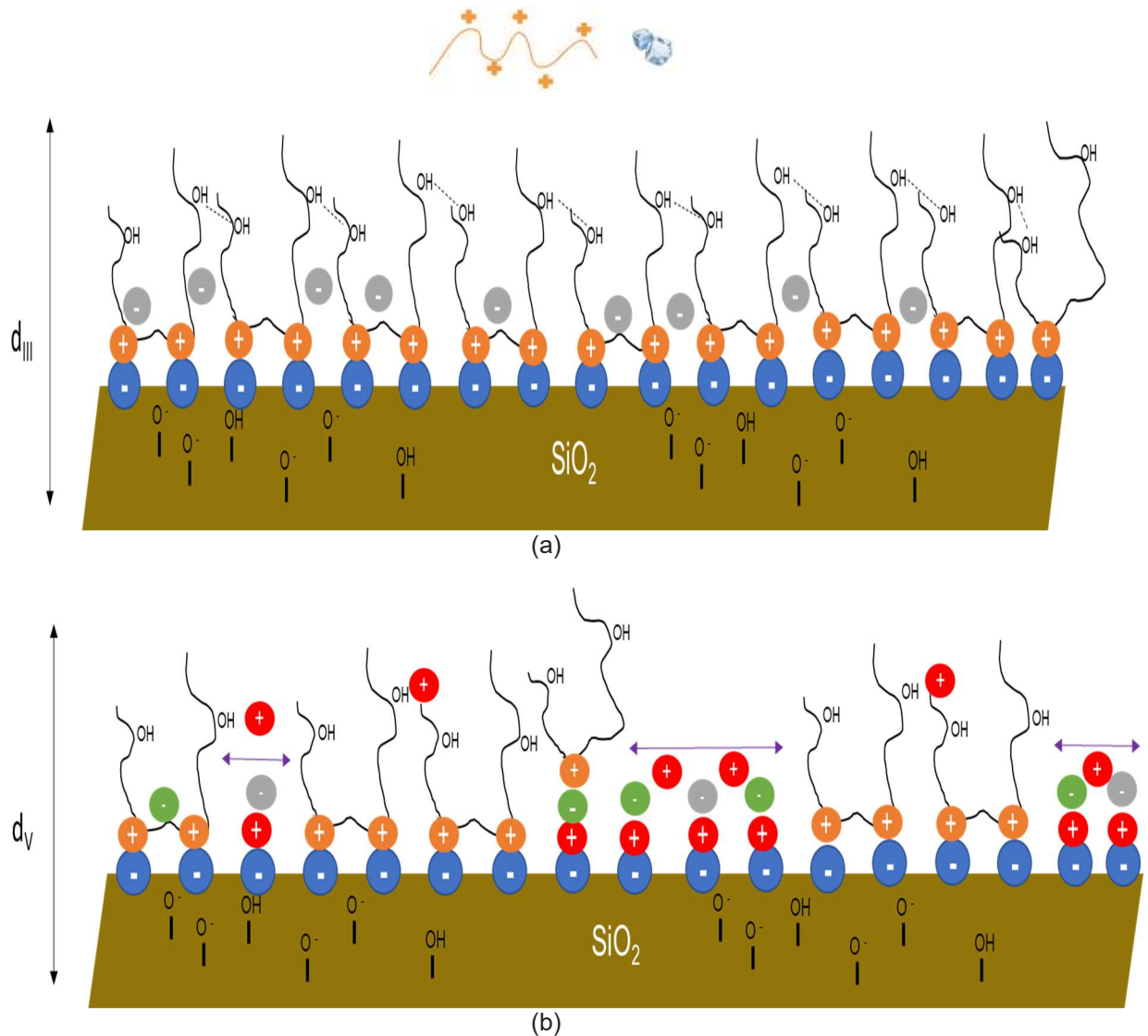


Fonte: Do Autor (2022)

Hipotetiza-se que a redução da espessura do filme adsorvido quando em solução de força iônica aumentada seja resultado de um pior empacotamento como efeito da adsorção competitiva com os cátions oriundos da solução de fertilizante mineral misto e do desfavorecimento de ligações de hidrogênio intramoleculares, responsáveis também por um empacotamento mais eficaz. O polímero AgRHO 03 possui menor número absoluto de grupos iônicos por molécula, fato decorrente de sua menor massa molar, portanto a sua capacidade de adsorção à superfície é reduzida quando comparada ao polímero AgRHO 02, que possui maior número absoluto de grupos iônicos ancoráveis por molécula, seja na conformação *train/loop/tail*, seja na conformação de novelo gaussiano. Dessa forma, a adsorção na superfície ocorre de

maneira menos uniforme para o polímero AgRHO 03, com maior probabilidade de formação de aglomerados nas regiões onde o polímero conseguiu ancorar, mas com maior área superficial coberta pela interação eletrostática dos cátions da solução de fertilizante mineral. Reforça-se aqui que a medida elipsométrica traz um valor médio, entre cumes e vales, da espessura do filme adsorvido. Daí se conclui que a efetiva adsorção dos cátions do fertilizante reduz a espessura média do filme, pois esta é capaz de formar um filme em torno de 1,61 nm, enquanto o polímero em solução aquosa forma um filme de espessura 4,57 nm. Quando o polímero AgRHO 02 está em solução de maior força iônica este efeito não se faz presente na mesma extensão porque sua molécula possui maior quantidade de sítios de ancoragem disponíveis, como resultado de suas longas cadeias e da conformação assumida neste meio. A figura 25 apresenta uma esquematização do mecanismo proposto para adsorção do polímero AgRHO 02 nos dois meios estudados.

Figura 25 - Esquemática ilustrando o mecanismo proposto para a adsorção do polímero AgRHO 03 em (a) solução aquosa e (b) solução de força iônica aumentada. Em laranja o grupo iônico do polímero; em verde os ânions oriundos do fertilizante mineral; em cinza os contra-íons do polímero; em marrom está representado o *wafers* de silício; em azul a carga negativa presente na superfície do substrato, oriunda dos silanóis. Em (b) está destacada em roxo a representação da área de superfície onde o polímero não ancora devido à adsorção competitiva. A espessura do filme d_{III} é representada graficamente como maior que a espessura d_V e não inclui a espessura da superfície de SiO_2 .



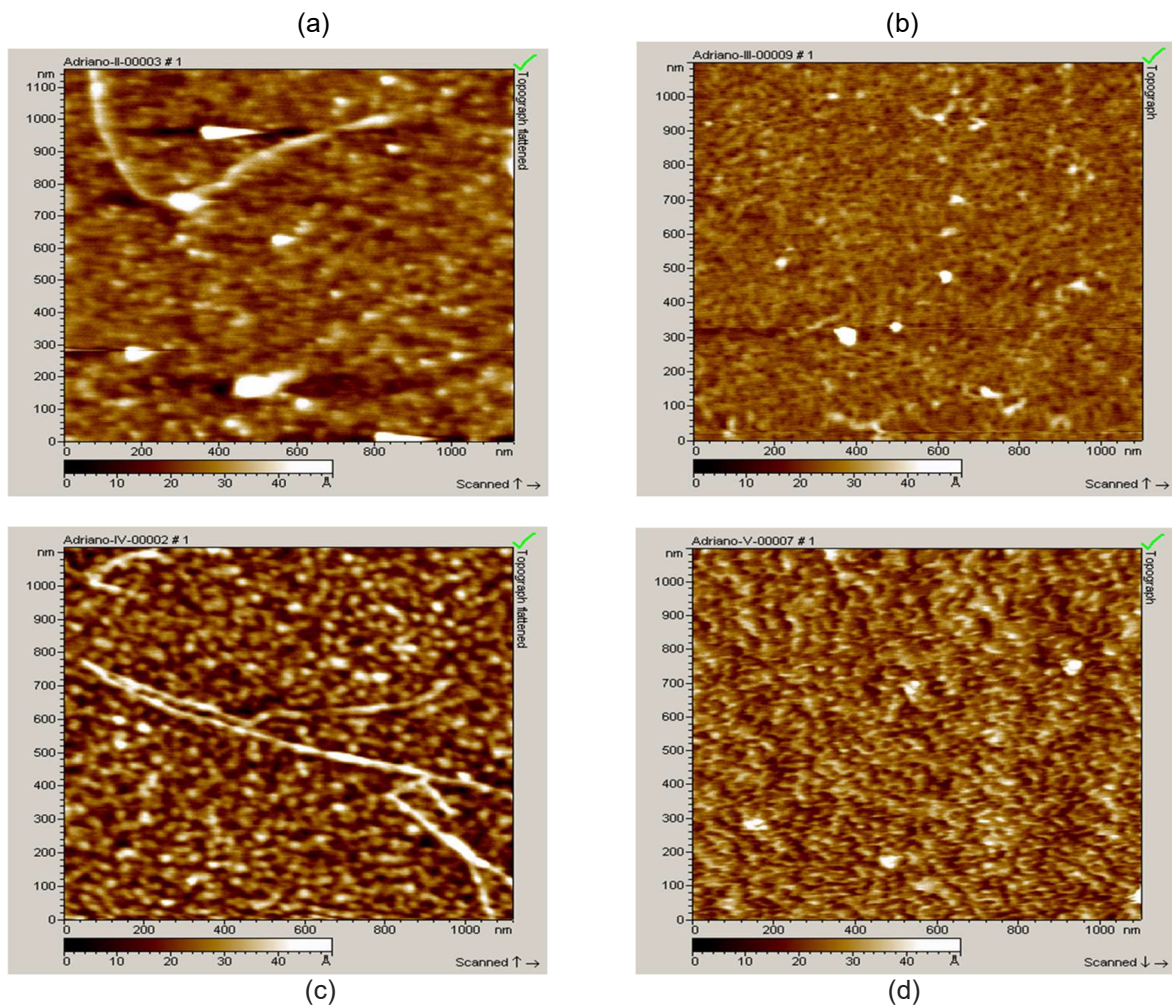
Fonte: Do Autor (2022)

4.3 Perfil de adsorção através microscopia de força atômica

As imagens topográficas ($1 \mu m \times 1 \mu m$) apresentadas na Figura 26 foram obtidas através da microscopia de força atômica realizada sobre as camadas de polímeros adsorvidos nos *wafers* de Si/SiO_2 e confirmam a ocorrência de adsorção polimérica no substrato escolhido, revelando a presença de estruturas em formato de fibras

emaranhadas para o polímero AgRHO 02, além de pontos brancos representando agregados de polímero sobre a superfície do substrato (amostras II e IV).

Figura 26 - Imagens topográficas (seção 1 μm x 1 μm) obtidas através de microscopia de força atômica (AFM) para as camadas de polímeros AgRHO 02 e AgRHO 03 adsorvidas na superfície dos wafers de Si/SiO₂, sendo (a) polímero AgRHO 02 em solução aquosa; (b) polímero AgRHO 03 em solução aquosa; (c) polímero AgRHO 02 em solução de fertilizante mineral misto e; (d) polímero AgRHO 03 em solução de fertilizante mineral misto.



Fonte: Do Autor (2021)

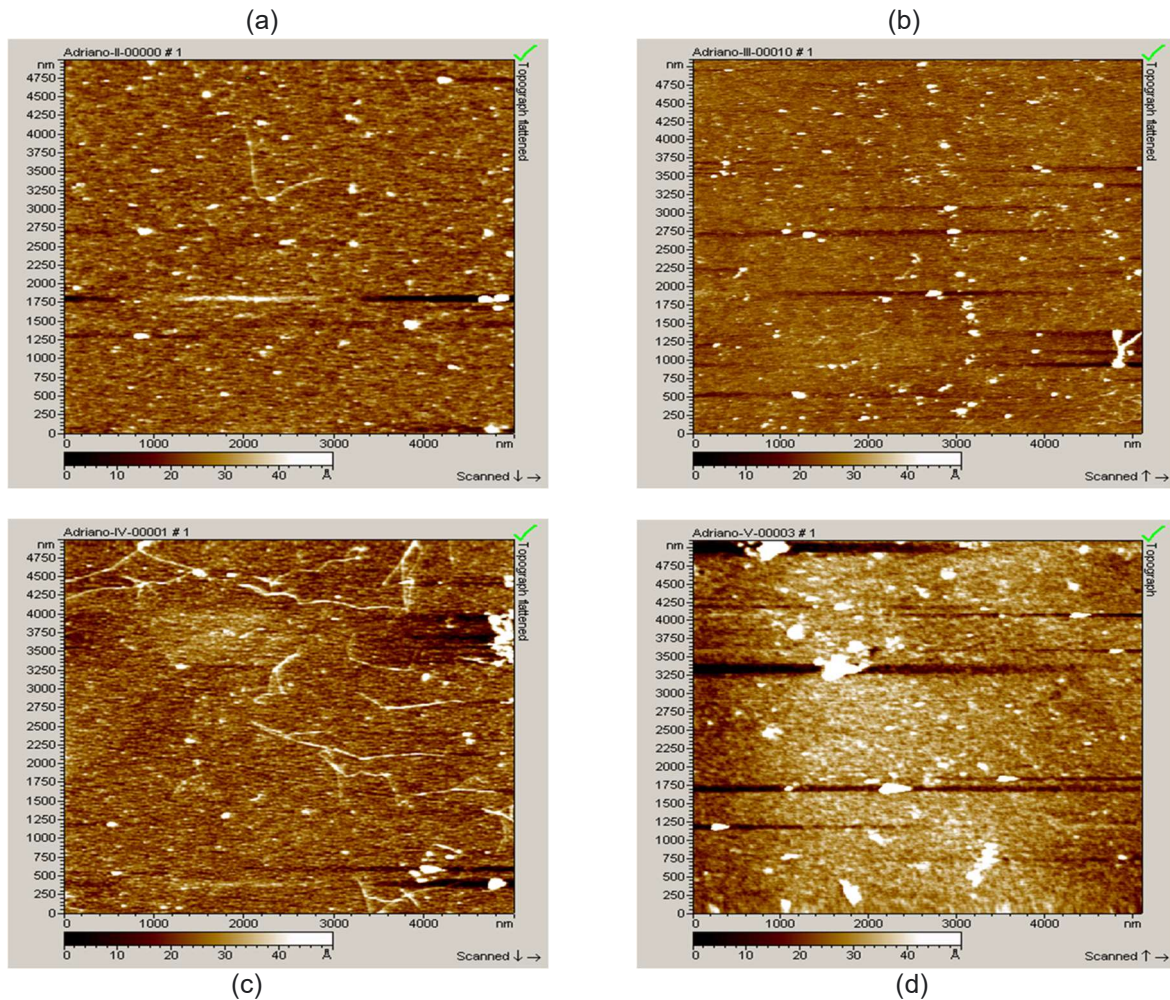
Já nas amostras do polímero AgRHO 03 (III e V) não é possível observar a formação deste emaranhado fibroso na mesma extensão, indicando que este é uma consequência prevalente do maior tamanho e massa molar do AgRHO 02. Sugere-se ainda que a existência de fibras na figura 26a corrobora o mecanismo de adsorção proposto para a molécula do polímero AgRHO 02 em solução aquosa, no qual há a existência de segmentos poliméricos em conformação *trains*, como resultado da

ancoragem por interação eletrostática. Há também a evidência de regiões sem adsorção, indicando que a repulsão intermolecular colabora para a existência de espaços não-adsorvidos na superfície do wafer de Si/SiO₂. Já na imagem do *wafer* que esteve em contato com a solução de força iônica aumentada (figura 26c), é possível notar a formação de emaranhados de maior extensão, fato oriundo do melhor empacotamento dos novos gaussianos formados, que contribuem para a maior espessura do filme encontrada na análise elipsométrica.

Na figura 26b, é possível observar que o AgRHO 03 está mais uniformemente distribuído sobre a superfície, com menor porosidade aparente, uma vez que a densidade de pontos brancos (representando os agregados) é menor em comparação às imagens do AgRHO 02, presumivelmente devido ao melhor empacotamento oriundo das cadeias mais curtas do AgRHO 03, que por sua vez colaboram para uma maior espessura de filme. Já na figura 26d nota-se uma distribuição menos uniforme sobre a superfície, com maior porosidade, como resultado da adsorção competitiva dos cátions presentes na solução de fertilizante mineral adicionada.

Imagens topográficas da seção 5 µm x 5 µm também foram analisadas e estão apresentadas na figura 27. Tais imagens mostram que o aumento da força iônica torna a topografia de adsorção do polímero AgRHO 02 menos uniforme (Figura 27a e 27c), com maior tendência de formação de agregados fibrosos devido ao efeito de blindagem das cargas, que por sua vez ocasiona redução da repulsão intra e intermolecular. Há também uma maior presença de emaranhados fibrosos quando a força iônica do meio é aumentada, possivelmente devido a uma combinação da alta massa molar relativa do polímero e do efeito *bridging*, que aumenta os pontos de *crosslinking* não covalente no sistema.

Figura 27 - Imagens topográficas (seção 5 μm x 5 μm) obtidas através de microscopia de força atômica (AFM) para as camadas de polímeros AgRHO 02 e AgRHO 03 adsorvidas na superfície dos wafers de Si/SiO₂, sendo (a) polímero AgRHO 02 em solução aquosa; (b) polímero AgRHO 03 em solução aquosa; (c) polímero AgRHO 02 em solução de fertilizante mineral misto e; (d) polímero AgRHO 03 em solução de fertilizante mineral misto.



Fonte: Do Autor (2021)

Por outro lado, as imagens topográficas do AgRHO 03 apontam uma tendência maior de formação de agregados quando há um aumento da força iônica do meio no qual a amostra ficou submersa. Como discutido sobre os resultados de elipsometria, a adição de íons faz com que ocorra uma competição entre os cátions e o polímero para adsorver na superfície de Si/SiO₂. Nas regiões onde ocorre a adsorção polimérica, a formação de agregados decorre do efeito de *bridging*, capaz de viabilizar a existência de aglomerados, uma vez que reduz a repulsão intermolecular.

Espera-se, por fim, que as regiões com ocorrência de adsorção mais bem distribuída sobre a superfície sejam capazes de intumescer em maior extensão. Além disso, mesmo regiões com aglomerados são capazes de reter água naquele microambiente,

sendo estes fatores que também contribuem para o entendimento do aumento de retenção hídrica dos polímeros estudados.




4.4 Germinação em caixa de areia

O desempenho de germinação de sementes de soja tratadas com os diferentes polímeros em estudo, tanto na forma pó quanto na forma líquida, foi avaliado em duas situações distintas relacionadas à disponibilidade hídrica: regular e deficitária (configurando estresse hídrico), em caixa de areia por 7 dias.

Os resultados médios de massa vegetal, germinação, plantas mortas e anormais obtidos no ensaio de germinação com disponibilidade hídrica regular em caixa de areia estão apresentados na tabela 11. O grupo estatístico obtido a partir da análise Scott-Knott a 95% de confiança está apresentado ao lado do valor atingido para cada parâmetro.

Com base nos resultados obtidos até este ensaio, onde ficou evidenciado o desempenho superior de sistemas com adição de polímeros quimicamente modificados, a partir deste ensaio optou-se por testar o polímero AgRHO 04, que é o AgRHO 03 em formulação líquida, desenvolvida com o objetivo de melhorar a aplicação do produto em campo. Para efeitos comparativos, foram mantidos os polímeros na forma pó (AgRHO 01 e AgRHO 02).

Tabela 11 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em caixa de areia, sem restrição hídrica para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.

Polímero	Massa Vegetal (g)	Germinação (número de plantas normais)	Número de plantas Anormais	Número de plantas Mortas
Branco	65,77 b	44,67 c	29,00 a	26,33 a
AgRHO 01 	71,43 a	48,67 c	33,00 a	18,33 b
AgRHO 02 	73,17 a	50,67 b	28,33 a	21,00 b
AgRHO 04 	71,33 a	55,33 a	25,67 a	19,00 b

Fonte: Do Autor (2022)

A figura 28 mostra a disposição das plantas sobre uma superfície plana e que permitiu a contagem de plantas germinadas normais, anormais e mortas, as quais também estão esquematizadas na imagem.

Figura 28 - (a) Plantas retiradas das caixas de areia para contagem e classificação entre germinadas normais, anormais e mortas. Em (b) o destaque para as plantas normais (azul), anormais (laranja) e mortas (vermelho).



(a)






(b)

Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados mostram que o polímero AgRHO 04 é aquele que promove uma melhor taxa de germinação, que é a contagem do número de plantas normais ao final do experimento, além de uma massa vegetal superior estatisticamente ao branco.

Os resultados médios de massa vegetal, germinação, plantas mortas e anormais obtidos no ensaio de germinação com restrição hídrica de 30% em caixa de areia estão apresentados na tabela 12. O grupo estatístico obtido a partir da análise Scott-Knott a 95% de confiança está apresentado ao lado do valor atingido para cada parâmetro.

Tabela 12 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em caixa de areia, com restrição hídrica de 30% para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.

Polímero	Massa Vegetal (g)	Germinação (número de plantas normais)	Número de plantas Anormais	Número de plantas Mortas
Branco	49,27 c	37,33 c	36,00 a	26,67 a
AgRHO 01 	61,50 b	45,33 b	32,00 a	22,67 b
AgRHO 02 	69,50 a	52,33 a	29,33 a	18,33 c
AgRHO 04 	73,07 a	55,00 a	28,67 a	16,33 c

Fonte: Do Autor (2022)

De maneira geral, através dos parâmetros analisados e dos seus respectivos resultados, é possível notar uma depressão da viabilidade vegetal do branco no ensaio com déficit hídrico em comparação ao ensaio com suprimento de água regular. O número de plantas mortas é bem próximo, porém a média do número de plantas germinadas cai de 44,67 para 37,33, com conseqüente incremento de plantas anormais de 29,00 para 36,00. Tal resultado mostra que a água é um insumo fundamental para que a planta tenha um desenvolvimento adequado e que permita a ela um desenvolvimento saudável desde o início. O número médio de plantas anormais é um indicativo do número de sementes que germinaram, porém que estavam em um estágio atrasado de desenvolvimento. Essas plantas anormais poderiam vingar e se tornarem plantas saudáveis após mais alguns dias, como

também poderiam definhar até a morte devido à sua incapacidade de obter os nutrientes necessários após o início da germinação.

Similarmente ao ensaio sob condições hídricas regulares, o polímero AgRHO 04 também é aquele que entrega o melhor desempenho de germinação no cenário de estresse hídrico, neste ensaio estatisticamente equivalente ao polímero AgRHO 02. Obter um desempenho adequado de germinação inicial está diretamente relacionado com a produtividade na colheita ao final do ciclo daquela lavoura, sendo um fator crítico de produtividade. Traduzindo este fato observado às situações de campo, tem-se que ao alcançar uma taxa de germinação satisfatória, aquela área produtiva terá um estande (número de plantas por metro) mais robusto, que se traduzirá em uma população de plantas maior e, conseqüentemente, capazes de gerar uma quantidade de sacas (neste caso de soja) superior à uma área com falhas de germinação.

A massa vegetal obtida durante este ensaio de germinação também corrobora com o resultado alcançado com os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 em termos de germinação. A maior massa vegetal é mais um importante fator de produtividade que, a partir dos resultados obtidos, demonstra que as áreas tratadas com estes polímeros tiveram o desenvolvimento de plantas com uma capacidade superior de exploração do perfil de solo através das raízes, conseqüente maior eficiência na absorção de nutrientes e mais saudáveis para enfrentar situações de estresse abiótico ao longo de todo o ciclo da cultura, não só em sua fase inicial. É especialmente relevante o fato de que estes polímeros são capazes de alcançar estes resultados mesmo em situação de estresse hídrico em uma das fases mais críticas de desenvolvimento vegetal, que é a germinação.

Nota-se que sob regime hídrico regular, o polímero AgRHO 01 mostrou um desempenho comparável ao AgRHO 02 e AgRHO 04 em termos de massa vegetal, mas inferior no que diz respeito às plantas germinadas, que é a contagem do número de plantas normais. Este fato decorre do parâmetro plantas anormais para o polímero AgRHO 01 que, embora não tenha apresentado diferença estatística dos demais, é o que tem numericamente o maior valor médio, o que contribuiu para a elevação da massa vegetal. Contudo, como dito anteriormente, não é possível garantir que todas essas plantas seguirão o seu desenvolvimento e atingirão a maturidade de crescimento, se tornando plantas saudáveis. Quando o mesmo polímero é aplicado às sementes de soja e submetidos à estresse hídrico, nota-se que aquele

desempenho comparável de outrora não está mais presente, traduzido através do maior número de plantas mortas e menor número de plantas germinadas, assim como massa vegetal, ainda que superior ao branco.

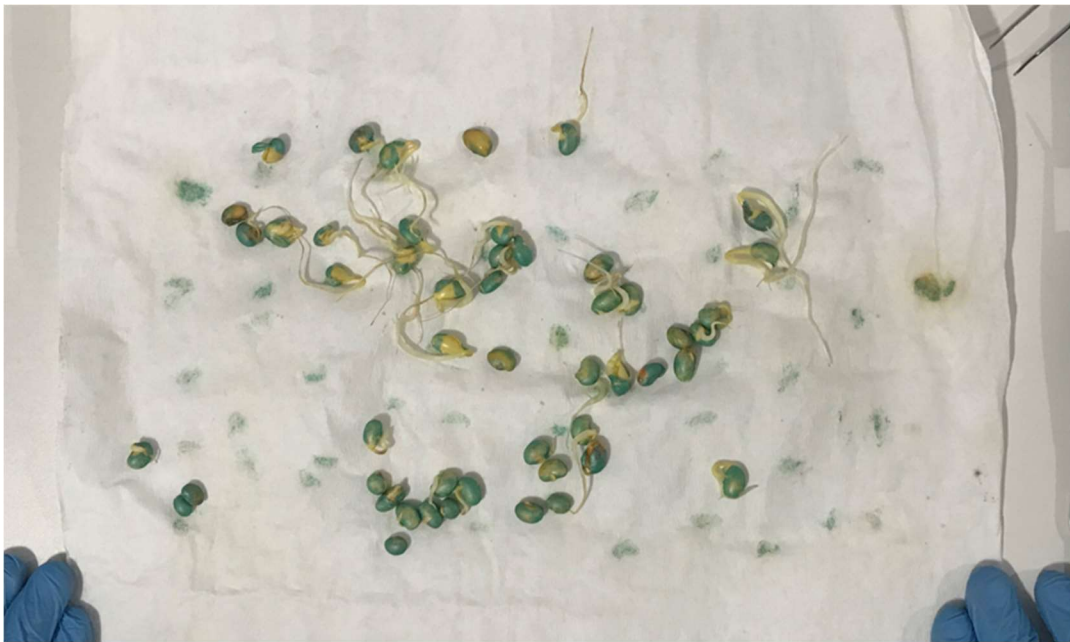
Estes resultados demonstram que a adição dos polímeros ao tratamento de semente de soja é benéfica em termos de melhoria na germinação, sendo o polímero AgRHO 04 o mais recomendado para este fim devido ao seu desempenho superior, seguido pelo AgRHO 02. Aqui mais uma vez confirma-se a observação de que a substituição de hidroxilas livres por grupamentos iônicos é capaz de promover uma mudança de patamar do desempenho dos polímeros estudados, uma vez que o AgRHO 01 não acompanhou os resultados alcançados com os outros dois. A superioridade do resultado obtido com o AgRHO 04 versus o AgRHO 02 é, possivelmente, resultado da cobertura da semente durante a etapa de tratamento: produtos na forma pó são mais difíceis de aderir às sementes com qualidade e uniformidade, sendo recorrente a ocorrência de perda de material mesmo em condições onde a aderência é estimulada através da aplicação de uma calda líquida antes da pulverização do pó. Como consequência, a concentração de polímero pó aderido às sementes é, invariavelmente, menor do que aquela esperada quando da aplicação, afetando o desempenho esperado e se mostrando inferior ao resultado de aplicação alcançado com as formulações líquidas de polímero a 25% de ativo, que é o caso do AgRHO 04. O melhor resultado em germinação deriva-se, portanto, da maior eficiência de gerenciamento hídrico no microambiente ao redor da semente tratada, que provê à planta um aumento da disponibilidade de água, permitindo a ela um desenvolvimento inicial mais robusto ao diminuir consideravelmente a ocorrência de plantas mortas e anormais, sobretudo em um cenário de estresse abiótico, aqui simulado através de restrição de água.

4.5 Germinação em rolo de papel

O desempenho de germinação de sementes de soja tratadas com os diferentes polímeros em estudo, tanto na forma pó quanto na forma líquida, foi avaliado em duas situações distintas relacionadas à disponibilidade hídrica: regular e deficitária (configurando estresse hídrico), em rolo de papel armazenado em estufa por 7 dias. De forma geral, em ambos os ensaios em rolo de papel foi possível notar uma queda de qualidade das plantas germinadas quando em comparação ao ensaio em caixa de

areia, seja através da análise visual da estrutura aérea e radicular ou pela contagem do número de plantas normais e mortas. A figura 29 apresenta o rolo de papel de um dos ensaios realizados, onde é possível notar um número baixíssimo de plantas normais e elevado de plantas mortas.




Figura 29 - Retrato do procedimento de contagem de plantas normais, anormais e mortas após a abertura do rolo de papel. Nesta imagem destaca-se a alta contagem de plantas mortas.



Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados médios de massa vegetal, germinação, plantas mortas e anormais obtidos no ensaio de germinação com disponibilidade hídrica regular em rolo de papel estão apresentados na tabela 13. O grupo estatístico obtido a partir da análise Scott-Knott a 95% de confiança está apresentado ao lado do valor atingido para cada parâmetro.

Tabela 13 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em rolo de papel, sem restrição hídrica para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.

Polímero	Massa Vegetal (g)	Germinação (número de plantas normais)	Número de plantas Anormais	Número de plantas Mortas
Branco	12,38 b	14,17 b	17,67 a	18,17 a
AgRHO 01 	15,73 a	21,17 a	17,00 a	11,83 b
AgRHO 02 	15,38 a	18,67 a	18,00 a	13,33 b
AgRHO 04 	16,22 a	22,67 a	20,17 a	7,17 c




Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados mostram que todos os polímeros apresentaram desempenho estatisticamente diferente do branco nos parâmetros de massa vegetal, germinação de plantas normais e número de plantas mortas, sendo que neste último o polímero AgRHO 04 foi superior a todos os demais, ou seja, com o menor número de plantas mortas. Chama a atenção também que o número de plantas anormais para o polímero AgRHO 04 foi numericamente o maior, embora não estatisticamente diferente. Este é mais um indício do melhor desempenho deste polímero neste ensaio, pois parte dessas plantas anormais ainda poderiam vingar e se tornar plantas saudáveis.

Dessa forma, os fatores indicativos de produtividade indicam que o polímero AgRHO 04 foi o que teve o melhor desempenho entre os estudados, corroborando com os achados em protocolos anteriormente relatados neste trabalho.

Os resultados médios de massa vegetal, germinação, plantas mortas e anormais obtidos no ensaio de germinação com restrição hídrica de 30% em rolo de papel estão apresentados na tabela 14. O grupo estatístico obtido a partir da análise Scott-Knott a 95% de confiança está apresentado ao lado do valor atingido para cada parâmetro.

Tabela 14 - Resultados obtidos a partir do ensaio de germinação de sementes de soja em rolo de papel, com restrição hídrica de 30% para os polímeros AgRHO 01, 02 e 04, além do branco. O respectivo grupo estatístico de cada resultado é apresentado ao lado do valor numérico. Letras diferentes representam resultados estatisticamente distintos.

Polímero	Massa Vegetal (g)	Germinação (número de plantas normais)	Número de plantas Anormais	Número de plantas Mortas
Branco	2,32 c	3,00 b	9,50 b	37,50 a
AgRHO 01 	4,92 b	6,17 b	13,50 b	30,33 a
AgRHO 02 	7,78 a	10,33 a	19,00 a	20,67 b
AgRHO 04 	7,48 a	7,83 a	16,67 a	25,50 b

Fonte: Do Autor (2022)

Sob condições de estresse hídrico, o ensaio de germinação em rolo de papel alcançou resultados ruins em termos de germinação e número de plantas mortas. A hipótese principal é que o déficit hídrico implementado no sistema foi, em termos de impacto no desenvolvimento inicial das plantas, superior àquele aplicado no ensaio em caixa de areia.

Ainda assim, é possível notar que os fatores de produtividade massa vegetal, número de plantas normais e mortas são estatisticamente diferentes para os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 em todos os parâmetros, ao passo que o AgRHO 01 se difere estatisticamente do branco somente na massa vegetal. Este é um mais um indicativo que a presença de grupamentos iônicos na molécula do polímero provê àquele microambiente onde está aplicado uma maior presença de água, fator decisivo para o desenvolvimento inicial das plantas a partir da germinação.

4.6 Ensaio práticos em áreas de teste e comerciais

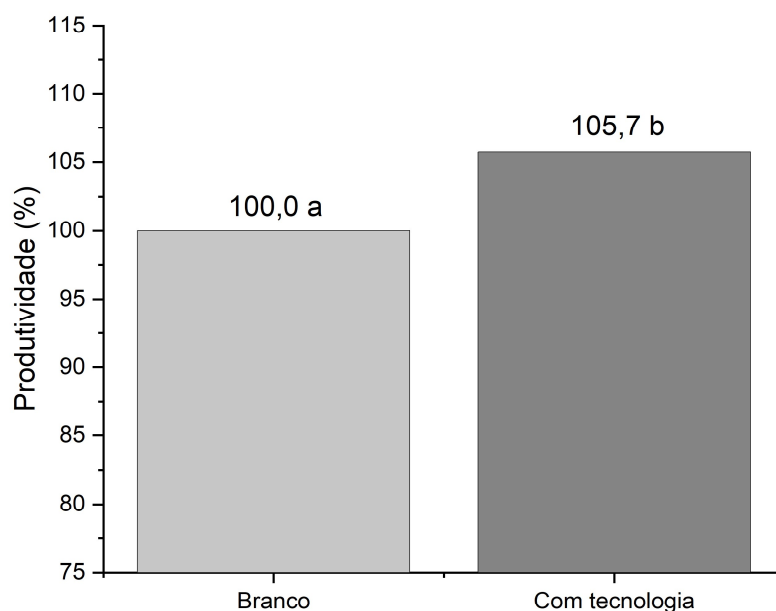
Os polímeros com melhor desempenho nos ensaios prévios foram escolhidos para aplicação à campo em áreas de soja, sob condições reais de semeadura, crescimento e colheita. Neste sentido, os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 foram os escolhidos

para este ensaio. A métrica utilizada para avaliar o desempenho foi a quantidade adicional de sacas de soja por hectare (sac/ha) em relação branco não tratado.

Ao todo 457 áreas foram implementadas e colhidas e os resultados foram submetidos à análise estatística através do programa MiniTab 20, utilizando o método ANOVA Tukey a 95% de confiança. Importante reforçar que, devido às condições operacionais, as áreas escolhidas para o trabalho prático foram distintas entre si, o que significa dizer que não houve áreas tratadas de mesma localização geográfica, portanto não foram submetidas a condições climáticas idênticas. Porém, foram agrupadas de acordo com variáveis de estudo pré-definidas (nível de chuva e tipo de solo) de forma a viabilizar o comparativo de desempenho.

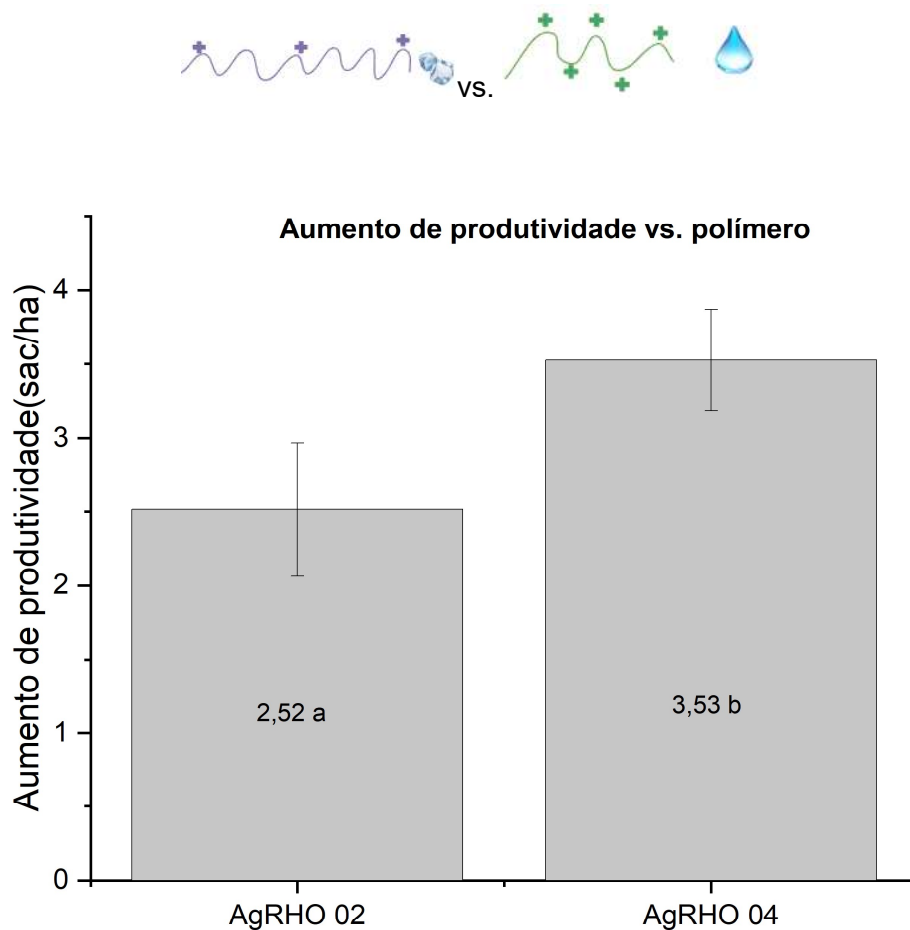
A primeira análise inclui uma avaliação geral e irrestrita da tecnologia de polímeros naturais substituídos, a qual comporta ambos AgRHO 02 e AgRHO 04. Ou seja, independente do modo de aplicação (tratamento de sementes ou sulco de plantio), o compilado total de áreas foi comparado com o branco em termos de incremento percentual; para isso todos os brancos foram definidos como 100%. Os resultados da análise estatística estão apresentados graficamente na figura 30.

Figura 30 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o incremento percentual alcançado com a tecnologia em comparação com o branco



A análise demonstra que a tecnologia aplicada no tratamento de sementes ou no sulco de plantio foi capaz de aumentar a produtividade em 5,7%, sendo este resultado estatisticamente significativo. A partir dessa conclusão, optou-se por avaliar o desempenho médio de cada um dos polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 dentro deste universo de 457 áreas, agora em termos de incremento de sacas por hectare (sac/ha). Novamente, não foi feita distinção entre o método de aplicação. Os resultados estão apresentados graficamente na figura 31.

Figura 31 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o incremento absoluto alcançado com cada um dos polímeros em estudo, independentemente do modo de aplicação

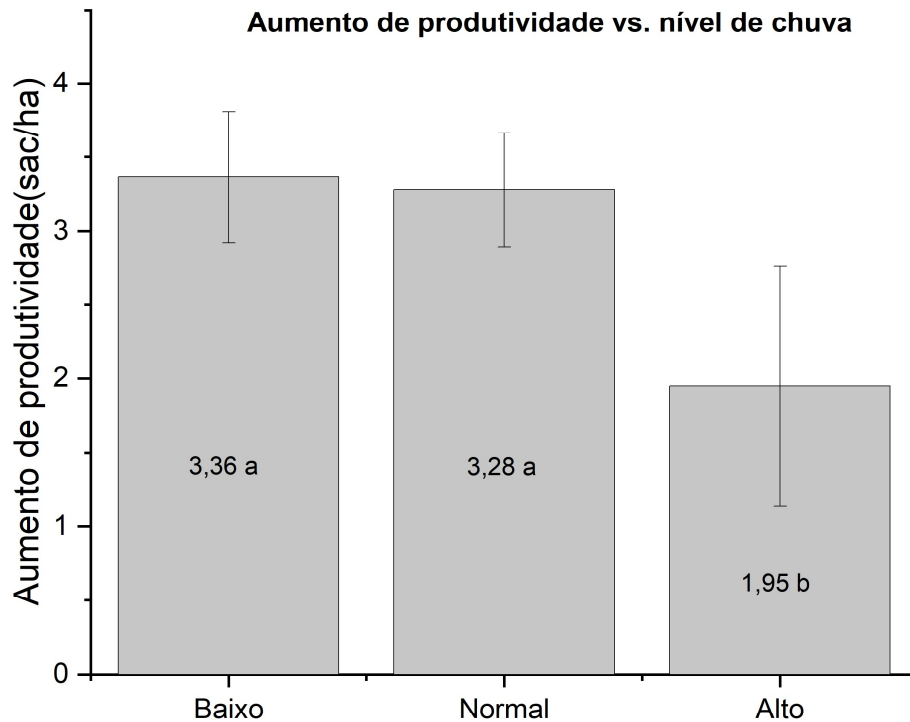


Fonte: Do Autor (2022)

Das 457 áreas implementadas, em 291 foi aplicado o polímero AgRHO 04 a 4 mL/kg de semente ou 0,5 L/ha e em 166 áreas foi aplicado o polímero AgRHO 02 a 4 g/kg de semente. Enquanto é possível concluir que ambos os polímeros testados são eficientes no aumento de produtividade de soja, nota-se que o polímero AgRHO 04 foi capaz de promover um incremento médio de produtividade em relação ao branco maior do que o AgRHO 02: 3,53 versus 2,52 sac/ha a mais. Hipotetiza-se que este resultado é oriundo da maior eficiência de aplicação utilizando a formulação líquida. Como foi observado durante o ensaio de germinação em caixa de areia e rolo de papel, a aplicação e aderência do produto em formulação pó é desafiadora e, fatalmente, a quantidade de polímero efetivamente aderido à semente é menor do que o objetivo inicial - essa perda acaba por diminuir o desempenho do polímero AgRHO 02 em comparação ao AgRHO 04, que possui formulação líquida e um excelente recobrimento das sementes tratadas.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de retenção, elipsometria e germinação discutidos anteriormente e ainda utilizando os dados totais da tecnologia, ou seja, os resultados de produtividade de todas as 457 áreas implementadas, foi realizada a análise estatística com objetivo de avaliar a produtividade média em diferentes cenários de regime de chuva. Os regimes de chuva foram classificados entre baixo, normal e alto, sempre em comparação com o regime pluviométrico médio daquela determinada região onde o ensaio foi implementado. A figura 32 mostra graficamente os resultados dessa análise estatística.

Figura 32 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho da tecnologia em estudo em diferentes regimes pluviométricos (versus a condição regular daquela área)



Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados mostram que o incremento de produtividade médio é estatisticamente superior para regimes pluviométricos abaixo do padrão, quando as plantas estão sujeitas a estresse hídrico, e normais. Quando ocorre um excesso de chuva sobre a lavoura, ainda há incremento de produtividade a partir do uso da tecnologia, porém este incremento é de menor expressão: 1,95 sac/ha versus 3,36 sac/ha quando há falta de chuvas. Importante notar que a fase do desenvolvimento da planta em que essa falta ou excesso de chuvas acometeu a lavoura não foi especificado: ou seja, pode ter ocorrido na semeadura, desenvolvimento inicial, meio do ciclo, colheita ou concomitantemente entre duas ou mais fases do ciclo total.

Este resultado pode ser explicado através de raciocínios complementares: para períodos de seca que acometeram as plantas no início do ciclo (germinação), as

sementes funcionam como um veículo para o polímero influenciar no microambiente ao redor da semente no solo, atraindo água e protegendo a germinação inicial, aumentando o número de plantas por metro e, conseqüentemente, o número de plantas capazes de gerar grãos de soja ao final do período. Caso o período de seca acometa a planta após a germinação, as plantas que receberam o tratamento com o polímero tiveram um desenvolvimento inicial mais robusto, tanto da parte aérea quanto da região radicular, oriundo dessa maior disponibilidade de água durante a germinação. O melhor desenvolvimento radicular de plantas tratadas é peça chave para entender o melhor crescimento dessas plantas, uma vez que permite uma melhor exploração do perfil do solo através de raízes secundárias, que viabilizam maior absorção de macro e micronutrientes essenciais para a planta. A figura 33 apresenta uma imagem comparativa entre plantas retiradas de uma área sem tratamento e outra com tratamento com a tecnologia em estudo, onde é possível observar um melhor desenvolvimento radicular e da parte aérea. Além disso, as plantas com desenvolvimento mais robusto estarão mais saudáveis para passar por um período de estresse abiótico e terão maior resistência, em dias, antes de morrer, proporcionando mais tempo para que o estresse seja suprimido (neste caso através de precipitação) e ela possa restabelecer suas condições ideais de existência. Ainda, como o produto continua no solo ao longo do ciclo da cultura, quando há tratamento existe maior disponibilidade hídrica para aquela planta, servindo como um bolsão de água que irá suprir as necessidades do vegetal por um período mais duradouro do que aquele existente para as plantas que não foram tratadas.

Figura 33 - Comparação entre três plantas de soja retiradas de área sem tratamento (à esquerda) e com tratamento com a tecnologia em estudo (à direita), evidenciando melhor desenvolvimento radicular e da parte aérea a partir da aplicação do polímero



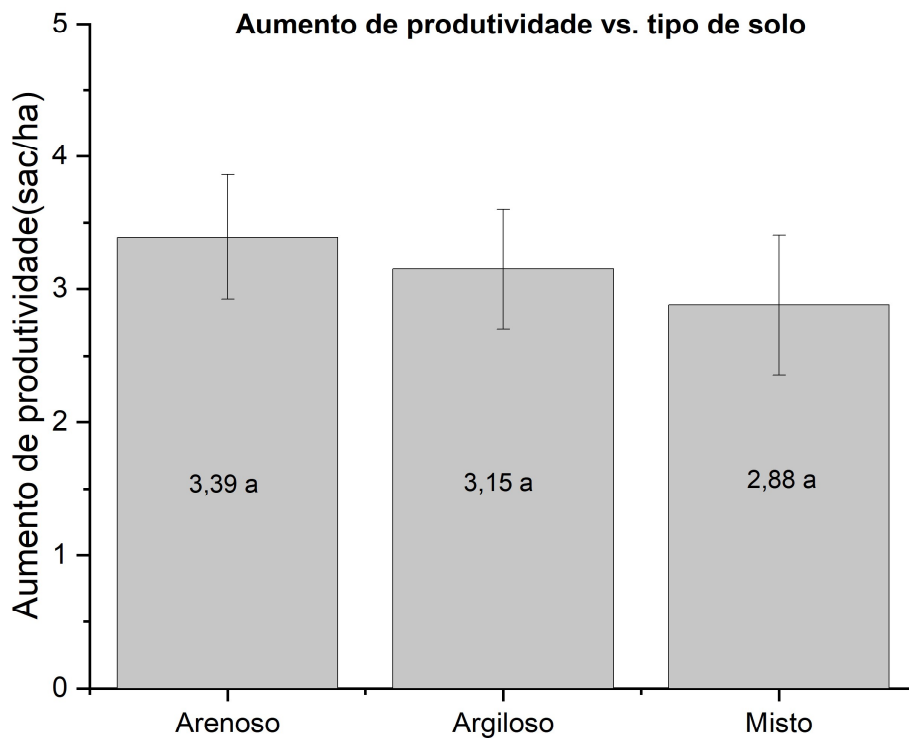
Fonte: Do Autor (2022)

Quando o regime de chuvas está regular, ou seja, sem grandes variações para cima (excesso) ou para baixo (seca), a tecnologia também demonstra um excelente desempenho, estatisticamente equivalente àquele quando há falta de chuva. O mecanismo explorado para o caso de estresse hídrico também é válido, sobretudo pelos efeitos benéficos da tecnologia no estabelecimento inicial da cultura, que acarreta em benefícios de produtividade segundo os resultados obtidos nas áreas em estudo. Já no extremo oposto, quando há excesso de chuvas, a tecnologia perde sua principal janela de oportunidade para impulsionar diferencial competitivo versus o branco não tratado. Ainda assim o resultado é positivo e pode ser explicado também através de melhor estabelecimento inicial e germinação das plantas devido à proteção inicial conferido às sementes pelo polímero, que serve também como um polímero recobridor, impedindo que a semente tenha perdas significativas de água. Hipotetiza-se também que, havendo excesso de chuva, os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 criam um microambiente ao redor da semente e, após germinação, das raízes, que

realiza o gerenciamento hídrico daquela região: uma vez adsorvido naquela região, o polímero serve como uma camada protetora, diminuindo a exposição da planta ao excesso de umidade que pode vir a ser prejudicial, uma vez que há um limite físico para adsorção de água na estrutura polimérica, diminuindo a ocorrência de cenários de encharcamento da região, beneficiando as plantas tratadas.

Uma análise estatística adicional foi realizada com o objetivo de analisar o desempenho da tecnologia aplicada em diferentes tipos de solo: arenoso, argiloso e misto. Os resultados estão apresentados na figura 34 e mostram a produtividade em solos arenosos como numericamente superior, mas não foi possível identificar diferença estatística a partir do método Tukey a 95% de confiança. Ainda sim, é possível notar que a tecnologia entrega resultados robustos nos diferentes tipos de solo, indicando a universalidade das possibilidades de aplicação dos polímeros em estudo.

Figura 34 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho da tecnologia em estudo em diferentes tipos de solo.

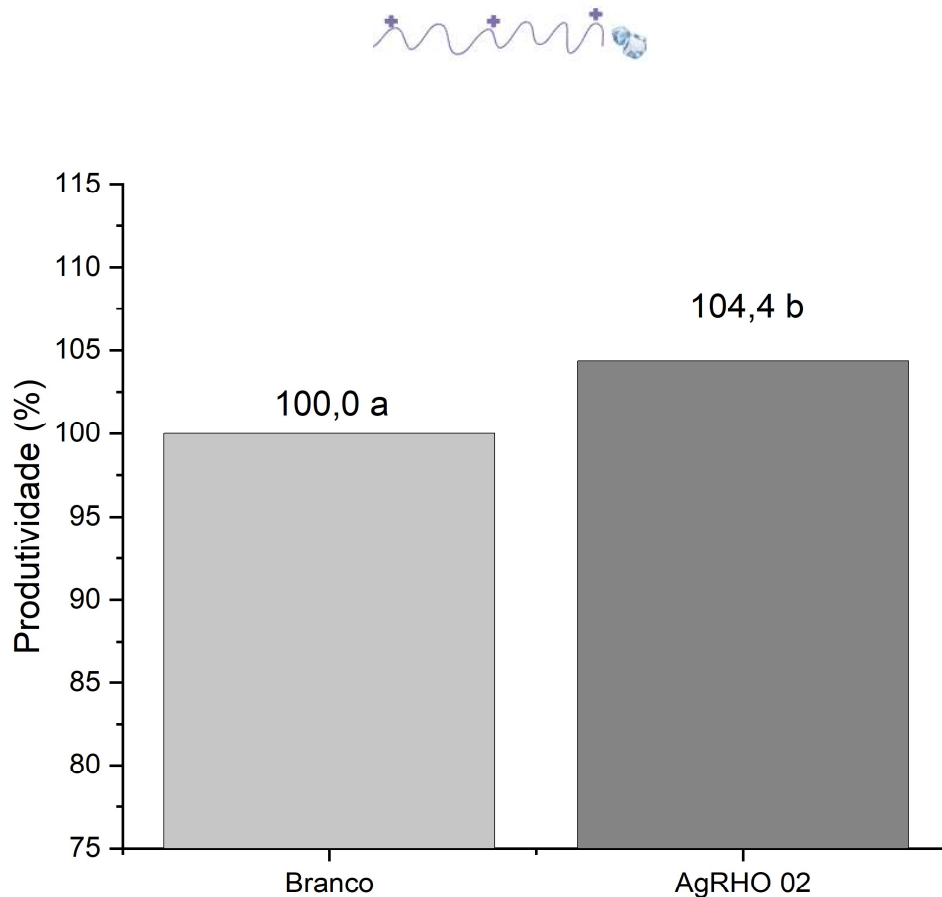


Fonte: Do Autor (2022)

Após a análise da tecnologia como um todo, os polímeros foram avaliados individualmente em relação ao seu desempenho em relação ao branco não tratado e também sob condições diferentes de regimes pluviométricos.

A figura 35 apresenta graficamente os resultados obtidos exclusivamente para o polímero AgRHO 02 aplicado através do tratamento de sementes. O AgRHO 02 promove resultados estatisticamente diferentes do branco ao aumentar a produtividade em 4,37%.

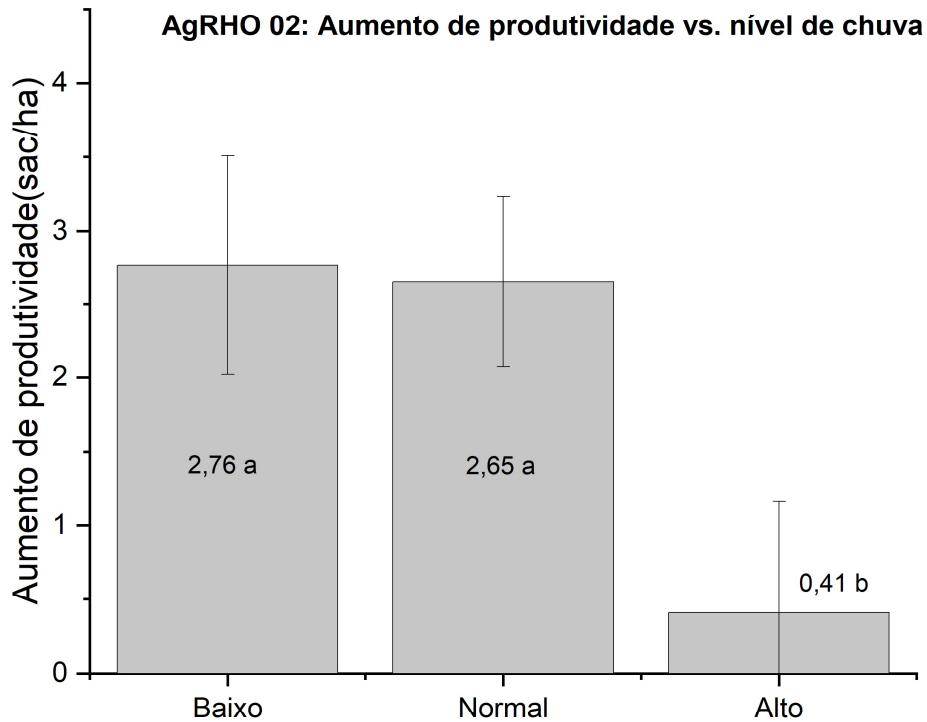
Figura 35 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos a partir do incremento percentual alcançado a partir da aplicação do polímero AgRHO 02 através do tratamento de sementes



Fonte: Do Autor (2022)

Foi realizada a análise estatística sobre a ótica do regime pluviométrico para o polímero AgRHO 02 aplicado através do tratamento de sementes nessas mesmas 166 áreas implementadas.

Figura 36 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho do polímero AgRHO 02 em diferentes regimes de chuva.

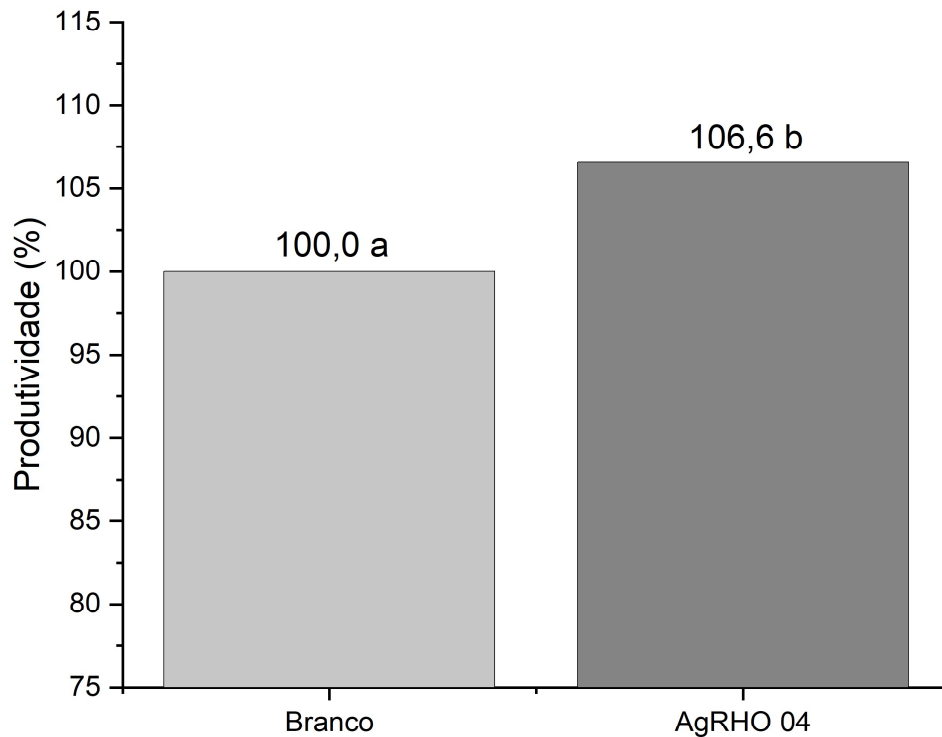


Fonte: Do Autor (2022)

A partir dos resultados apresentados na figura 36, nota-se que o polímero AgRHO 02 também tem seu melhor desempenho quando há falta de chuva ou quando o regime de chuvas é regular (2,76 sac/ha de incremento médio versus 0,41 sac/ha quando há excesso de chuvas). O baixo resultado quando há excesso de chuvas pode ser resultado do baixo número de áreas nessas condições (13 em um total de 166), podendo algum ocorrido discrepante sobre uma dessas áreas puxar a média para baixo, reforçando que são ensaios realizados à céu aberto e suscetíveis às mais diferentes variáveis: químicos utilizados, presença de nematoides, incidência solar, etc. Novamente, o AgRHO 02 se mostra útil para aumento de produtividade em todas as condições de regime de chuva.

A figura 37 apresenta graficamente os resultados obtidos exclusivamente para o polímero AgRHO 04 aplicado através do tratamento de sementes. O AgRHO 04 promove resultados estatisticamente diferentes do branco ao aumentar a produtividade em 6,56%, resultado 2,19 pontos percentuais maior que o alcançado para o AgRHO 02.

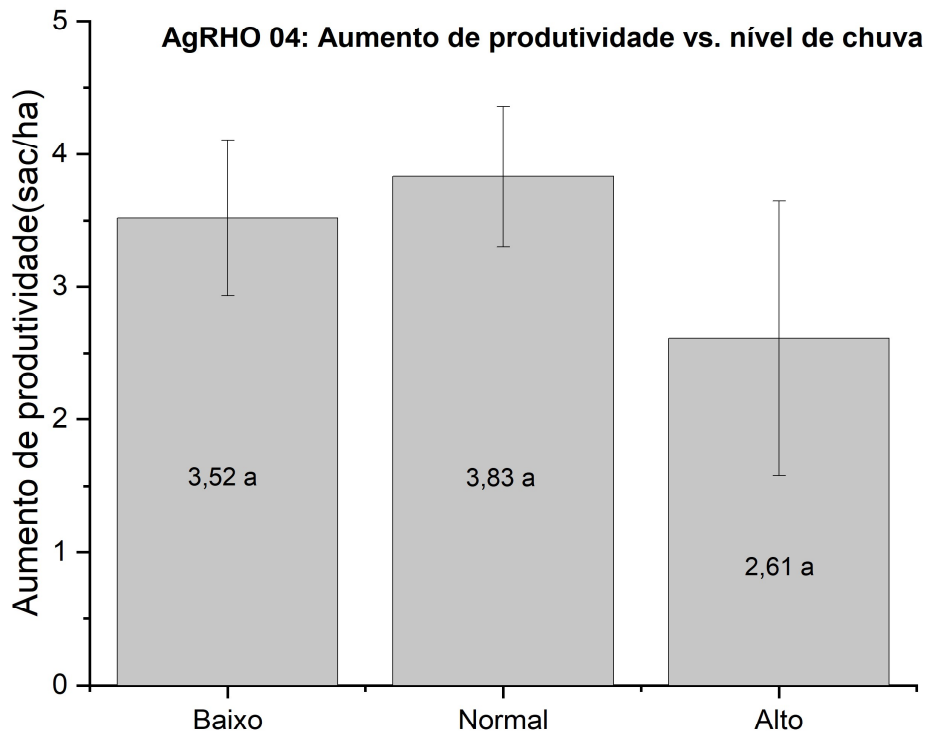
Figura 37 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos a partir do incremento percentual alcançado a partir da aplicação do polímero AgRHO 04 através do tratamento de sementes.



Fonte: Do Autor (2022)

Similarmente ao realizado para o AgRHO 02, também foi realizada a análise estatística sobre a ótica do regime pluviométrico para o polímero AgRHO 04 aplicado através do tratamento de sementes nessas mesmas 262 áreas implementadas.

Figura 38 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho do polímero AgRHO 04 em diferentes regimes de chuva.



Fonte: Do Autor (2022)

De forma consistente com os achados anteriores, a partir dos resultados apresentados na figura 38, nota-se que o polímero AgRHO 04 também tem seu melhor desempenho quando há falta de chuva ou quando o regime de chuvas é regular (3,83 sac/ha de incremento médio versus 2,61 sac/ha quando há excesso de chuvas). O AgRHO 04 também se mostra útil para aumento de produtividade em todas as condições de regime de chuva, atingindo um patamar de incremento de produtividade superior ao AgRHO 02. Por um lado, com base nos achados elipsométricos discutidos anteriormente, o sistema com o AgRHO 04 possui maior capacidade de atração e retenção de nutrientes à microrregião onde aplicado, uma vez que os íons destes nutrientes reduzem a repulsão eletrostática entre as cadeias poliméricas. A partir daí,

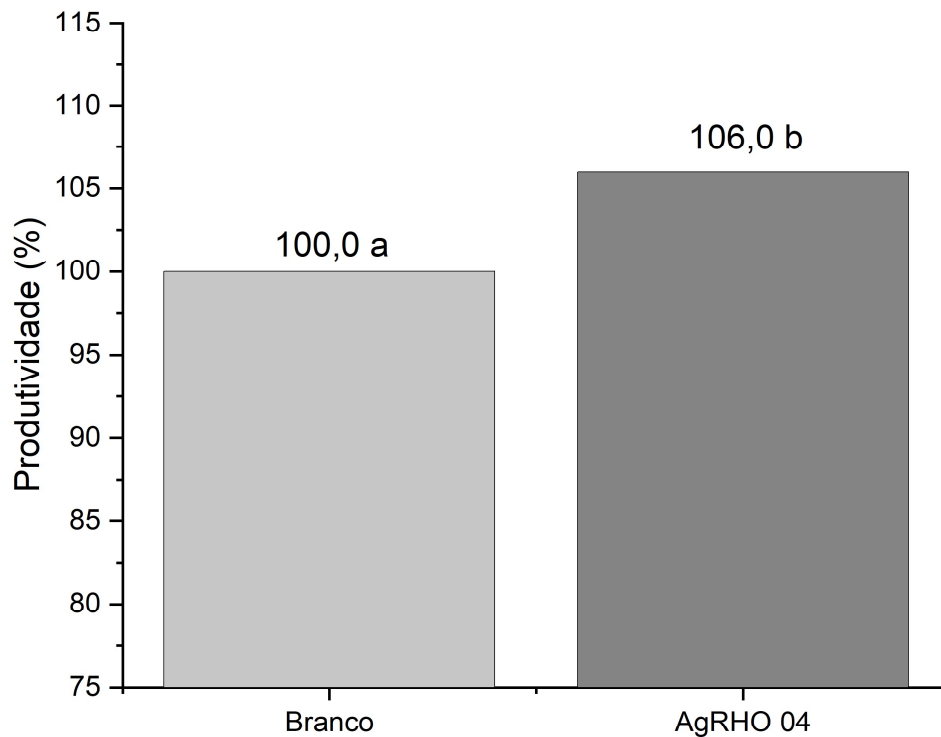
pode-se inferir que nutrientes ficam mais disponíveis ao sistema radicular das plantas, refletindo em melhor desenvolvimento e, por fim, produtividade. Retenção de nutrientes como fósforo, de reconhecida difícil assimilação, é favorecida a partir da aplicação do AgRHO 04. Ademais, o tratamento de sementes utilizando o polímero AgRHO 02 se mostrou extremamente complexo de ser realizado com o maquinário presente nas fazendas, uma vez que a geração de placas ao misturar o polímero na calda líquida de aplicação foi muito comum, sobretudo em máquinas de tratamento de sementes por fluxo contínuo. Além disso, o tempo necessário para atingir a homogeneização do recobrimento era muito alto e impraticável. Todos esses fatores nos permitem inferir que há perda de polímero durante a aplicação, diminuindo a quantidade de ativo disponível para realizar o gerenciamento hídrico no microambiente ao redor da semente e entregar o aumento de produtividade na colheita.

4.7 Ensaios práticos com aplicação do polímero AgRHO 04 no sulco de plantio

Por fim, foram realizados 29 ensaios em áreas teste ou comerciais aplicando o polímero AgRHO 04 no sulco de plantio em conjunto com inoculantes. Com base nos resultados de retenção e elipsometria, que mostraram aumento da retenção hídrica e adsorção do polímero às superfícies negativamente carregadas, estes ensaios buscaram entender se essa modalidade de aplicação também poderia ser uma opção viável a ser explorada comercialmente. O polímero AgRHO 04 foi o escolhido para essa modalidade devido à robustez de resultados alcançados em ensaios anteriores e também devido à sua formulação ser líquida, facilitando a aplicação e promoção comercial do produto em caso de sucesso técnico nos resultados.

A figura 39 apresenta graficamente os resultados de incremento percentual de produtividade alcançado a partir da aplicação do AgRHO 04 no sulco de plantio.

Figura 39 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos a partir do incremento percentual alcançado a partir da aplicação do polímero AgRHO 04 através do sulco de plantio.

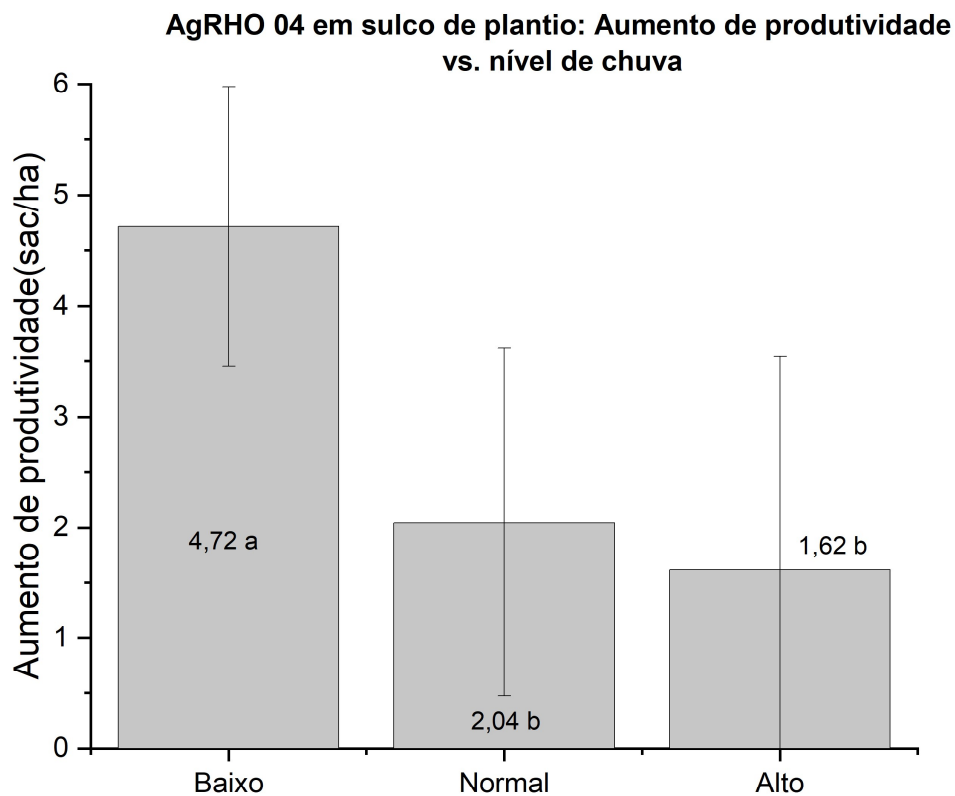


Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados apresentados na figura 40 confirmam que a aplicação do AgRHO 04 no sulco de plantio também é capaz de proporcionar um incremento percentual na produtividade na casa de 5,97%, com diferença estatística versus o branco. Este incremento percentual é comparável àquele obtido para o mesmo AgRHO 04 via tratamento de sementes, confirmando que a dosagem de 0,5 L/ha é a ideal quando o objetivo é parrear o patamar dos resultados em diferentes modalidades de aplicação. Em relação ao regime pluviométrico, os resultados apresentados na figura 40 mostram que em situações de estresse hídrico o desempenho da lavoura é especialmente beneficiado, atingindo um incremento absoluto de produtividade da ordem de 4,72 sac/ha, contra 1,62 sac/ha quando ocorreu um excesso de chuvas. Depreende-se que

a aplicação diretamente no solo, naquela região nas cercanias de onde a semente será semeada, favorece o desempenho daquela lavoura devido à maior quantidade de polímero disponível naquele microambiente, uma vez que a semente servindo como veículo acaba por reter uma fração dos ativos em sua superfície, não liberando a totalidade para o perfil de solo.

Figura 40 - Resultados da análise estatística Tukey a 95% de confiança obtidos comparando o desempenho do polímero AgRHO 04 aplicado em sulco de plantio em diferentes regimes de chuva.

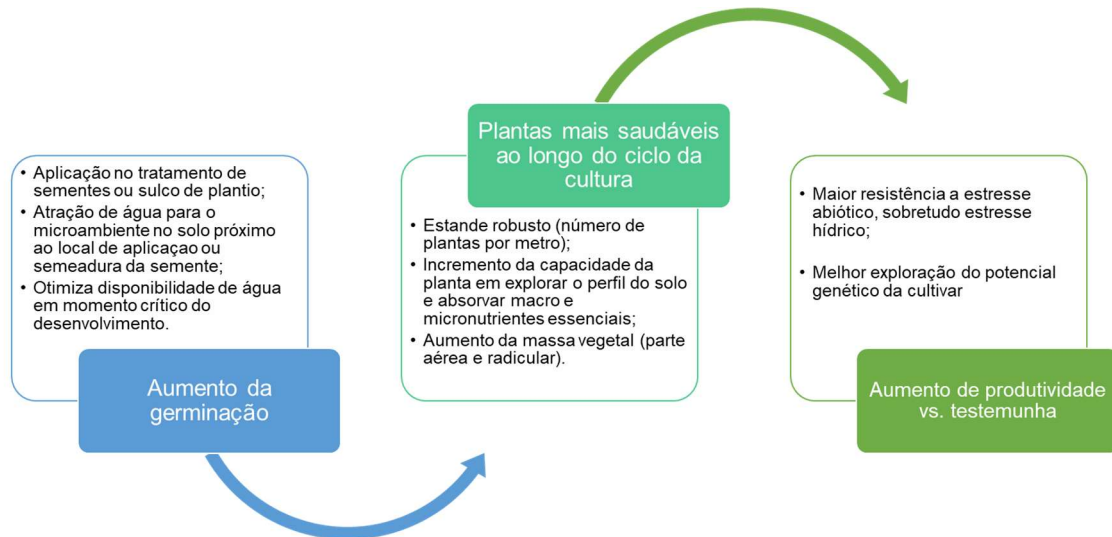


Fonte: Do Autor (2022)

Portanto, a partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados à céu aberto ao redor do Brasil, variando o polímero e o modo de aplicação, além de submeter a tecnologia às mais diferentes condições enfrentadas por lavouras de soja no país, é possível concluir que ambos os polímeros em estudo são capazes de proporcionar, em última instância, um incremento de produtividade oriundo de um mecanismo de atuação

capaz de atrair água para aquele microambiente no qual o polímero está inserido e desencadeando efeitos positivos às plantas desde a sua semente. O esquema apresentado na figura 41 busca representar o mecanismo inicial de ação da tecnologia e como os seus efeitos benéficos desembocam em maior produtividade.

Figura 41 - Esquemática das etapas de atuação dos polímeros em estudo e como elas levam à maior produtividade de áreas tratadas



Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados de campo, além da praticidade de aplicação, sugerem que a melhor viabilidade técnica e comercial reside no polímero AgRHO 04, seja para aplicação via tratamento de sementes ou sulco de plantio.

Como forma de exemplificar a viabilidade comercial da tecnologia, toma-se por base o aumento de produtividade médio em cultura de soja alcançado com o AgRHO 04 neste trabalho: 3,53 sac/ha. Assumindo as seguintes premissas: aplicação de 60 kg de sementes de soja por hectare, utilizando 4 mL de AgRHO 04 por kg de semente, totalizando o uso 0,24 L de polímero por hectare. Essa quantidade por hectare equivale, aproximadamente, ao investimento de uma saca de soja. Portanto, o produtor ao investir uma saca de soja consegue um retorno sobre o investimento (ROI) de aproximadamente 250%, ou 2,53 sac/ha. É, portanto, uma tecnologia que possui potencial de agregar valor aos produtores de soja ao pagar o investimento e gerar lucro através de uma solução de ótimo perfil de sustentabilidade, alinhado às diretrizes da agricultura do futuro, que tem por objetivo aumentar a produtividade ao mesmo tempo que otimiza o uso de recursos naturais (no caso a água) e não onera o meio-

ambiente. Comparativamente a polímeros sintéticos, ainda que poucas informações comerciais estejam disponíveis como reflexo da baixa capilaridade desta tecnologia na agricultura brasileira, conclui-se que os polímeros naturais modificados estudados são superiores aos sintéticos para aplicação na agricultura, pois além de apresentarem um excelente retorno sobre o investimento devido ao seu desempenho, não implicam nas consequências ambientais negativas inerentes ao uso dos polímeros sintéticos, notadamente a contaminação dos solos devido à sua persistência no meio ambiente como reflexo do seu perfil não-biodegradável. Estes polímeros sintéticos, se utilizados, irão gerar ao produtor um custo de remediação ambiental no médio-longo prazo, que afetará a rentabilidade das lavouras.

Para concluir, é possível afirmar que tecnologias dependentes de disponibilidade hídrica serão beneficiadas pela aplicação do AgRHO 04, por exemplo sementes, inoculantes, produtos biológicos e pesticidas, permitindo o posicionamento da tecnologia como adjuvante destas tecnologias ou como polímero recobridor e protetor de sementes.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos permitiram identificar polímeros naturais capazes de elevar a capacidade de retenção hídrica de solos condicionados. Através dos resultados de capacidade de campo ficou evidenciado que, embora a alta massa molar desempenhe um papel importante na elevação de retenção de água, moléculas de alta massa molar e com hidroxilas livres substituídas por grupamentos iônicos conferem a solos arenosos e argilosos uma atração hídrica superior a solos não tratados ou tratados com o polímero sem modificação química. Tal desempenho elevado é decorrente da estrutura tridimensional desordenada assumida pelos polímeros pós adsorção e estabilizada por interações íon-dipolo e ligações de hidrogênio, que permitem a retenção de água no interior dessa microrregião.

A análise conduzida por elipsometria e combinada às imagens obtidas por Microscopia de Força Atômica evidenciam que os polímeros em estudo são adsorvidos em superfícies negativamente carregadas, mimetizando partículas de solo, com aumento da espessura da camada de polímero adsorvido ao longo do tempo de ensaio, indicando que ocorre adsorção multicamadas. O aumento de capacidade de retenção de água ocorre através da adsorção de água nessas camadas.

Sob condições controladas de germinação, os ensaios em caixa de areia e rolo de papel confirmaram que os polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04 são capazes de melhorar o desenvolvimento inicial das sementes, se manifestando através do aprimoramento de fatores de produtividade típicos como número de plantas por metro e massa vegetal (parte aérea e radicular), especialmente sob condições de estresse hídrico, mas não somente. Embora superiores ao branco, os resultados em rolo de papel demonstram que a aplicação dos polímeros em estudo não servem como um seguro contra seca e que demandam uma quantidade de água inicial para que seu efeito benéfico seja visualizado em maior extensão. Ainda que superior ao branco, o polímero AgRHO 01, de alta massa molar, não foi capaz de entregar o resultado alcançado com aqueles modificados quimicamente com os grupamentos iônicos, indicando que essa modificação do caráter iônico da molécula é chave para um desempenho superior. Devido a condições de aplicação distintas como resultado da característica física da formulação, o polímero AgRHO 04 foi aquele que teve seu desempenho em destaque devido aos ganhos alcançados em germinação e massa vegetal, inclusive sob condições de restrição hídrica.

Os ensaios sob condições reais de campo, a céu aberto, confirmam que a melhora de fatores de produtividade como germinação, número de plantas por metro e massa vegetal se traduzem em maior produtividade em sacas de soja ao final do ciclo da cultura, durante a colheita. A aplicação da tecnologia através do tratamento de sementes e sulco de plantio foi capaz de entregar resultados superiores e estatisticamente diferentes do branco, evidenciando que ambas opções são viáveis tecnicamente. Conclui-se que os resultados de produtividade alcançados são provenientes do mecanismo de ação dos polímeros AgRHO 02 e AgRHO 04, que atuam no microambiente ao redor das sementes promovendo atração de água, que permite às sementes uma taxa de germinação otimizada, elevando o número de plantas por metro e sua capacidade de explorar o perfil do solo e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver macro e micronutrientes essenciais ao seu desenvolvimento. Com base nos resultados elipsométricos, é possível concluir que o AgRHO 04, quando no solo, é capaz de reter nutrientes em maior extensão relativa (como o fósforo, de difícil assimilação) em uma região de alcance do sistema radicular das plantas. As plantas tratadas se desenvolvem de maneira mais robusta e saudável, estando menos suscetíveis a estresse abiótico e demonstrando maior resistência caso eventualmente a planta enfrente essas condições. Com base no mecanismo proposto conclui-se também que os polímeros são capazes de potencializar o efeito de tecnologias dependentes de água, como sementes, pesticidas, inoculantes e fertilizantes.

O polímero AgRHO 04 foi aquele que apresentou os melhores resultados nos ensaios realizados e é o recomendado para aplicação seja no tratamento de sementes, seja no sulco de plantio, com potencial de tornar as plantas mais saudáveis e potencializar a produção. Este polímero combina desempenho, viabilidade comercial e excelente perfil de sustentabilidade, sendo recomendada a sua aplicação para aumentar a atração de água e, em última instância, elevar a produtividade das lavouras.

Para trabalhos futuros sugere-se que sejam quantificados os benefícios oriundos do uso da tecnologia estudada sob a ótica da redução de dose aplicada de insumos agrícolas (exemplos: fertilizantes, agroquímicos, inoculantes, etc.) como resultado de maior eficiência de sua utilização, viabilizada pelo efeito adjuvante dos polímeros estudados. Sugere-se, também, que trabalhos sejam realizados visando especialmente a tecnologia de produtos biológicos, em franco crescimento no Brasil.

A origem natural dos polímeros estudados, somados à sua capacidade de aumentar o desempenho de tecnologias dependentes de água, tem excelente potencial de sinergia com tecnologias baseadas em micro-organismos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGÃO, A.; CONTINI, E. O Agro no Brasil e no Mundo: Uma síntese do período de 2000 a 2020. [s.l.] Embrapa, 2021.

ARYAL, J. et al. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*, v. 22, n. 6, p. 5045-5075, 2019.

BAI, H. et al. Interpenetrating polymer networks in polyvinyl alcohol/cellulose nanocrystals hydrogels to develop absorbent materials. *Carbohydrate Polymers*, v. 200, p. 468-476, 2018.

BENNOUR, S.; LOUZRI, F. Study of Swelling Properties and Thermal Behavior of Poly(N,N-Dimethylacrylamide-*co*-Maleic Acid) Based Hydrogels. *Advances in Chemistry*, v. 2014, p. 1-10, 2014.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.; SOARES, A. Manual de irrigação. Tradução . Viçosa, MG: UFV, 2009.

Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CANTERI, M. et al. SASM - Agri : Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scott - Knott, Tukey e Duncan. *Revista Brasileira de Agrocomputação*, n. 1, p. 18-24, 2001.

CARVALHO, R. UM ESTUDO SOBRE A ELIPSOMETRIA COM APLICAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE SI, SIO₂, SNO₂:F, WO₃ E DLC. Mestrado— [s.l.] Universidade Federal da Bahia, 2016.

CEPEA. PIB-AGRO/CEPEA: PIB DO AGRO CRESCE 8,36% EM 2021; PARTICIPAÇÃO NO PIB BRASILEIRO CHEGA A 27,4%. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-pib-do-agro-cresce-8-36-em-2021-participacao-no-pib-brasileiro-chega-a-27-4.aspx#:~:text=Diante%20do%20bom%20desempenho%20do,52%2C63%25%2C%20respectivamente.>>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CHANG, L. et al. Superabsorbent polymers used for agricultural water retention. *Polymer Testing*, v. 94, p. 107021, 2021.

Conab - Portal de Informações Agropecuárias. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

COSTA DE OLIVEIRA, A.; MARINI, N.; FARIAS, D. Climate Change: New Breeding Pressures and Goals. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, p. 284-293, 2014.

Falta de chuva em várias regiões do país compromete o resultado das safras do começo de 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/06/04/falta-de-chuva-em-varias-regioes-do-pais-compromete-o-resultado-das-safras-do-comeco-de-2022.ghtml>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

FITTOLANI, G.; SEEBERGER, P.; DELBIANCO, M. Helical polysaccharides. *Peptide Science*, v. 112, n. 1, 2019.

FOLEY, J. et al. Global Consequences of Land Use. *Science*, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

GUIMARÃES, D.; LANDAU, E. Georreferenciamento dos Pivôs Centrais de Irrigação no Brasil: Ano Base 2020. Sete Lagoas: Embrapa, 2020.

INMET Tempo. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/PrecAcumulada>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

KIM, S. et al. Polyacrylamide Hydrogel Properties for Horticultural Applications. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, v. 15, n. 5, p. 307-318, 2010.

KLESHCHANOK, D.; TUINIER, R.; LANG, P. Direct measurements of polymer-induced forces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, v. 20, n. 7, p. 073101, 2008.

LANDAU, E. Área irrigada por pivôs centrais no Brasil atinge 1,6 milhão de hectares. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/59843654/area-irrigada-por-pivos-centrais-no-brasil-atinge-16-milhao-de-hectares>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

LUTHER KING JR., M. Nobel Prize Acceptance Speech, 1964.

MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, v. 444, n. 2, p. 139-158, 2005.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. REGRAS PARA ANÁLISE DE SEMENTES. Brasília: MAPA, 2009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. World Population Prospects 2019: Highlights. Nova York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

RANE, J. et al. Effective Use of Water in Crop Plants in Dryland Agriculture: Implications of Reactive Oxygen Species and Antioxidative System. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 2022.

RODRIGUES SOUSA, H. et al. Superabsorbent Hydrogels Based to Polyacrylamide/Cashew Tree Gum for the Controlled Release of Water and Plant Nutrients. *Molecules*, v. 26, n. 9, p. 2680, 2021.

ROSER, M. Future Population Growth. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/future-population-growth>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

SCHAUBERGER, B. et al. Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. *Nature Communications*, v. 8, n. 1, 2017.

TANAN, W.; PANICHPAKDEE, J.; SAENG SUWAN, S. Novel biodegradable hydrogel based on natural polymers: Synthesis, characterization, swelling/reswelling and biodegradability. *European Polymer Journal*, v. 112, p. 678-687, 2019.

TUBIELLO, Francesco N. *et al.* Pre- and post-production processes along supply chains increasingly dominate GHG emissions from agri-food systems globally and in most countries. *Earth Syst. Sci. Data*, v. 14, p. 1795–1809, 2022.

VALLINO, E.; RIDOLFI, L.; LAIO, F. Measuring economic water scarcity in agriculture: a cross-country empirical investigation. *Environmental Science & Policy*, v. 114, p. 73-85, 2020.

WANG, Z. et al. Drying tendency dominating the global grain production area. *Global Food Security*, v. 16, p. 138-149, 2018.

WELCH, D. et al. Trains, tails and loops of partially adsorbed semi-flexible filaments. *Soft Matter*, v. 11, n. 38, p. 7507-7514, 2015.

Apêndice A - Comparação estatística entre todos os polímeros estudados no ensaio de capacidade de retenção de campo imediata em solo arenoso

Tabela 15 - Comparação entre a Capacidade de retenção de campo imediata para cada um dos polímeros nas concentrações estudadas em solo arenoso, incluindo as médias e seus respectivos grupos estatísticos

Polímero	Concentração (ppm)	Retenção Média (%)	Grupo Estatístico
Branco	0	32,65	f
AgRHO 01	100	32,93	f
AgRHO 01	400	33,74	e
AgRHO 01	700	34,62	d
AgRHO 01	1000	36,51	c
AgRHO 02	100	35,03	d
AgRHO 02	400	36,01	c
AgRHO 02	700	37,86	b
AgRHO 02	1000	39,53	a
AgRHO 03	100	33,36	e
AgRHO 03	400	32,59	f
AgRHO 03	700	33,93	d
AgRHO 03	1000	34,76	d

Fonte: Do Autor (2022)

Apêndice B - Comparação estatística entre todos os polímeros estudados no ensaio de capacidade de retenção de campo imediata em solo argiloso

Tabela 16 - Comparação entre a Capacidade de retenção de campo imediata para cada um dos polímeros nas concentrações estudadas em solo argiloso, incluindo as médias e seus respectivos grupos estatísticos.

Polímero	Concentração (ppm)	Retenção Média (%)	Grupo Estatístico
Branco	0	51,59	f
AgRHO 01	100	51,47	f
AgRHO 01	400	53,70	d
AgRHO 01	700	54,51	c
AgRHO 01	1000	55,12	b
AgRHO 02	100	52,85	e
AgRHO 02	400	53,45	d
AgRHO 02	700	54,18	c
AgRHO 02	1000	56,92	a
AgRHO 03	100	51,67	f
AgRHO 03	400	52,80	e
AgRHO 03	700	53,15	e
AgRHO 03	1000	53,21	e

Fonte: Do Autor (2022)

Apêndice C - Comparação estatística entre todos os polímeros estudados no ensaio de capacidade de retenção de campo após uma semana em solo arenoso

Tabela 16 - Comparação entre a Capacidade de retenção de campo após uma semana para cada um dos polímeros nas concentrações estudadas em solo arenoso, incluindo as médias e seus respectivos grupos estatísticos.

Polímero	Concentração (ppm)	Retenção Média (%)	Grupo Estatístico
Branco	0	34,56	f
AgRHO 01	100	34,38	f
AgRHO 01	400	35,72	e
AgRHO 01	700	36,44	e
AgRHO 01	1000	37,30	e
AgRHO 02	100	35,60	e
AgRHO 02	400	42,39	c
AgRHO 02	700	49,62	b
AgRHO 02	1000	51,41	a
AgRHO 03	100	35,93	e
AgRHO 03	400	34,64	f
AgRHO 03	700	36,31	e
AgRHO 03	1000	40,21	d

Fonte: Do Autor (2022)