



MANEJO DE SOLOS ARENOSOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

José Luiz Ioriatti Demattê
José Alexandre Melo Demattê



Agosto de 2024

MANEJO DE SOLOS ARENOSOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**DOI: 10.11606/9786587391496****José Luiz Ioriatti Demattê & José Alexandre Melo Demattê**

Profes. Titulares do Departamento de Ciência do Solo

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Universidade de São Paulo

jlid@terra.com.brjamdemat@usp.br

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor - Prof. Dr. Carlos Gilberto Carlotti Junior

Vice-Reitora - Profa. Dra. Maria Arminda do Nascimento Arruda

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"

Diretora - Profa. Dra. Thais Maria Ferreira de Souza Vieira

Vice-Diretor - Prof. Dr. Marcos Milan

Dados de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Demattê, José Luiz Ioriatti

Manejo de solos arenosos: fundamentos e aplicações [recurso eletrônico] / José Luiz Ioriatti Demattê e José Alexandre Melo Demattê. - - Piracicaba : LSO-ESALQ, 2024.

350 p. : il.

ISBN: 978-65-87391-49-6

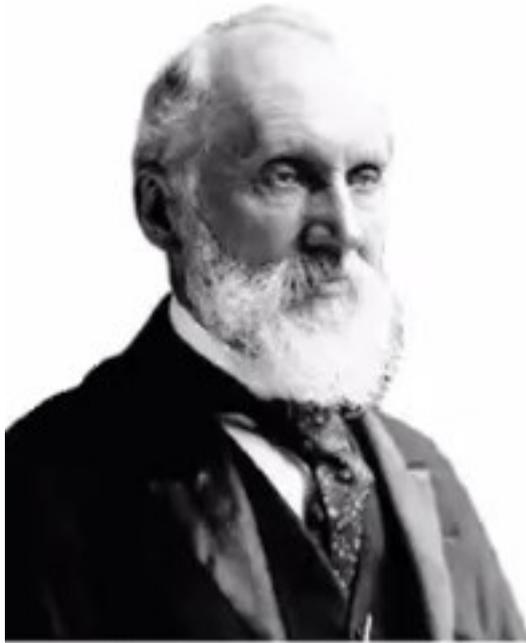
DOI: 10.11606/9786587391496

1. Manejo do solo 2. Produtividade 3. Saúde do solo 4. Solos arenosos 5. Solos tropicais I. Demattê, J. A. M. II. Título. CDD 631.411

Elaborada por Maria Angela de Toledo Leme - CRB-8/3359

Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e a autoria e respeitando a Licença Creative Commons.





To measure
is to know.
If you can not
measure it,
you can not
improve it.

- Lord Kelvin



José Luiz Ioriatti Demattê

José Alexandre Melo Demattê

Agradecimento Especial

O *primeiro autor* agradece a Deus e toda a sua família, em específico sua esposa Rosalda, filhos Érica e Alexandre, netos Enzo, Thais, Matheus, e bisnetos Pietro, Enrico e Vincenzo, pelas alegrias dessa vida. O *segundo autor* agradece a Deus e toda a família em especial sua esposa Teresa pelo apoio em todos os momentos.

Agradecimento Gerais

Os autores agradecem todos aqueles que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Os autores agradecem a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz e a Universidade de São Paulo, pelas oportunidades oferecidas para ensino, pesquisa e extensão. Em específico a USP pelo apoio na publicação deste documento.

Agradecimento especial ao Departamento de Ciência do Solo, local de trabalho dos autores, cuja convivência com outros colegas permitiu o desenvolvimento crítico na temática.

Ao Grupo de Pesquisa Geotecnologias em Ciência do Solo, GEOCIS, o qual contribuiu com inúmeras figuras deste trabalho, bem como no seu desenvolvimento como um todo.

Ao Prof. Marcos Rafael Nanni, pela disponibilização de texto inserido no capítulo 19. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo que permitiu a transcrição do tópico específico em manejo de solos arenosos publicado em uma de suas edições.

Lucas Rabelo, Gabriel Pimenta, Henrique Bellinaso, Letícia Guadagnin Vogel, Merylyn Taynara Accorsi Amorim, Jean Jesus Macedo Novaes, Borges Marfrann Dias Melo, Fellipe Alcantara de Oliveira Mello, Fernando Yutaro Makino, Samuel Silva de Moraes, Bruna Nunes Franchi, Miguel Neves Magalhaes de Paula Mendes, Nélida Elizabet Quiñonez, Lucas Tadeu Greschuk, Aline Cristina Vitti Ramos, Mayara Trevizan.

Créditos figuras e tabelas: Victor Morelli

Créditos capa: Fábio Chaddad (Foto: José Alexandre Demattê, região de Mineiros, Goiás)

Prefácio do Primeiro Autor

José Luiz I. Demattê

Fui aluno da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, (ESALQ), turma de 64. Em setembro de 1965, tornei-me professor iniciando o longo período como consultor e aprendiz, num Brasil que necessitava conhecimento e empreendimento. Fiz o mestrado em 1966, doutorado em 1968 e livre docente em outubro de 1970 junto a ESALQ com menos de 29 anos. Como todo técnico sentiu a necessidade de suprir as falhas do aprendizado e de setembro de 1973 a dezembro de 1975 (dois anos e 90 dias), fez o curso e obteve título de PhD pela Universidade Estadual de Ohio, USA. Em 1980, professor titular junto ao Departamento de Solos e Nutrição Vegetal da ESALQ e tornou-se chefe Departamento de Solos, por 9 anos em diferentes períodos até 96. Aposentou-se em outubro de 1999 e continuou como consultor até 2021.

No período acadêmico criou diversos cursos tanto na graduação como na pós-graduação, como o curso optativo de graduação de Gênese e Morfologia de Solos, que sempre foi muito concorrido nos 25 anos. Orientou 39 teses, sendo 18 de mestrado e 21 de doutorado. Como professor, pode ao trabalhar com os alunos, transmitir as bases para um bom entendimento das características do solo, suas limitações e vantagens, assim como as melhores opções de manejo. Neste particular teve as melhores satisfações que um profissional pode ter tido em sua carreira: foi professor homenageado por 26 vezes. Participou em inúmeras bancas de concurso; publicou livro, capítulo de livros e trabalhos científicos assim como na elaboração do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, trabalhando como consultor e diversas revistas científicas nacionais.

Havia necessidade de estruturar e fortalecer o departamento. Como chefe auxiliou e consolidou a unificação do departamento, na época eram três mundos diferentes, com os professores de três áreas, e um quarto criado por mim, Microbiologia; na contratação de 9 novos professores trazendo pesquisadores de outras instituições para ministrar aulas e orientar docentes; fortalecendo assim a área de ensino e de pesquisa: na abertura de novos rumos de pesquisa e ensino como a introdução da disciplina de Microbiologia de Solos no Departamento, permitindo assim a interação entre as áreas de conhecimento; assim como no apoio e ênfase em novas áreas, como no Uso de Sensoriamento Remoto Aplicado a Solos; no desenvolvimento dos laboratórios, tanto de apoio a pesquisa como para prestação de serviço à comunidade, permitindo excepcional fonte de recursos financeiros para auxílio colocando o departamento

como entidade de destaque nacional. Elaborou o laboratório de Mineralogia de Solos, Difração de Raios X, Análise Térmica Diferencial, Seções Delgadas em Solos, Mineralogia Óptica, ministrou aula inaugural no salão nobre da ESALQ.

Teve a oportunidade de trabalhar nos mais diferentes ambientes climáticos do Brasil, no Semiárido, na Amazônia, no Cerrado, no Pantanal, nos Pampas, não somente na recuperação de solos degradados, mas também na busca do entendimento de como trabalhar adequadamente nos solos do Brasil. Participou em solos arenosos, na área de fruticultura como melão, uva, manga, na região de Rio Grande do Norte. Como especialista em manejo de solos, foi o introdutor da recuperação química de solos em profundidade, principalmente na cultura de cana-de-açúcar.

Grande parte de minhas atividades de 1968 a 2021, em mais de três centenas de usinas, destilarias e fornecedores, foram dirigidas a cultura de cana-de-açúcar, levando-se em consideração os seguintes pontos: diagnóstico dos fatores limitantes envolvendo as características climáticas, do solo, varietal e práticas de manejo. Alternativas de manejo físico, químico e biológico para atenuação dos fatores limitantes. Planejamento na alocação das variedades em função de um plano pré-estabelecido de sequência de safra. Estabelecimento dos ambientes de produção em função dos grupos de solos. Novas áreas de produção.

Prefácio do Segundo Autor

José Alexandre M. Demattê

Formado na Universidade Federal de Lavras, entrou como professor auxiliar no Departamento de Ciência do Solo da ESALQ em 1992, e contratado em 1994. Finalizou o doutorado em 1995 e Livre docência em 1998, sendo titular em Sensoriamento remoto em 2015. Iniciou na área de pedologia ainda na graduação (1987) tendo vários professores como orientadores. Ao ser apresentado do Prof. Geraldo França, a época o mais conceituado pedólogo atuante na área de Fotopedologia, mostrou grande interesse pela área, tendo iniciado em sensoriamento remoto nos mais diversos níveis. Logo ao entrar no departamento, focou na estruturação desta área, em comunhão com pedologia, manejo e planejamento de uso da terra. Face a intensa ramificação de temas em sensoriamento remoto em solos, foi criada a área 'Sensoriamento remoto aplicado a Solos' e posteriormente abrindo o leque para 'Geotecnologias Aplicadas em Ciência do Solo', sendo a primeira a ser desenvolvida no Brasil. Como professor das disciplinas em graduação 'sensoriamento remoto aplicado a solos', 'planejamento do uso da terra', 'manejo de solos', 'fertilidade do solo', 'pedologia' e 'manejo e

conservação do solo', fundando na criação e participação da disciplina 'Tecnologia do Solo'. Adentrou em pedometria e sensoriamento remoto, sempre focando na base solo visando maior produtividade com preservação. Mantém contato com a área de Agricultura de precisão. Na prática, já mapeou mais de 15.000.000 de ha nos diferentes níveis ultra-detalhado, detalhado, semi-detalhado, reconhecimento, exploratório e esquemático. Já mapeou solos no Paraguai, Colômbia, México, Ghana e Angola. Avaliou mais de 300.000 pontos de tradagens e 8000 trincheiras, incluindo as questões de manejo e ambientes, em 22 estados da federação. Ministrou aproximadamente 8000 horas em graduação, 3000 horas em pós-graduação e 900 em especialização, tendo transmitido a um total aproximado de 10000 alunos (todos os níveis). Orientou (contabilizados todos os tipos), 400 alunos. Publicou 370 artigos científicos em revistas e 250 em eventos. Editor associado de Revistas Nacionais e Internacionais. Coordenador do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicado a Solos e Planejamento do Uso da Terra. Membro dos grupos de pesquisa: European Geoscience Union; World Soil Spectroscopy Group; Digital Soil Mapping; Digital Soil Morphometrics; Pedometrics; Rede Brasileira de Mapeamento Digital de Solos; Levantamento e Mapeamento de solos; Agricultura de precisão. Como Coordenador de Grupos: Espectroscopia de Reflectância de solos do Brasil (CNPq), Grupo de Pesquisa Geotecnologias em Ciência do Solo (Geocis). Global Soil Satellite Sensing Group (GOSSATS) e Soil Health. Envolvido em pesquisas focadas em solos e produção tendo por base as geotecnologias sensoriamento remoto, geoprocessamento, levantamento e mapeamento de solos, mapeamento digital, agricultura de precisão, planejamento do uso da terra, manejo e ambientes de produção. Atualmente adentra em saúde do solo, carbono e produtividade. Coordenador do Laboratório de Espectroscopia da ESALQ (Nível Premium-Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, FAO); Curso Nacional e Internacional (ProBASE, Programa Brasileiro de Análise de Solo via Espectroscopia-ASA, Agricultura, Solo, Ambiente); Ministra aula no curso em especialização Manejo de Solos; Biblioteca espectral do Brasil (com mais de 60 pesquisadores de todos os estados); coordena mapeamentos no mundo (com pesquisadores de 4 continentes). Como membro: Grupo Pronasolos (Embrapa), World Soils (Agência Espacial Européia), Proantar (Pro-Antartida), Biblioteca Espectral de Solos do Mundo (FAO), Grupo SoilSpec4GG (Soil Spectroscopy for Global Good). Participa da missão Pro-Antartida. Já ministrou cursos em Israel e Rússia. Membro Científico da Brazilian Soil Health Partnership (BSHP), iniciativa vinculada ao Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical (CCARBON). Participou do manejo em várias culturas como cana de açúcar, eucaliptos, citrus e grãos. Realizou inúmeros trabalhos relacionando o solo com seu potencial produtivo. Tal formação, permitiu

ver o solo de forma holística e visão multidisciplinar, motivando contribuir com o desenvolvimento deste livro.

Mensagem dos Autores: Fome no Mundo e os Solos Arenosos

A fome no mundo assim como a falta de área para o plantio, aliado na urbanização crescente e acelerada, alteração nos hábitos alimentares, têm tirado áreas nobres para a produção de alimentos, como tem sido observado, o êxodo de habitantes das pequenas cidades para os grandes povoamentos fez com que as terras arenosas fossem necessárias para a produção de alimentos nobres, tais como que soja, algodão, milho, eucalipto, tidos como culturas de solos mais argilosos. Na nossa opinião, as terras arenosas do mundo todo, e no Brasil, fazem parte da cadeia alimentar, nos seus diversos ambientes como o climático e a falta de água. Tais solos tidos como no passado, reservado para sobrevivência alimentar, atualmente devem ser considerados como produtores de alimento mais nobres. Felizmente esta posição tem sido mudada, inclusive no Brasil, em relação ao tema, sendo que as terras arenosas podem e devem ser cultivadas tais como solos mais argilosos. Cabe a nós usuários de solos, através de tecnologia, ter que desenvolver na produção de alimentos, utilizando a bioquímica ou outros sistemas, como fator de aumento na produção de alimentos. Como vê, o setor agrícola terá que arcar com solos arenosos, com as crescentes restrições físicas de recursos naturais, cada vez mais raras no mundo. De fato, melhorar os solos arenosos em suas mais diferentes nuances, inclusive sua saúde (soil health), terá impacto no denominado saúde humana (human health) por nutrir com alimentos para sua adequada nutrição.

Sumário

Prefácio do Primeiro Autor	5
Prefácio do Segundo Autor	6
Mensagem dos Autores: Fome no Mundo e os Solos Arenosos.....	8
CAPÍTULO 1:.....	18
1.1. INTRODUÇÃO.....	18
1.2. O GRANDE DESAFIO: FOME NO MUNDO	18
1.3. O ENTENDIMENTO DO SIGNIFICADO DE SUSTENTABILIDADE	20
1.4. INTERAÇÃO ENTRE NUTRIENTES E SOLO	21
1.5. OS PILARES DA EVOLUÇÃO DO SISTEMA AGRÍCOLA E AS ANÁLISES DE SOLOS	21
1.6. SOLOS ARENOSOS EM COMPARAÇÃO COM SOLOS ARGILOSOS	22
1.7. TIPOS DE SOLOS ARENOSOS	22
1.7.1. Vantagens e Limitações dos Solos Arenosos	24
1.7.2. A importância da camada de subsuperfície do solo e seu impacto na produtividade agrícola	26
CAPÍTULO 2:.....	27
2.1. SOLOS ARENOSOS NO BRASIL	27
2.2. MANEJO DE SOLOS	27
2.3. PERSPECTIVAS E DESAFIOS EM RELAÇÃO AOS SOLOS ARENOSOS.....	31
CAPÍTULO 3:.....	33
3.1. PREPARO DE SOLOS ARENOSOS.....	33
3.2. SISTEMAS DE PREPARO CONVENCIONAL (PC) EM ÁREA DE FLORESTA	33
3.3. PREPARO CONVENCIONAL (PC) TRANSITANDO PARA PLANTIO DIRETO (PD).....	34
3.4. PLANTIO DIRETO (PD) EM SOLO ARENOSO	35
3.5. VANTAGENS DO SISTEMA DE PD	36
3.6. LIMITAÇÕES DO SISTEMA DE PD	36
3.7. FERTILIDADE DOS SOLOS NO PLANTIO DIRETO	37
3.8. FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGENS, CORRETIVOS	39
3.9. PRODUTIVIDADE DE SOJA	39
3.10. A BUSCA DA PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SOLOS ARENOSOS.....	40
3.11. SISTEMA LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (ILPF).....	40
3.12. SOJA: EXIGÊNCIA DA CULTURA, FATORES LIMITANTES DOS SOLOS ARENOSOS	43
3.13. NUTRIÇÃO DE SOJA DE TERRAS ARENOSAS DO BRASIL CENTRAL	43
3.14. EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOJA E OUTRAS CULTURAS	44
3.15. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS PARA SOJA	45

3.16. TEOR DA MATÉRIA ORGÂNICA E CTC	45
3.17. A QUANTIDADE DE PALHA E O TEOR DE NITROGÊNIO.....	49
3.18. SOJA NO SISTEMA LAVOURA – PECUÁRIA – FLORESTA (LPF).....	51
3.19. O PAPEL DO CÁLCIO NOS SOLOS EM CULTURAS ANUAIS E PERENES	52
3.20. TEORES DE BASES (Ca+Mg+K) EM CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR, VARIAÇÕES DE pH 7,0 A 4,5.....	53
CAPÍTULO 4: CULTURAS DE COBERTURA	55
4.1. ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS	55
4.2. CULTURAS DE COBERTURA	55
4.2.1 Principais Características das Plantas de Cobertura.....	57
4.2.2. Exemplos de Culturas de Cobertura nos Tabuleiros de Uberaba	58
4.3 PLANTAS DE COBERTURA: PAPEL DA BRACHIARIA BRIZANTHA.....	61
4.4. CULTURAS DE PROTEÇÃO EM SISTEMAS AGRO-FLORESTAL	62
4.5. CULTURAS DE COBERTURA EM SOJA EM SOLO ARENOSO.....	63
4.6. CULTURAS DE COBERTURA NO SISTEMA SOJA-MILHO-ALGODÃO.....	64
4.7. NUTRIENTES E CULTURAS DE COBERTURA UTILIZADAS NA BAHIA.....	65
4.8. CULTURA DE LIMÃO COM BRAQUIÁRIA	66
4.9. BRACHIÁRIA NA INTEGRAÇÃO AGRICULTURA E PECUÁRIA NO PD.....	67
4.10. CULTIVO CONSORCIADO DE MILHO E GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS.....	68
4.11. SISTEMAS PARA SEMEADURA DE BRAQUIÁRIA E DO MILHO.....	68
4.12. PRODUTIVIDADE NO PLANTIO DIRETO (PD) E CONVENCIONAL (SC) NO OESTE BAIANO...	69
4.13. PLANTIO REDUZIDO EM CULTURA SEMI-PERENE E PERENES	70
4.14. PREPARO REDUZIDO EM CANA-DE-AÇÚCAR.....	70
4.15. PLANTIO REDUZIDO EM ÁREA DE EUCALIPTO	73
4.16. PLANTIO DIRETO DE CITRUS EM ÁREA DE PASTAGEM DE BRACHIARIA	74
4.17. SOLO EM POUSIO	75
4.18. CANTERIZAÇÃO NO PREPARO DE SOLO PARA CULTURAS PERENES.....	75
4.19. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA EM ROTAÇÃO.....	76
4.20. BENEFÍCIOS DE CULTURAS DE SAFRINHA	77
4.21. ÉPOCA DE PLANTIO DO MILHETO COMO CULTURA DE COBERTURA E QUANTIDADE DE SEMENTES.....	78
4.22. MILHETO COMO FORRAGEIRA	79
4.23. O HERBICIDA E O PD E A MARCAÇÃO PARA A CULTURA PRINCIPAL.....	79
CAPÍTULO 5:.....	80
5.1. INTEMPERISMO E ROCHAS.....	80

5.2. INTEMPERISMO BIOGEOQUÍMICO	81
5.3. PROCESSOS DE OXI-REDUÇÃO	83
5.4. AÇÃO DA ÁGUA NA DESTRUIÇÃO DOS MINERAIS E A LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES.....	84
5.5. PROCESSOS DE FORMAÇÃO DOS MINERAIS DE SOLOS (2:1, 1:1, ÓXIDOS).....	84
5.6. REAÇÕES DA SUPERFÍCIE DOS MINERAIS	87
5.7. QUÍMICA DO ALUMÍNIO E A IMPORTÂNCIA DO CALCÁRIO.....	87
5.8. QUÍMICA DO FERRO E AÇÃO DO CALCÁRIO.....	89
5.9. QUÍMICA DO MANGANÊS DE pH DEPENDENTE.....	90
5.10. SISTEMA DE MANEJO.....	90
5.11. QUÍMICA DA SÍLICA EM SOLOS.....	90
CAPÍTULO 6:.....	92
6.1. FORMAÇÃO DE SOLOS ARENOSOS E O PROCESSO DE INTEMPERISMO	92
6.2. TAXA DE INTEMPERISMO	95
6.3. PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE SOLOS	95
6.4. PERFIL DO SOLO.....	96
6.5. NÍVEIS CATEGÓRICOS DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO BRASILEIRA DE SOLOS.....	97
6.6. SEPARADOS E A TEXTURA DOS SOLOS ARENOSOS	98
6.7. TEXTURA DOS SOLOS	100
6.8. ESTRUTURA DOS SOLOS	101
6.9. FORMAÇÃO DE AGREGADOS (FLOCULAÇÃO E DISPERSÃO DOS COLÓIDES DOS SOLOS) ..	103
6.10. FORMAÇÃO DE MICRO AGREGADO COM MATÉRIA ORGÂNICA (MO).....	104
CAPÍTULO 7:.....	105
7.1. MANEJO DA MATÉRIA ORGÂNICA	105
7.2. BASES PARA O ENTENDIMENTO DO MANEJO DA MATÉRIA ORGÂNICA	107
7.3. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM REGIÃO TROPICAL E TEMPERADA	109
7.4. DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA CANA-DE-AÇÚCAR: BIODEGRADÁVEL E PASSIVA ...	110
7.5. ATIVIDADE BIOLÓGICA.....	111
7.6. PERDAS DE CO	111
7.7. FATORES QUE AFETAM O ESTOQUE DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	113
7.7.1. Textura e mineralogia de solo	113
7.8. FATOR k INFLUENCIADO PELO CLIMA (TEMPERATURA E ALTITUDE)	114
7.9. IMPORTÂNCIA DO SISTEMA RADICULAR E QUANTIDADE DE MOS PRODUZIDA.....	115
7.10. AUMENTO DA QUANTIDADE DE MO ADICIONADA AO SOLO ARENOSO (FATOR b).....	115
7.11. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA ATIVA E CTC EFETIVA DO SOLO.....	117

7.12. TEOR DE OXIGÊNIO EM FUNÇÃO DE SOLOS ARENOSOS	118
7.13. VINHAÇA COMO FONTE DA MATÉRIA ORGÂNICA DECOMPONÍVEL (Fator <i>b</i>).....	119
7.14. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS VEGETAIS (Fator <i>b</i>)	120
7.15. MATÉRIA ORGÂNICA DE ADUBOS VERDES E DE OUTRAS CULTURAS (Fator <i>b</i>)	121
7.16. COBERTURA DA PALHA E DECOMPOSIÇÃO DEVIDO TEMPERATURA	123
7.17. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NOS SOLOS DE SÃO PAULO	124
7.18. MUDANÇAS QUÍMICAS NA RIZOSFERA E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA	125
CAPÍTULO 8:.....	127
8.1. A PALHA NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	127
8.2. FONTES NITROGENADAS NAS SOQUEIRAS COM PALHA	128
8.3. CULTIVO DE SOQUEIRA COM PALHA	130
8.4. INCONVENIENTES DO PREPARO REDUZIDO EM CANA-DE-AÇÚCAR.....	132
8.5. NUTRIENTES MÓVEIS E IMÓVEIS NOS SOLOS	132
8.6. MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO EM SUCESSÃO CONTÍNUA EM CULTURAS ANUAIS EM PD E CONVENCIONAL.....	133
8.6.1. Demanda de Fósforo em PD	134
8.7. TEORES DE K, Ca e Mg E EFEITOS DA ACIDIFICAÇÃO	134
CAPÍTULO 9: PROPRIEDADES QUÍMICAS RELEVANTES	135
9.1. PROPRIEDADES DA ÁGUA	135
9.2. O pH DA SOLUÇÃO DO SOLO	136
9.3. A CONSTRUÇÃO DA FERTILIDADE DOS SOLOS.....	137
9.4. DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E O pH.....	137
9.5. SOLUÇÃO DO SOLO	140
9.6. POROSIDADE DO SOLO	141
9.7. DUPLA CAMADA DIFUSA (DCD).....	142
9.7.1. Espessura da Dupla Camada	142
9.8. SOLUÇÃO DO SOLO E A QUANTIDADE DE ÍONS.....	143
9.9. ADSORÇÃO IÔNICA E AS SÉRIES DE CÁTIOS E ÂNIOS	144
9.10. SÉRIE LIOTRÓFICA.....	145
9.11. ADSORÇÃO ESPECÍFICA	146
9.12. RELAÇÃO ENTRE CÁTIOS TROCÁVEIS E O pH	146
9.13. VALORES UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE SOLOS.....	147
9.14. O pH, A SATURAÇÃO DE BASES E SOLOS DE MINERALOGIA OXÍDICA	150
CAPÍTULO 10:.....	152

10.1. CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS (CTC)	152
10.1.1. CTC Permanente e CTC Dependente de pH	153
10.2. CAPACIDADE DE TROCA ANIÔNICA (CTA)	154
10.3. CARGAS POSITIVAS E AS REAÇÕES COM FÓSFORO E ENXOFRE (SULFATO)	154
10.4. AÇÃO DO SO_4^{2-} NA SUBSUPERFÍCIE DE SOLOS MUITO INTEMPERIZADOS	156
10.5. AÇÃO DO ÂNION ESPECÍFICO NA MELHORIA DOS SOLOS NA SUBSUPERFÍCIE	158
10.6. FORMAÇÃO DE CARGAS NOS COLOIDES DE SOLOS INTEMPERIZADOS	159
10.7. CARACTERÍSTICAS DE CARGAS DE MINERAIS DA FRAÇÃO ARGILA	160
10.8. EQUILÍBRIO QUÍMICO	161
10.9. VALORES DE PCZ E O SISTEMA DE MANEJO	162
10.10. PODER TAMPÃO DOS SOLOS	164
CAPÍTULO 11:.....	166
11.1. DENSIDADE E COMPACTAÇÃO DO SOLO	166
11.2. DENSIDADE DE PARTÍCULA E DENSIDADE DO SOLO	166
11.3. ALTERAÇÃO DA MACRO E MICRO POROSIDADE DO SOLO	167
11.4. COMPACTAÇÃO E A POROSIDADE AO AR	168
11.5. DENSIDADE DE SOLOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM PROFUNDIDADE DE PERFIS LATOSSÓLICOS E ARGISSOLOS	169
11.6. PRODUTIVIDADE DO MILHO EM PLANTIO DIRETO DEVIDO A COMPACTAÇÃO	171
11.7. TEOR DE OXIGÊNIO E ABSORÇÃO DE POTÁSSIO E FÓSFORO E O CRESCIMENTO RADICULAR	171
11.8. ESCARIFICAÇÃO COMO AUMENTO DA OXIGENAÇÃO DOS SOLOS	172
11.9. AÇÃO DOS SISTEMAS DE PREPARO CONVENCIONAL E DOS PNEUS DOS EQUIPAMENTOS	174
11.10. USO “PENTA” EM SOLOS DE TEXTURA ARENOSA NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR	176
11.11. AÇÃO DAS RAÍZES NUM SOLO ARENOSO COMPACTADO	178
11.12. SISTEMA RADICULAR EM PROFUNDIDADE NUM SOLO ARENOSO COM CANA-DE-AÇÚCAR	180
11.13. EFEITOS BENÉFICOS DA COMPACTAÇÃO	181
11.14. ALTERNATIVAS PARA ATENUAR O SISTEMA DE COMPACTAÇÃO	182
11.15. COMPACTAÇÃO DE SOLOS: UM PROBLEMA ANTIGO	183
CAPÍTULO 12: A ÁGUA NO SOLO	184
12.1. ASCENSÃO CAPILAR	184
12.2. POTENCIAL DA ÁGUA DO SOLO	184
12.3. EQUIVALÊNCIA ENTRE AS UNIDADES	186

12.4. SOLOS ARENOSOS E A COMPACTAÇÃO	186
12.5. FLUXO DE ÁGUA NO SOLO	187
12.5.1 Fluxo Saturado	187
12.5.2. Fluxo em Solo Não Saturado	188
12.5.3. Fluxo de Movimento da Água em Forma de Vapor	188
12.5.4. Fluxo Preferencial da Água.....	188
12.6. INFILTRAÇÃO E PERCOLAÇÃO	189
12.7. MOVIMENTO DA ÁGUA EM SOLOS ESTRATIFICADOS.....	190
12.8. PERIGOS DE RASPAGENS, QUEDA DE PRODUTIVIDADE	191
12.9. FATORES QUE AFETAM A INFILTRAÇÃO	192
12.10. TEORES DE UMIDADE DO SOLO	193
12.11. PROFUNDIDADE DO SOLO E QUANTIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL	195
12.12. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO (CAD)	195
12.13. RETENÇÃO DE ÁGUA ALÉM DO PMP.....	197
12.14. FATORES QUE AFETAM A QUANTIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) DO SOLO PARA AS PLANTAS.....	198
12.15. ADIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA.....	198
12.16. RELAÇÃO SOLO-PLANTA-ATMOSFERA (SPA).....	199
12.17. EFEITO DA COMPACTAÇÃO NO POTENCIAL MATRICIAL, AERAÇÃO E CRESCIMENTO DAS RAÍZES.....	200
12.18. RELAÇÃO ENTRE CAD, TEXTURA DO SOLO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO	201
12.19. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	202
12.20. CONTROLE DE PERDAS DE VAPOR DE ÁGUA (ETP).....	203
12.21. PERDAS LÍQUIDAS DE ÁGUA DO SOLO.....	203
12.22. SISTEMAS DE MANEJO PARA AERAÇÃO DO SOLO	204
12.22.1. Troca de Gases.....	205
12.23. PROCESSOS AFETADOS PELA TEMPERATURA DO SOLO	205
12.24. Formato dos grânulos de areia e retenção de água	206
12.24.1. Transferência de Calor	207
CAPÍTULO 13: MANEJO DO FÓSFORO.....	208
13.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO FÓSFORO	208
13.2. REAÇÕES DO FÓSFORO (P).....	209
13.3. FATORES QUE DEFINEM A DISPONIBILIDADE DO FÓSFORO	210
13.4. DIFERENÇAS NA CONCENTRAÇÃO DE P	211
13.5. DIFUSÃO DO FÓSFORO E ABSORÇÃO PELAS RAÍZES.....	211

13.6. FORMAS DE FÓSFORO.....	213
13.7. FOSFATOS NATURAIS	214
13.7.1. Solubilização Fosfatos Naturais Reativos	216
13.7.2. Fosfatos Naturais (FN), solúveis e calcários	217
13.8. APLICAÇÃO DE FOSFATOS REATIVOS (FNR) EM EUCALIPTO.....	218
13.9. EFICIÊNCIA AGRONÔMICA EM CULTURAS ANUAIS - FOSFATOS NATURAIS E SOLÚVEIS	219
13.10. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA - CULTURAS ANUAIS E PASTAGENS - FOSFATOS REATIVOS E SOLÚVEIS	220
13.11. FATORES QUE AFETAM A FIXAÇÃO.....	221
13.11.1. Mineralogia.....	221
13.11.2. Textura.....	222
13.11.3. Cor do Solo	223
13.11.4. Práticas Para Redução das Cargas Positivas do Solo (pH e teor de P)	224
13.12. PROFUNDIDADE DE APLICAÇÃO DO FÓSFORO NO SOLO	227
13.13. TEMPO DE REAÇÃO ENTRE O FÓSFORO E O SOLO	228
13.14. COMBINAÇÃO DE DOSES E MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE P EM CULTURAS ANUAIS	229
13.15. COMBINAÇÃO DE DOSES E MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE P EM CANA-DE-AÇÚCAR	230
13.16. ASSOCIAÇÃO DO P COM MICORRIZA	231
13.16. INTERAÇÕES DO FÓSFORO COM OUTRAS PRÁTICAS	232
13.17. FATORES QUE AFETAM AS RELAÇÕES ENTRE O P DO ADUBO E O DA SOLUÇÃO DO SOLO	234
13.18. EXPORTAÇÃO MÉDIA DE P e K EM CULTURAS ANUAIS	235
13.19. FOSFATAGEM.....	235
13.19.1. Quantidade a Ser Aplicado de Fósforo na Fosfatagem	236
13.19.2. Vantagens do Sistema	237
13.19.3. Fonte de P a Ser Utilizada na Fosfatagem.....	238
13.19.4. Decisões a Respeito da Fonte em Área de Fosfatagem em Pastagens.....	239
13.20. APLICAÇÃO DE P EM SOQUEIRA DE PASTAGENS	240
13.20.1. Nível de Manejo na Implantação de Pastagens	241
13.21. EXTRAÇÃO DOS NUTRIENTES DAS LEGUMINOSAS E PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR..	241
13.22. ALTERNATIVAS DE MANEJO DO P	242
CAPÍTULO 14: MANEJO DO NITROGÊNIO, POTÁSSIO, ENXOFRE, CÁLCIO, MAGNÉSIO E MICRONUTRIENTES.....	244
14.1. NITROGÊNIO.....	244
14.1.1. Dinâmica do Nitrogênio nos Solos.....	245

14.1.2. Disponibilidade	245
14.1.3. Resposta das Culturas	246
14.1.4. Perdas de Ureia Aplicadas na Superfície	247
14.2. POTÁSSIO	247
14.2.1. Disponibilidade do Potássio	247
14.2.2. Potássio nas Plantas	249
14.2.3. Respostas de Culturas a Potássio e Sistemas de Manejo	249
14.2.4. Quantidade a Ser Aplicada em Função das Culturas	250
14.3. MANEJO DO ENXOFRE, CÁLCIO E MAGNÉSIO	251
14.3.1. Enxofre	251
14.3.2. Teores de Cálcio e Magnésio	251
14.4. MANEJO DE MICRONUTRIENTES	252
14.4.1. Características dos Micronutrientes	253
14.4.2. Fatores Que Afetam a Disponibilidade dos Micros.....	255
14.4.3. Composição de Micros.....	256
14.4.4. Micro e Solubilidade.....	257
14.4.5. Sugestões de Uso	258
14.5. ADUBAÇÃO FLUIDA	259
14.6. USO EFICIENTE DOS FERTILIZANTES	260
14.7. O USO DE ROCHA MOÍDA COMO FERTILIZANTE	261
14.7.1. Tipos de Rocha, Processos que Afetam, Tipos de Rochagem.....	263
14.7.2. Respostas à Rochagem.....	264
14.8. TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA OS FERTILIZANTES	265
CAPÍTULO 15.....	267
15.1. CALAGEM	267
15.2. PROCESSOS DE ACIDIFICAÇÃO DOS SOLOS	268
15.2.1. Acidificação dos Solos e o Calcário.....	269
15.3. AÇÃO DOS RESÍDUOS VEGETAIS NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO	271
15.4. MICROBIOMA DO SOLO	272
15.5. MÉTODOS DE RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVO	273
15.6. QUEDA DE NUTRIENTES EM RELAÇÃO AO TEMPO – CULTURAS ANUAIS E PERENES.....	275
15.7. PROFUNDIDADE DE INCORPORAÇÃO DO CALCÁRIO	276
15.8. TEMPO DE REAÇÃO DO CORRETIVO EM CULTURA ANUAIS E CANA-DE-AÇÚCAR	278
15.9. SUPER CALAGEM	279

15.10. CORREÇÕES EM PROFUNDIDADE PELO GESSO	279
15.11. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO GESSO EM RELAÇÃO AOS SOLOS	280
15.12. GESSO E O TEOR DE MAGNÉSIO	281
15.13. GESSO E PRODUTIVIDADE E O SISTEMA RADICULAR DO MILHO	282
15.14. GESSO E O AUMENTO DO TEOR DE ÁGUA DISPONÍVEL DOS SOLOS	283
15.15. GESSO E AUMENTO DA PRODUTIVIDADE EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	284
15.16. GESSO E DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS E AUMENTO DA MATÉRIA SECA DA LEUCENA.....	285
15.17. INTRODUÇÃO DE CÁLCIO PELO CALCÁRIO, GESSO E CLORETO	285
15.18. PROCEDIMENTO DO USO DO CALCÁRIO E DO GESSO	287
15.18.1. Mistura do Calcário Com o Gesso	287
15.18.2. Recomendações do Gesso	288
15.18.3. Respostas de Culturas Anuais e Perenes ao Gesso	290
15.18.4. Testes Biológicos Para a Recomendação de Gesso.....	290
CAPÍTULO 16.....	292
16.1. EROSÃO DE SOLOS ARENOSOS.....	292
16.1.1. Processos de Erosão Hídrica	294
16.2. PRÁTICAS MECÂNICAS E VEGETATIVAS	295
16.3. OPERAÇÕES DE PREPARO DE SOLOS NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	297
16.3.1. Alteração nos Talhões de Cana-de-Açúcar no Sentido de Melhorar as Eficiências da Mecanização	298
16.4. OUTRAS ATIVIDADES USADAS NO CONTROLE DA EROSÃO	299
16.5. SEQUÊNCIA DE EVENTOS NA LAVOURA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	300
16.6. USO DE MODELAGEM NO CONTROLE DA EROSÃO HÍDRICA.....	300
16.7. SULCAÇÃO VIRTUAL	302
16.7.1. A Sulcação Reta e o Sistema Conservacionista	303
16.8. CONCEITO DE DESERTIFICAÇÃO E DEGRADAÇÃO DOS SOLOS.....	306
CAPÍTULO 17: Resumo geral	308
CAPÍTULO 18: AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE SOLOS ARENOSOS	316
CAPÍTULO 19: NECESSIDADE DE DESENVOLVIMENTO	317
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	319
Referências Bibliográficas.....	321

CAPÍTULO 1:

1.1. INTRODUÇÃO

Em relação aos solos arenosos, pouca bibliografia nacional está disponível. Encontram-se em larga escala estudos voltados a solos de texturas mais argilosas. Isso porque, por muito tempo, o uso das terras arenosas limitava-se ao cultivo de pastagens e culturas como eucalipto, arroz e cana-de-açúcar ou culturas de subsistências. Porém, com o advento do Plantio Direto, as culturas de cobertura e os Sistemas de Floresta-Agricultura-Pecuária, assim como o conhecimento das limitações desses solos, tais usos têm se diversificado e melhorado.

Entre os grandes problemas das terras do Brasil, independentemente de apresentarem solos argilosos ou arenosos, está a baixa produtividade relacionada aos elevados valores de alumínio em profundidade. Este é um dos principais gargalos a ser vencido. Em relação a este aspecto, o calcário, assim como o desenvolvimento em profundidade do sistema radicular por meio dos sistemas biológicos e químicos, são os tópicos básicos para contornar este problema.

1.2. O GRANDE DESAFIO: FOME NO MUNDO

Tem sido publicado em diversos artigos, inclusive científicos, que a tendência da população mundial dos atuais 8 bilhões de pessoas em 2022 para 9 bilhões ou mais de pessoas em 2050. Tal fato não deixa de ser um acentuado desafio, em que o setor agrícola terá que desenvolver tecnologia, principalmente na produção de alimentos, utilizando a bioquímica ou outro sistema, como fator de aumento na produção de alimentos, apesar dos inconvenientes encontrados (Demattê & Nanni, 2018). A urbanização crescente e acelerada, tem selecionado áreas nobres para a produção de alimentos. Tem-se observado o êxodo de habitantes das pequenas cidades para os grandes povoamentos, o que não deixa de ser um fator negativo nesta situação, pois estariam abandonando as terras em busca de outras atividades não agrícolas.

Porém, a mudança nos hábitos alimentares ao redor do mundo estaria também encarecendo o sistema agrícola. Neste sistema, passando de áreas de sobrevivência, considerado um nível muito baixo de consumo com 1,3 bilhão de habitantes, localizado em determinadas regiões do mundo, como Ásia Rural e África, para níveis mais elevados, mais exigente, inclusive com alimentos enriquecidos de micronutrientes e complexos de vitaminas. Com 1,0 bilhão de habitantes, regiões como Estados Unidos da América, Europa Ocidental, Japão, demandarão sempre mais por alimentos mais nobres.

Como vê, o setor agrícola terá que arcar com as crescentes restrições físicas de recursos naturais, cada vez mais raras no mundo, de modo que já há estudos para explorar no espaço, por exemplo, no planeta Marte ou nos Asteroides, que objetivam, entre várias outras metas, buscar minerais raros no espaço para agricultura. A questão da mão de obra, cada vez mais especializada, não deixa de ser um fator de encarecimento do setor agrícola, assim como as novas ocupações de área, fazendo com que haja um aumento nos custos de produção etc.

Em outras palavras, nos próximos 30 a 40 anos o setor agrícola deverá gerar um volume de alimentos semelhante ao que foi produzido nos últimos milênios. De fato, seria este um tremendo desafio para o setor, que, seguramente, deverá entrar no tema solos de textura mais arenosa, para auxiliar esta grande demanda por alimentos. Tanto é que se estima 64% da camada superficial dos solos do mundo seja arenosa aumentando os riscos de degradação bem como necessidade de cuidados especiais. De acordo com Donagemma et al. (2016) 'O entendimento do funcionamento desses solos depende do estabelecimento de critérios distintivos sobre: dinâmica da matéria orgânica; teor e mineralogia da fração argila; teores de areia grossa e de areia total, em relação aos de areia fina; diâmetro médio da fração areia; e capacidade de retenção de água. Esses critérios podem contribuir para o zoneamento e para o manejo conservacionista e da fertilidade dos solos leves, bem como para estimativa de seu potencial agrícola. Sistemas integrados de produção, como os de integração lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta, além do plantio direto com rotação de culturas, dos plantios florestais mistos com espécies leguminosas, e do uso de adubos verdes e cultivos de cobertura, são relevantes para o manejo adequado desses solos'.

Entretanto, as características de tais solos, inclusive os diversos sistemas de manejo, principalmente para água e nutrientes, têm sido restritos para áreas de pastagens. Essa tendência pode degradar ainda mais essas terras por falta de condições e de informações, ocasionando abandono da área e deixando que condições que favoreçam a erosão agravem-se de maneira a dificultar sua recuperação.

Por outro lado, a tecnificação tem permitido o avanço e migração de produtores de grãos em solos arenosos. A tecnificação permite manejar estes solos extraindo o máximo de sua produtividade. Recente publicação no Jornal da USP ((julho 2024-<https://jornal.usp.br/ciencias/no-brasil-indices-ambientais-reduzem-productividade-agricola-que-tecnologia-ajuda-a-elevar/>), avaliou a tecnificação e relação com produtividade e ambiente em 510 microrregiões do Brasil. Os resultados mostraram que o crescimento da produtividade não é homogêneo entre estas microrregiões. Mais que isso, observou-se que, se de um lado a

tecnificação está ajudando no aumento da produtividade, de outro a qualidade dos solos está diminuindo. Ou seja, algo que ajuda a elevar, não está sendo bem utilizado. Ao nosso ver, isso está na falta do entendimento dos fundamentos do manejo, que estão sendo negligenciados em favor do uso das tecnologias avançadas. Logo, deve-se juntar estas duas variáveis para se atingir o máximo de produtividade, com qualidade ambiental, e melhor custo-benefício.

Tal fato é o objetivo deste livro, o de fornecer informações básicas para o sucesso do empreendimento agrícola nas terras arenosas.

1.3. O ENTENDIMENTO DO SIGNIFICADO DE SUSTENTABILIDADE

Tem sido muito divulgado nos meios científicos o termo sustentabilidade. Entretanto, a sustentabilidade e o desenvolvimento podem ter diferentes significados para diferentes pessoas, portanto, o termo em si depende das pessoas. Existem muitas definições formais feitas por vários autores e instituições ligadas ao tema. Sustentabilidade, envolve relações homem-natureza, tendo um enfoque em condições econômicas, termo este sendo incompleto para definir desenvolvimento. Porém, o termo desenvolvimento, seria uma conceituação mais difícil de entendimento, pois alguns adicionam uma dimensão ecológica ao termo, chamando-a de codesenvolvimento, sendo confundido com sustentabilidade. Entretanto, hoje seria o moderno em termos de sustentabilidade, porém posteriormente num contexto diferente pode ser considerado como um enorme erro de perspectiva futura. No contexto atual não é fácil conceituar sustentabilidade quando se enfoca a realidade. O que seria sustentável? Sustentável para que e para quem? No contexto seria a sociedade atuar. Mas vem a pergunta: qual o tipo de sociedade, rural ou urbana, de um município ou de um estado, ou país?

De qualquer maneira os esforços devem ser dirigidos para um mundo atual e não para um mundo idealizado; se não pudermos fazer o melhor com todas as tecnologias existentes, dificilmente estaremos preparados para atingir o melhor.

Em 1992 Den Bosch em declaração na FAO considerou que o termo “sustentável” implicaria numa série de afirmativas a saber: “É uma agricultura que conserva o solo, a água e os recursos genéticos animais, vegetais e microrganismos; não degrada o ambiente; é tecnicamente apropriada; economicamente viável e socialmente aceitável”. Concluindo foi enfatizado que: “Nenhum de nós pode vislumbrar o futuro para saber o que é sustentável”. O

que se pode saber é: “criar sistemas que sejam mais sustentáveis do que os do passado”. Portanto, um sistema agrícola sustentável, deve alicerçar-se nos aspectos ecológicos, sociais e econômicos e deve haver vontade política na sua realização (Resende M. et al., 2002).

1.4. INTERAÇÃO ENTRE NUTRIENTES E SOLO

O sistema solo é um complexo de reações e normas que fica difícil separá-los pois na maioria das vezes eles agem em conjunto. Assim é que o solo é constituído por um composto de sólido e poros e neste meio, com a água e o ar, ocorrem as principais reações. Assim é que o solo fornece nutrientes e moléculas através de um sistema de troca de íons entre uma fase sólida e uma fase de íons na solução. Tais íons serão absorvidos pelo sistema radicular das plantas havendo neste sentido uma série de inconvenientes no transporte para que tais íons cheguem às raízes. Nas raízes tais íons necessitam ser absorvidos através dos sistemas de absorção das plantas assim como os principais caminhos que os nutrientes e água possam ir até as folhas e frutos. Neste caminho as reações de íons e moléculas serão transformadas em alimentos. Finalmente a água, por evapotranspiração, vai para a atmosfera. Tais sistemas, todos eles, fazem parte desta grande interação entre o solo, como fornecedor de nutrientes, aliado a água e as plantas, assim como a atmosfera.

Em seu trabalho Lindsay (1979) coloca a “Solução do Solo” em relação aos demais sistemas no solo e argumenta que sem a “Solução do Solo” nada poderia ser feito em termos de produção de alimentos. Entretanto, há três conceitos básicos que podem ser separados a saber: a solução do solo, a reação do solo e as propriedades que o solo apresenta para absorver nutrientes e proceder a troca de íons e absorção pelas plantas (Novais R.F et al., 2007).

1.5. OS PILARES DA EVOLUÇÃO DO SISTEMA AGRÍCOLA E AS ANÁLISES DE SOLOS

Plantio Direto na Palha (com plantas de cobertura), Sistemas de Biologia (como fixação do N atmosférico através de microrganismos na cultura de soja), Sistemas Agro - Florestal, (utilizado culturas, pastagens e florestas), seriam os três alicerces da evolução do sistema agrícola brasileiro. Porém muitas alternativas de sistemas de manejo ainda virão, como o sistema designado “Estado de Evolução de Solos”, em relação às análises de fertilidade de solos.

Neste aspecto, a Embrapa assim como diversos pesquisadores no Brasil, estão embasados a respeito da evolução das análises de solos assim como incorporar outros sistemas. As análises atuais são determinações físico-químicas com base nos nutrientes, assim como as relações destes nutrientes que as culturas precisam para completar seu ciclo.

Os solos tropicais são inférteis, pH dependentes, com teores de alumínio em profundidade, variação do teor de oxigênio em profundidade, períodos secos acentuados, suprimento de água inadequados, havendo necessidade de evoluir para sistemas relacionados ao complexo de matéria orgânica e da biologia dos solos, que são os bioindicadores de “Qualidade do Sistema Solo”. As análises de enzimas entre as quais a beta glicosidase (ciclo do carbono), arilsulfatase (ciclo do enxofre) e fosfatase ácida (ciclo do fósforo), são parâmetros de saúde do solo (Mendes, et al., 2018; Andreote et al. 2017). Outros elementos estão adentrando nesta questão como teor de carbono, estoque de carbono, densidade do solo e atributos químicos (Cherubin et al., 2016, 2021). Atualmente tais sistemas, e outros, estão evoluídos com curvas de calibração e pesos a respeito de cada função, produtividade de algumas culturas, sendo que o sistema seria um outro marco para o Brasil.

1.6. SOLOS ARENOSOS EM COMPARAÇÃO COM SOLOS ARGILOSOS

Não se pode dizer que terras arenosas são diferentes das terras mais argilosas somente pelo teor de argila. Elas são diferentes em diversos sistemas como na compactação, nas relações das frações areias, na rugosidade de suas frações mais grosseiras, na água disponível, na profundidade, na recuperação química, na atividade biológica, na granulometria etc., e na própria definição de terras arenosas. A questão de a produtividade agrícola ser menor nestas terras, está mais relacionada ao conhecimento de suas limitações, através de um bom diagnóstico, para depois estar relacionado as atividades de manejo. O nível de manejo empregado, mais ou menos avançado também influencia. Logo, a produtividade é dependente do conhecimento da terra em que se trabalha.

1.7. TIPOS DE SOLOS ARENOSOS

De acordo com o Sistema de Classificação de Solos os Neossolos Quartzarênicos, RQ (Areias Quartzosas), são solos de classe textural areia ou areia franca (teor de argila igual ou

menor que 15%) em profundidade variável ou até 1,50 m, de sequência de horizontes A/C, bem a excessivamente drenados, essencialmente quartzosos nas frações maiores que argilas, praticamente ausência de minerais alteráveis. De maneira geral são perfis de carga variável e, portanto, pH dependente, caulíníticos e óxidos na fração argila e de baixa CTC e de matéria orgânica (EMBRAPA, 2018). Também são caracterizados por ter mais de 95% de quartzo na fração areia.

Por outro lado, se encontra diversos tipos de solos arenosos, inferior a 25% de argila, com perfis latossólicos, podzolizados e argissolos, podendo ocorrer num mesmo relevo, ou com perfis de latossolos, nas partes mais elevadas do relevo, os argissolos num relevo intermediário e Areias Quartzosas nas partes mais baixas, ou inverso.

Há solos arenosos em sedimentos recentes próximos aos grandes rios, como na Amazônia, com diversas deposições dependendo da intensidade das enchentes ao longo do tempo, inclusive minerais decomponíveis. Neste tipo de formação pode haver solos de profundidade variável, que podem ser utilizados para sistema de agricultura desenvolvida num relevo plano e fácil de serem trabalhados.

Solos arenosos formados por deflúvio, sendo a encosta de basalto recoberto de arenitos, de fertilidade variável. Solos arenosos formados também por intemperismo onde se observa a formação de podzóis, ou de planossolos de textura mais arenosa, como na região semiárida. Solos arenosos sobre basalto; solos arenosos provenientes da Formação Barreiras no nordeste do Brasil, solos coesos, com fragipã e duripã em profundidades variáveis, assim como bloqueamento de poros em todo perfil etc. Os argissolos desenvolvidos de arenitos calcários, como no Oeste de São Paulo, são produtivos diferente dos demais indicados.

Neste compêndio o termo “Solos Arenosos” compreende não somente os Neossolos Quartzarenicos (RQ, antigas AQ) assim como os indicados anteriormente com teor de argila. Os Neossolos Quartzarênicos podem se apresentar em diferentes cores e tonalidades conforme ilustrado na figura 1.



Figura 1. Ilustração de diferentes tipos de Neosolos Quartzarênicos. (Fonte: Oliveira et al., 2011)

1.7.1. Vantagens e Limitações dos Solos Arenosos

Tem sido comum nos meios acadêmicos e demais instituições discussões a respeito do menor potencial dos solos arenosos em termos comparativos com os argilosos na produtividade agrícola. A respeito desta questão a resposta deve ser muito cuidadosa, pois irá depender de uma série de fatores, entre eles a localização destas terras e o nível de manejo utilizado.

As principais vantagens destes tipos de terras são inúmeras. Sendo assim, 60 a 70% da citricultura do Estado de São Paulo está plantada em solos de textura arenosa a média assim como eucalipto. A produtividade de cana-de-açúcar em quatro cortes, na região Oeste de São Paulo, é tão alta como em solos argilosos, tidos como mais férteis. A maturação de frutas ou de outras culturas, atinge valores mais elevados de açúcares nos solos arenosos. São solos quimicamente mais fáceis e baratos de serem recuperados, tanto em superfícies como em profundidade. As reações químicas se processam com maior rapidez devido à baixa CTC e teores baixos de matéria orgânica. As brotações de culturas perenes, como pastagem ou cana-de-açúcar, no período seco, são melhores do que em solos argilosos. Em irrigação, a quantidade de água para atingir a capacidade de campo é menor. Permitem o plantio fora da época chuvosa, devido a facilidade de se trabalhar. Em períodos chuvosos a eficiência do plantio ou da colheita

e das práticas culturais é maior nos solos arenosos. Devido à grande macro porosidade, os teores de oxigênio em profundidade são mais elevados.

Como desvantagens, a menor produtividade agrícola, porém num sistema de nível baixo de manejo. A proliferação de pragas, doenças assim como de ervas daninhas, de difícil controle é grande assim como nos outros solos. Quanto aos riscos de erosão é mais acentuado devido a pequena fragilidade do sistema, inclusive com encharcamento temporário e assoreamento no sulco de plantio, elevada coesão quando seco. Soma-se ao fato de que dependendo das condições de clima, há crostas superficiais de difícil controle a não ser em solo úmido e a cobertura vegetal que reduz as perdas de água do solo. A lixiviação é acentuada devido a elevada percentagem de macro porosidade ao ar e a baixa quantidade de matéria orgânica etc.

A Figura 01 (Merten & Minella, 2019) ilustra a importância do plantio direto na cultura de soja com os problemas da transpiração da cultura e evaporação na entre linha.

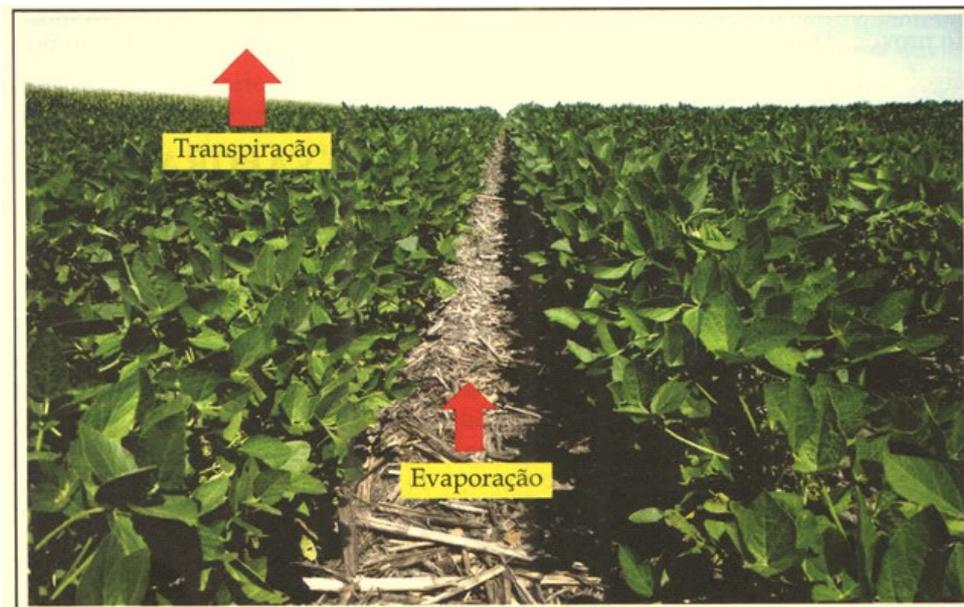


Figura 01 - Ilustração dos processos de transpiração e evaporação em uma cultura de soja sob semeadura direta, solos arenosos. **Fonte:** Merten e Minella (2019)

1.7.2. A importância da camada de subsuperfície do solo e seu impacto na produtividade agrícola

A camada superficial do solo (digamos a pelo menos 1 metro de profundidade), sempre foi marginalizada em prol da camada superficial. Isso se deu a uma série de fatores, desde tradição, até o conhecimento errôneo de que todo o processo de impacto na produtividade ocorre na camada arável. A água é o veículo de transferência de elementos químicos, nutrientes e outros do solo para as raízes. E não se trata de água pura, mas de solução. A água ao percolar pelo perfil leva nutrientes que serão absorvidos até onde tiver raízes, ou se perderão.

Estudos como Rajj (2011), já indicavam a importância destas camadas profundas na produtividade, pois o enraizamento permite captar mais água e, por consequência, nutrientes inseridos no solo. Se não há raiz, há perda de nutrientes por lixiviação como o potássio por exemplo. Logo, um bom enraizamento permite otimizar todo o processo de adsorção de nutrientes inseridos na fertilização antrópica.

Wild (1988) indicou que em ano seco, solo argiloso sob plantio direto, armazenou 10% a mais de água que o plantio convencional, em especial abaixo dos 50 cm, permitindo ao trigo obter 22 mm de água a mais do solo sob plantio direto. Luchiari Junir et al., 1986 observaram no cerrado, raízes de milho e feijão deveriam atingir até 1,5 m como base para altas produtividades. Rosolem (2005) indicou grande exigência de água em soja. Indicou que a produtividade máxima só é obtida se o sistema radicular atingir até 1 m. Se as raízes atingirem apenas 60 cm, a produção será 70% da máxima. Wild (1988), mostrou que em trigo de inverno, período seco, raízes a mais de um metro de profundidade, representam apenas 3% do peso total delas, mas foram responsáveis pelo suprimento de 20% da água usada pela cultura.

CAPÍTULO 2:

2.1. SOLOS ARENOSOS NO BRASIL

O Brasil apresenta em termos de superfície 8,5 milhões de km², e em termos de Área Quartzosa, solos arenosos, estaria na faixa de 5,82% o que corresponde a 50 milhões de hectares (Tabela 1). A maior área contínua deste tipo de terras está nos Cerrados do Brasil Central (Spera, S.T et al., 1999) ocupando 15% dos 50 milhões de ha, e na área designada de Matopiba, onde se incluem os Estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia (Donagemma et al., 2016). O restante das áreas, estão disseminadas, em percentual variável, nas outras regiões do Brasil.

Basicamente tais solos estão associados aos mais argilosos. Exemplos deste tipo de associação, tem sido comum nos Estados de São Paulo, Paraná, Goiás e Mato Grosso onde solos desenvolvidos de rochas básicas, como o basalto, de solos argilosos, estão recobertos por solos mais arenosos de diferentes texturas, inclusive os Neossolos Quartzarênicos. Outros tipos de solos arenosos foram descritos no capítulo anterior.

Tabela 1 - Definição de solos arenosos pela Embrapa, áreas em ha no Brasil, Cerrado e regiões Matopiba.

Definição EMBRAPA		Neossolos Quartzarênicos (NQ)		Cerrado	Região Matopiba (Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia)				
Textura %	Profundidade	Milhões	Do País	N.Q.	N.Q.		Latosolos e Argissolos		
Argila	Areia	cm	ha	%	%	Milhões ha	%	Milhões ha	%
15	>70	150	49,6	5,82	15	6,8	11,05	5,8	9,45

Fonte: Donagemma et al. 2016 (País: 8,5 milhões de km²)

2.2. MANEJO DE SOLOS

Entende-se como manejo de solos a: “toda atividade aplicada ao sistema solo-planta com o intuito de aumentar a produtividade agrícola tendendo para um mínimo possível de degradação ambiental” (Demattê J. L. I.; Demattê J. A. M., 2009).

As práticas de manejo dependem de níveis tecnológicos que seriam funções também de conhecimentos relacionados às atividades agrícolas, do mercado, do clima e aos investimentos

empregados. Do nível muito baixo ao muito alto, há aumento do nível de conhecimento de tecnologia e de recursos (Tabela 2).

As expansões em solos arenosos de baixa fertilidade e a implantação de pastagens ou culturas rudimentares num sistema de baixo nível de aplicação de tecnologia, fez com que a evolução da pecuária no Brasil sofresse profundo impacto negativo de produtividade, degradando áreas de difícil recuperação, não somente em solos arenosos, mas também em solos mais nobre em termos de textura. Tal degradação tornou-se um dos principais sinais de baixa sustentabilidade da pecuária nas diferentes regiões brasileiras. Ela é vista como um processo evolutivo de perda de seu vigor, produtividade e capacidade de recuperação natural para sustentar os níveis de produção e qualidade exigidos pelos animais.

No Brasil dos 180 milhões de hectares ocupados por pastagens, 120 milhões são de pastagens cultivadas e no Brasil Central 80% das pastagens cultivadas responsáveis por mais de 55% da produção nacional de carne, encontram-se em algum estágio de degradação (Macedo, M.C.M. 2009).

Entretanto, nestes últimos anos há necessidade de enaltecer os órgãos de pesquisa, principalmente a Embrapa, Cooperativas, Empresários, Produtores e demais envolvidos na cadeia de aumento de produtividade, que conseguiram e estão conseguindo um melhor conhecimento das características delicadas do manejo dos solos arenosos, fazendo com que aumentasse a produtividade.

Sistemas como plantio direto, integração pecuária e lavoura, sistemas agroflorestais, incluindo integração pecuária-florestas-lavoura, assim como, culturas isoladas como florestas, pecuária, cana-de-açúcar de elevado nível de manejo, estão sendo desenvolvidos inclusive a tecnologia servida para aplicação em solos de textura mais fina (DONAGEMMA et al., 2016).

Para Macedo M. C. M. (2009), na pecuária normalmente integrada ou não com lavoura, está se conseguindo aumento de produtividade de 0,5 UA/ha no sistema baixo de nível de manejo para 1.9 UA num sistema elevado de nível de manejo onde a média nacional está na faixa de 0,7 UA/ha.

Tabela 2 - Níveis de manejo, aplicação de tecnologia, principais atividades e possíveis níveis de degradação.

Nível de manejo	Com irrigação	Aplicação tecnologia	Atividade	Nível de degradação
Muito baixo	Não	Rara	Pastagem/cultivo rudimentar	Muito alta
Baixo	Não	Muito pouca	Pastagem/cultivo rudimentar	Alta
Médio	Não	Pouca	Pastagem + cultura + floresta	Média
Alto	Semi plena	Média	Pastagem + cultura + floresta	Baixa
Muito alto	Plena	Alta	Pastagem + cultura + floresta	Muito baixa

Floresta: incluem eucaliptos, pinus, demais atividades e sistemas integração de Lavoura/Pecuária/Floresta.

Nível de manejo implica também: plantio direto na planta, cultura coberta e sistemas de preparo reduzido.

Fonte: Demattê, J.L.I.; Demattê, J.A.M. 2009.

Num sistema de nível médio abaixo de manejo os solos, na maioria dos casos, seriam degradados como tem sido observado nos diversos artigos. Entretanto, num nível muito alto, as produções são compatíveis com solos mais argilosos. Porém a fragilidade em relação ao sistema erosivo, os solos arenosos devem ser protegidos através de práticas de conservação do solo e tendo a superfície protegida com culturas de cobertura ou com a palhada ou ambas, sendo que o plantio de grãos deve ser em plantio direto e em contorno.

Na citricultura e no plantio de outra cultura perenes como florestas implantadas (Eucalipto, Pinus, Seringueira etc.) no Estado de São Paulo, em área de pastagem de braquiária, ao invés de arar e gradear toda área, está sendo feito a sulcação e a correção química somente na linha de plantio, deixando as demais áreas com pastagens. Após a implantação da cultura, nas entrelinhas após a adição dos corretivos e demais acessórios, são manejadas com braquiária, leguminosas ou outra cultura de cobertura.

Em relação a cana-de-açúcar na época de reformas da área está sendo feito o plantio de soja, milho, amendoim, crotalária, milheto, entre outros (Dinardo-Miranda et al. 2008).

A produtividade, num sistema de preparo reduzido em cana-de-açúcar, média de cinco cortes, na safra 2016/17 da região Oeste de São Paulo, predominantemente por solos Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Arenosos e Latossolos de teor de argila menores de 25%, apresentou 11,3 t/há Açúcar Total Recuperável, contra 10,7 t/há em solos predominantemente

argilosos e produtividade média de 84,1 t/há contra 79,2 t/ha respectivamente CTC, na safra 2016/17 (Tabela 3).

Tabela 1 – Produtividade agrícola de cana-de-açúcar safra 2016/2017 em função dos tipos de solos.

Unidade	Região	ATR	TCH BIS	T ATR/ha	Solos Dominantes
Raízen – Gasa	Araçatuba	126,23	88,86	11,96	RQ, LE e LV 15 a 25%
Santa Adélia – P. Barreto	Araçatuba	125,93	85,26	11,04	RQ, LE e LV 15 a 25%
Raízen – Bonfim	Riberão Preto	133,86	83,42	11,17	Argissolos, RQ, LV 15 a 25%
Raízen – Destivale	Araçatuba	126,13	79,17	9,98	RE, LE e LV 15 a 25%
Média		128,10	84,1	11,03	
Raízen - Tamoio	São Carlos	135,79	74,65	10,8	LE > 60%, LE > 35%, LE 15 a 25%
Abengoa – São Luiz	Piracicaba	129,52	82,66	10,79	LE > 60%, LE > 35%, LE 15 a 25%
SLC – São Francisco	Goiás	132,54	80,19	10,72	LE > 60%, LE > 35%, LE 15 a 25%
Raízen - Diamante	São Carlos	130,01	77,21	10,69	LE > 60%, LE > 35%, LE 15 a 25%
Da Pedra	Ribeirão Preto	132,68	77,2	10,44	LE > 60%, LE > 35%, LE 15 a 25%
São Martinho	Ribeirão Preto	128	79,42	10,3	LE > 60%, LE > 35%, LE 15 a 25%
		131,70	79,2	10,7	

Fonte: Centro Tecnológico de Cana (2017).

Num nível elevado de manejo, com irrigação de gotejo, em cana-de-açúcar no Estado do Piauí, temperatura média acima de 28°C (Demattê JLI 2014) e em solos leves, a produtividade média de dois cortes está na faixa de 196 t/ha e ATR/ha de 23,2 (Tabela 4). Tais dados surpreendem apesar de ser irrigado com gotejo em solo arenoso. A diferença do ATR/ha seria de 23,2 t/ha, contra 10,7 t/ha do Estado de São Paulo na safra 2016/17.

Em Andradina, SP (Demattê, J. L. I. 2016), em solo arenoso, a produtividade agrícola com gotejo está na faixa de 130 t/ha com quatro cortes e com ATR/ha de 16,7. Níveis elevados de manejo, não somente nestes tipos de solos, com irrigação, têm mostrado produtividades elevadas como tem sido observado em outras culturas tais como em fruticultura, em região semiárida, e com a cultura de tomates em Goiás.

Tabela 2 - Produtividade média de dois cortes de cana-de-açúcar em gotejo Piauí.

Variedade	t/ha de cana	ATR/tc	T ATR/ha
RB96-1003	225	110	24,7
RB01-2090	214	108,8	23,2
RB95-1541	210	129,2	27,1
RB93-1011	209	114,6	23,9
RB96-6928	188	118,2	22,2
IAC95-5000	179	118	21,1
SP80-1816	179	122	21,8
RB85-5156	170	131,7	22,3
Média	196,7	119,1	23,2

Fonte: Demattê, J.L.I. (2014).

2.3. PERSPECTIVAS E DESAFIOS EM RELAÇÃO AOS SOLOS ARENOSOS

Atualmente os agricultores não somente nos solos arenosos, tem que conviver com uma série de dilemas, entre eles o aumento constante dos custos de produção (incluindo os custos da terra ou do arrendamento) de um lado e a necessidade premente do aumento da produtividade de outro. Na situação atual o aumento puro e simples em termos de quantidade de área para o cultivo não se justifica com baixa produtividade. As expansões por novas áreas se justificam em relação somente se houver produtividade compatível e sustentável, portanto, a escolha de terras, inclusive as arenosas, com adequada aptidão para agricultura sustentável deverá ocorrer.

Em relação ao nível mais elevado de manejo, já se verifica o grande emprego de capital e de tecnologia e por outro lado, a menor importância relativa do fator terra. Neste caso a capacidade gerencial assume grande importância tendo em vista equilibrar e harmonizar o emprego de todos os fatores de produção (capital, terra e mão-de-obra). Além do mais, nenhum agricultor irá se utilizar de práticas de manejo alto a muito alto se a relação custo/benefício lhe for desfavorável.

Apesar do tema ser especificamente relacionado ao solo, isto não é verdade, uma vez que para manejar adequadamente uma área é necessário conhecimento, além do solo, da cultura, do clima e mercado. Como exemplo, a produtividade no sistema lavoura-pecuária tem-se desenvolvido de tal maneira que os pecuaristas e produtores de grãos estão entusiasmados com a produtividade e o sistema empregado. Em solos estritamente arenosos têm-se obtido, ano a ano, aumento de produtividade inclusive de grãos como na região de Campo Verde no Estado de Mato Grosso (Tabela 5).

Tabela 3 - Produção de grãos de soja e milho de textura leve nas safras 2012/13 e 13/14 em Campo Verde/MT.

Classe solo	Safra	Cultura	t/ha de grãos	Observações
RQ	2012/13	Soja	1,05	Estiagem e nematoides
RQ	13/14	Soja	2,88	Sem estiagem
RQ	13/15	Soja	3,48	Sem estiagem
LV Psamítico	13/16	Soja	1,47 e 3,30	< rendimento 18 dias veranico
LV Psamítico	13/17	Soja e milho	3,48 e 7,32	Sem estiagem

Fonte: Donagemma et al. (2016).

CAPÍTULO 3:

3.1. PREPARO DE SOLOS ARENOSOS

O sistema de preparo de plantio direto (PD) passa por um preparo convencional (PC). Neste aspecto há diversos sistemas de preparo baseados na cobertura vegetal, como floresta, cerrados, áreas com “juquira” em pastagens em mais de 80% como na Amazônia, áreas de pastagens erodidas, e demais situações em relação ao Brasil.

Como grande parte dos solos do Brasil são quimicamente de baixa fertilidade e de elevado teor de alumínio, no início do sistema se faz necessário a correção química em superfície e subsuperfície, utilizando o sistema de preparo convencional dos solos (PC). Neste sistema, o uso de herbicidas e a mobilização das terras, com os implementos necessários, irão depender dos tipos de cultura assim como das próprias condições das terras.

Posteriormente, ao longo do tempo, seria introduzido o sistema de plantio direto (PD), por meio do uso de palhada e das culturas de cobertura no caso de grãos, e num preparo reduzido (PR), no caso de culturas perenes.

3.2. SISTEMAS DE PREPARO CONVENCIONAL (PC) EM ÁREA DE FLORESTA

Nestes tipos de áreas o preparo não depende da textura dos solos, as práticas são semelhantes.

Ele é iniciado com o corte e remoção de árvores de grande porte. Posteriormente, executa-se a derrubada das árvores (pode ser com “correntão”). Ação do fogo e a montagem do resto de vegetação em leiras em direção contrária as águas de chuvas. As leiras, antes de serem queimadas, são reservadas para retirada para carvão. Posteriormente elas são espalhadas e a área é gradeada e a seguir procede-se a remoção de raízes assim como as construções dos terraços, estradas e carregadores. Nova gradeação, recuperação química e semeadura.

Neste processo a totalidade da serapilheira assim como parte do sistema de matéria orgânica do solo da camada superficial, será eliminada total ou parcialmente. Não se pode esquecer que o solo é um ecossistema no qual milhares de criaturas diferentes interagem e contribuem para que os ciclos globais tornem a vida possível. Este elenco é constituído por uma

série de criaturas micro e macro que representam o papel de ferozes seres competindo entre si para abocanhar cada folha, raiz, peletes fecais, animais mortos que chegam ao solo. Grande parte desses é perdida nesse sistema de preparo.

Nas demais áreas, não especificadas, seriam semelhantes, porém com menor atividades, sendo necessário a remoção de raízes de árvores e arbustos assim como as demais operações necessárias para deixar tais áreas de maneira adequada para o semeio.

Em áreas de pastagens erodidas com braquiária ou outra gramínea, as erosões devem ser tampadas (erosões de grande porte, como voçorocas, devem ser isoladas). Aplicar herbicida na área. Remover raízes, gradear, construir terraços e proceder à recuperação química e plantar.

Em áreas de pastagens tomadas pela “juquira”, como na Amazônia, proceder a uma gradeação pesada, porém se a “juquira” está impedindo a gradeação, suspender a operação e usar o “correntão”. Enleirar e queimar, remover as raízes e proceder à recuperação química assim como construir terraços, estradas e carreadores, seguido pelo plantio.

Migrar para Plantio Direto (PD) após dois a três anos verificando se os solos estão devidamente recuperados quimicamente. Se não estiver adequadamente corrigido, seguir pelo preparo convencional (PC).

3.3. PREPARO CONVENCIONAL (PC) TRANSITANDO PARA PLANTIO DIRETO (PD)

Para a adoção do plantio direto (PD) em áreas de plantio convencional (PC) há necessidade de se tomar alguns cuidados, sendo que a limpeza da área com a remoção de tocos, raízes e, eventualmente, pedras, assim como as correções das erosões antigas, mudanças dos traçados de estradas e carreadores.

Fazer um diagnóstico dos fatores limitantes encontrados na área, corrigi-los se for este o caso. Proceder às amostragens de fertilidade das glebas e enviar para análises. A erradicação químico-mecânica de ervas daninhas de difícil controle, como a grama seda, grama batatais, tiririca, “juquira”, buva, é necessário. Se estas espécies não são extirpadas antes da instalação do PD a tendência é de se reproduzirem a ponto de tornar-se antieconômica a exploração das terras, sendo necessário retomar ao PC por um ou mais anos com uso de araças, gradeações e herbicidas, para poder eliminá-las. Estas espécies aparecem, normalmente em reboleiras e

mesmo que os tratamentos para a sua destruição ou controle, sejam caros, tornam-se econômicos, pelos prejuízos que elas causam às lavouras. Havendo necessidade de descompactar as terras utilize equipamentos específicos tais como subsolador e arado. Se houver necessidade de fazer fosfatagem, use-a.

Herbicida (pré-plantio) para incorporação no solo, deve ser realizado apenas quando se tem ervas daninhas de difícil controle. Gradeação de pré-plantio e plantio da cultura principal seguido pelo herbicida para controle da sementeira. A partir daí, colhe-se a cultura principal, deixando a palhada no solo como ajuda no sistema do PD. Instalar cultura de cobertura.

3.4. PLANTIO DIRETO (PD) EM SOLO ARENOSO

O sistema de plantio direto (PD), foi um grande marco na agricultura brasileira, com a utilização do herbicida, baseado num sistema de pequena mobilização do solo, como uma cópia de outros países e povos.

Ele pode ser utilizado nos solos arenosos e argilosos e somente se viabilizou em larga escala no Brasil, com o uso de herbicida como dessecante, no controle de sementeiras, no controle de ervas daninhas e demais atividades. Houve uma relação atrelada ao herbicida num sistema tal que através de suas relações com as culturas de produção e de proteção ao solo, atuam no sistema de controle da erosão em suas diferentes fases e níveis assim como na maior retenção de umidade e ciclagem de nutrientes do solo.

Na erosão e num sistema convencional de preparo (SPC), se não adequadamente conduzido, seria o responsável pelo empobrecimento e degradação dos solos, não só no aspecto da fertilidade, como principalmente no arraste das partículas do solo e no teor de matéria orgânica. Entretanto, tal sistema ainda é o mais utilizado no Brasil.

Estima-se que anualmente no Brasil sejam cultivados na faixa de 63 milhões de hectares com culturas anuais de soja, milho, trigo, algodão em sucessão ou rotação em PD ou SPC. Sendo 50% deste total estão sendo cultivados com culturas de cobertura sob sistema de semeadura direta e PD. Tal marco ainda é pequeno, porém o sistema PD na palha está evoluindo, não somente em grãos, mas também em outras culturas de ciclo mais longo, num preparo reduzido, num sistema de revolvimento menor nos solos, como citrus, eucaliptos, café, cana-de-açúcar, pastagens e sistema com culturas, pecuária e floresta etc.

Como exemplo no caso da implantação de citros, eucalipto, cafezal tem sido utilizado as coberturas existentes em áreas de pastagens (não erodidas) como o próprio capim como cobertura. Tais culturas podem ser adaptadas ao sistema à medida que está sendo evoluído o uso do GPS no plantio e nas soqueiras correspondentes.

3.5. VANTAGENS DO SISTEMA DE PD

As principais vantagens observadas no sistema de PD são as seguintes; maior possibilidade de execução das operações agrícolas, tanto de plantio como de colheita em condições de excesso de umidade; maior eficiência quanto ao uso dos equipamentos; sensível melhoria das propriedades físicas motivadas principalmente pelo aumento do teor de matéria orgânica decomponível assim como na sensível melhoria da micro, meso e macrofauna do solo. Na redução das mobilizações agrícolas há reflexos no aumento da infiltração das águas, na redução das perdas de umidade assim como da temperatura do solo e no controle da erosão hídrica, no aumento da resistência dos agregados etc.

Salienta-se neste aspecto o sensível aumento de minhocas de importância na escavação do solo, na fragmentação de resíduos orgânicos, na mistura do solo com matéria orgânica, favorecendo a agregação; no controle de algumas pragas do solo como do nematoide do cisto da soja (*Heterodera glycines*) através das práticas como rotação de cultura; diminuição do trânsito de máquinas e implementos entre as áreas reduzindo o risco de disseminação de doenças e pragas; redução da erosão eólica, considerada uma das mais importantes formas de carregamento dos cistos a distâncias consideráveis; na alteração da fertilidade do solo através da redução da lixiviação e reciclagem de nutriente proporcionado pelo incremento da matéria orgânica ou da cobertura vegetal assim como outras atividades. Outras tecnologias ligadas à cadeia produtiva das culturas tais como o manejo fitossanitário, apresentam menos particularidades em solos arenosos em relação a solos argilosos.

3.6. LIMITAÇÕES DO SISTEMA DE PD

Por outro lado, há uma série de inconvenientes relacionados ao PD, mas que podem ser solucionados através da evolução do sistema. As análises de fertilidade de solos ainda não estão devidamente definidas na superfície, se a 0-10 cm e 10-20 cm ou uma única análise a 0-20 cm. Análises mais profundas 20-50 cm ou mais, seriam necessárias na recuperação de solos, a ser

definida. Na redução da temperatura do solo devido a palha proporcionando uma mais longa umidade no solo em consequência proporciona um prolongamento do ciclo da cultura favorecendo assim os possíveis ataques de pragas e doenças. A cobertura com palha favorece uma intensidade maior de geadas em regiões sujeitas a tais fenômenos; o tráfego de veículos e máquinas pode ocasionar sensível compactação suficiente para ocasionar encharcamento temporário e com isso proliferar pragas e doenças no sistema radicular; em sistema com irrigação, tal inconveniente pode ser sensivelmente agravado, como no caso da ocorrência do mofo branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) na cultura do feijão ou de lesmas como tem sido constatado no Brasil Central; a presença da cobertura com palha pode propiciar maiores ataques de pragas do solo como lagartas e cupins; em culturas semi perenes, como cana-de-açúcar, a presença da cobertura com palha tende a reduzir sensivelmente a produtividade, assim como a aumentar o ataque de cigarrinha. Em relação às ervas daninhas há fatores positivos e negativos em relação ao PD. Sobre tais aspectos consultar o trabalho feito por Moreira, S. G (2019).

3.7. FERTILIDADE DOS SOLOS NO PLANTIO DIRETO

Um dos pilares no Plantio Direto (PD) corresponde às análises de fertilidade dos solos, que ainda não estão devidamente definidas se na superfície a 0-10 cm e 10-20 cm ou uma única análise a 0-20 cm. Análises mais profundas 20-50 cm ou mais, seriam necessárias na recuperação de solos. De acordo com os produtores de grãos, seria impossível de se obter elevadas produtividades sem as correções em profundidade no pH e do alumínio nas condições atuais das sementes utilizadas.

As correções com calcário devem ser feitas com mais frequência do que em solos argilosos, devido a baixa CTC, assim como as aplicações no plantio direto (PD) seriam na superfície e não incorporado, inclusive em culturas de cobertura. Neste aspecto os trabalhos de Franchini et al. (2016), ilustram a aplicação do calcário na superfície e incorporado em PD. Os trabalhos foram feitos em Moreira Sales, no Pr, com doses de 0 até 8 t/ha (doses de 4,0 t/ha foi indicado), nas profundidades de 0-10 cm até 40 cm com 12 e 30 meses após aplicação. Praticamente não há diferenças no pH em relação aos métodos de aplicação, ficando que em área total foi mais interessante do que a incorporado, devido a utilização de arados e grades que oneram os custos.

No trabalho tem mostrado que no primeiro ano, após calagem de 4,0 t/ha incorporado, obteve maior produtividade de soja de 68 t/ha contra 62 t/ha não incorporado, todavia nas safras seguintes, a produtividade tem sido semelhante.

Em culturas perenes os métodos seriam no preparo do solo e aplicação do corretivo em área total, incorporado, e nas soqueiras aplicação em área total e não incorporado. Há caso de aplicação no sulco de plantio com calcário calcinado na faixa de 400 a 500 kg/ha e aplicação de calcário normal em área total e incorporado

Por outro lado, há necessidade de se levar em consideração que os solos se acidificam com o tempo, sendo inevitável quedas em profundidades da fertilidade, vindo a ocorrência de alumínio proliferar, e com isso necessidade da incorporação de corretivos nas soqueiras em caso de culturas perenes ou alterando sistema de PD com o convencional (SC) num sistema de cultivo anual.

Quanto ao fósforo há uma série de trabalhos ilustrando as aplicações em área total em PD em grãos, com elevadas quantidades deste nutriente na camada superficial do solo, porém com umidade. Tem sido verificado que em condições mais secas as aplicações no sulco são mais eficientes além do aspecto de perdas de nutrientes quando aplicados em área total. Entretanto no Brasil grande parte dos equipamentos, inclusive do fósforo e demais nutrientes, são adaptadas as aplicações em área total.

Como tem sido observado num solo arenoso de baixa fertilidade com o PD em grãos, vai haver concentração de nutrientes na superfície (0-5 cm) suficientes para a maioria das culturas devido ao sistema de aplicação, tanto de corretivos como de fósforo e demais nutrientes.

Na segunda camada, 5-10 cm, o pH indica que o calcário fez efeito devido à macroporosidade do solo arenoso, porém o fósforo teve efeitos menos pronunciados, assim como os demais nutrientes que o calcário.

Entretanto, as alterações da fertilidade foram somente nas camadas superiores do solo, como se esperava. Entretanto tais solos estariam propensos a maiores produções se estivesse corrigido a maiores profundidades, e não somente a 0-10 cm.

Em solos de textura mais argilosa os inconvenientes são os mesmos que em solos arenosos, porém, mais acentuados como na Tabela 6 (Moreira, S.G 2019).

Tabela 4 - Atributos de um solo de Tapurah, MT, cultivado com culturas anuais, com manejo superficial da fertilidade, amostrado em diferentes profundidades.

Profundidade (cm)	pH (CaCl ₂)	P resina (mg dm ³)	K	Ca	Mg	Al ³⁺	CTC	V%
0 a 5	5,4	22	0,19	3,4	2,2	0,0	9,5	61
5 a 10	4,7	9	0,17	1,7	1,1	0,2	8,1	37
10 a 15	4,5	4	0,14	1,2	0,6	0,4	7,4	26
15 a 20	4,4	2	0,11	0,8	0,5	0,4	6,1	23
Média	4,8	9	0,15	1,8	1,1	0,05	7,8	37
0 a 10	5,2	23	0,17	2,7	1,5	0,0	8,2	54
10 a 20	4,4	2	0,13	0,9	0,5	0,4	6,4	24
Média	4,8	13	0,15	1,8	1,0	0,2	7,?	39
0 a 20	4,8	13	0,14	1,6	0,8	0,0	6,5	39

Fonte: Moreira (2019).

3.8. FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGENS, CORRETIVOS

As análises de solos irão depender das culturas anuais e perenes assim como da recuperação química. No caso de culturas anuais em PD análises de 0-10 cm ou 0-20 cm seriam suficientes, porém ainda não está resolvido. Em culturas perenes 0-25 cm e 25-50 cm, com 70% na entre linha e 30% na linha são suficientes. Recuperações químicas em solos álicos ou distróficos, análises a maiores profundidades seriam necessárias.

Solos arenosos necessitam mais frequência das análises de fertilidade a cada dois a três anos em relação aos solos mais argilosos, estes a cada 4 a 5 anos.

3.9. PRODUTIVIDADE DE SOJA

Neste capítulo assim como nos demais o termo Culturas de Grãos (soja principalmente) e cana-de-açúcar aparecem com muita frequência, porém os dados aqui apresentados de produtividade são válidos em termos de solos arenosos não somente nestas culturas. Por outro lado, o sistema aqui apresentado tem sido uma mistura de dados objetivando, inclusive com as culturas de cobertura e o plantio direto (PD), uma situação diferente das maiorias dos textos sobre o assunto, visando basicamente o leitor familiarizado com o setor.

Tem sido feito um enorme trabalho relacionado aos solos arenosos, porém, em certos casos, ocorre exemplos de solos de textura mais argilosa, sem comprometimento das terras arenosas.

3.10. A BUSCA DA PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SOLOS ARENOSOS

Sabe-se que solos com maior teor de argila, acima de 25%, produzem mais em culturas anuais, tais como soja, do que solos arenosos. Valores em média de tem sido maior 10% a 15% nas terras argilosas e tem sido obtido por diversos agricultores ao longo deste Brasil. Tal fato de interesse do produtor que busca respostas para este dilema, tem sido buscado por diversas empresas, inclusive como Embrapa e Centros de Tecnologias como o Aprosoja em Campo Novo do Parecis (CTECNO), em 2004, no oeste de Mato Grosso com objetivo de estudar qual o tipo de cobertura, de manejo e de adubação seria melhor nestes solos. Em área experimental de 88 hectares foram semeados 110 cultivares de soja no campo experimental do CTECNO em duas épocas diferentes e separadas em duas áreas, uma com teor mais elevado de argila e a outra em texturas mais arenosas. Conforme a experiência deste Centro com soja, há possibilidade de produzir nas terras de areia 50, 60, 70 sacas de soja nas mesmas condições que solos de textura mais argilosa, só mudando a sequência de culturas e minimizando os problemas. Há exemplos como o plantio de 6.300 ha nesta região em diversos solos, inclusive em terras arenosas, numa média de 60 sacas/ha, não deixando nada a desejar em solos mais argilosos.

3.11. SISTEMA LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (ILPF)

As terras arenosas têm sido ocupadas principalmente com pastagens, reflorestamento e cana-de-açúcar. Por outro lado, nas últimas décadas, principalmente através da Embrapa têm sido desenvolvidas o sistema LPF (Lavoura-Pastagem-Florestas) num nível elevado de manejo em solo arenoso (Franchini J.C et al 2016). Por outro lado (Demattê JLI 2018) o sistema pode ser visualizado através da Figura 2 como sorgo com eucalipto (a), milho com braquiária (b), abacaxi (c), na irrigação (d), pastagem com eucalipto (e), cobertura com palha (f) e outros.

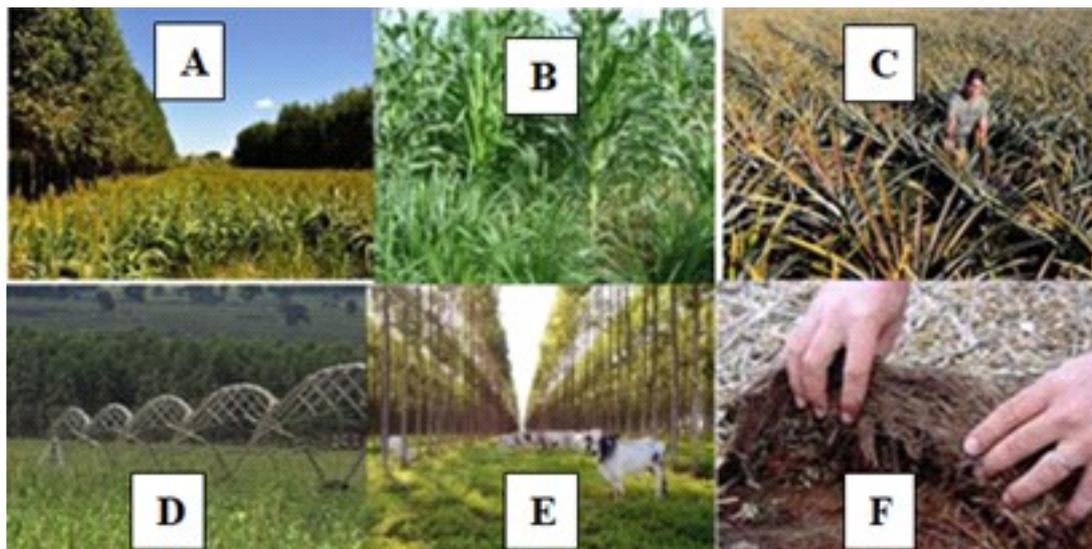


Figura 02 - Sistemas de manejo usados em solo arenoso. A - Sistema floresta (eucalipto) e lavoura; B - Milho e braquiária; C - Cultura de abacaxi; D - Sistemas de irrigação; E - Integração pastagem e floresta (eucalipto); F - Cobertura de palha. **Fonte:** Demattê, J.LI. (2018)

Em termos de produção de soja nas diversas regiões do Brasil (CONAB 2019) pode ser observada na Tabela 7 onde se observa a grande variação da produtividade em termos de regiões, em kg/ha e foi observado por Salton, C.J et al (2019).

Tabela 7 - Comparativo de área, produtividade e produção – Soja.

Região	Área (mil ha)			Produtividade (kg/ha)			Produção (mil t)			
	UF	Safa 18/19	Safa 18/20	VAR. %	Safa 18/19	Safa 18/20	VAR %	Safa 18/19	Safa 18/20	VAR %
	(a)	(b)	(b/a)	(o)	(d)	(d/o)	(o)	(f)	(f/o)	
Norte	1.988,3	2.073,2	4,3	2,98	3.064	2,8	6.924,8	6.362,4	7,2	
RR	40,0	40,0	-	2,7	3.044	12,7	108,0	121,8	12,8	
RO	333,7	348,4	4,4	3.324	3.268	(1,7)	1.109,2	1.138,6	2,7	
AC	1,5	1,9	26,6	2,94	2.939	-	4,4	5,6	27,3	
AM	2,2	2,0	(9,1)	2,4	2.325	(3,1)	5,3	4,7	(11,3)	
AP	20,9	20,9	-	2.751	2.837	3,1	57,5	59,3	3,1	
PA	561,4	567,6	1,1	3.044	3.117	2,4	1.708,9	1.769,2	3,5	
TO	1.028,6	1.092,4	6,2	2,85	2.978	4,5	2.931,5	3.253,2	11,0	
Nordeste	3.332,2	3.406,6	2,2	3.167	3.176	0,2	10.663,4	10.811,0	2,4	
MA	992,4	1.000,3	0,8	2,94	3.029	3,0	2.917,7	3.029,9	3,8	
PI	758,1	803,0	5,9	3.063	3,87	0,8	2.322,1	2.478,9	6,8	
AL	1,6	1,6	-	2.972	2.645	(5,3)	4,5	4,2	(6,7)	
BA	1580,1	1.600,6	1,3	3,36	3,31	(1,5)	5.309,1	5.298,0	(0,2)	
Centro Oeste	16.102,8	16.642,4	2,7	3.269	3.337	2,1	62.637,6	62.637,6	66.209,0	
MT	9.699,5	9.972,1	2,8	3.346	3,35	0,1	32.454,5	33.406,5	2,9	
MS	2.853,7	2.950,1	3,4	2,98	3.217	8,0	8.504,0	9.492,4	11,6	
GO	3.476,4	3.545,1	2,0	3,29	3,4	3,3	11.437,4	15.053,3	5,4	
DF	73,2	74,5	1,8	3	3.447	4,5	241,6	256,8	6,3	
Sudeste	2.671,1	2.714,7	6,8	3.147	3.344	6,3	8.091,8	9.078,3	12,2	
MG	1.547,9	1.606,9	2,0	3.222	3.367	4,5	5.074,3	5.410,4	6,6	
SP	996,2	1.107,8	11,2	3.029	3.311	9,3	3.017,5	3.017,5	21,6	
Sul	11.879,60	12.062,1	1,6	3.184	3.38	6,2	37.822,4	40.774,6	7,8	
PR	5.437,5	5.486,4	0,9	2.989	3.598	20,4	16.252,7	19.740,1	21,5	
DC	664,6	673,9	1,4	3.585	3,6	0,4	2.382,6	2.426,0	1,8	
RS	5.777,5	5.901,8	2,2	3.321	3.153	(5,1)	19.187,1	17.163,4	-3	
Norte/Nordeste	5.320,5	5.478,7	3,0	3.097	3.133	1,1	16.478,2	106.061,4	4,2	
Centro sul	30.663,5	31.319,2	2,6	3.228	3.366	4,0	98.661,7	106.061,8	6,8	
Brasil	35.874,0	38.787,8	2,8	3.208	3.322	3,8	116.029,8	122.226,2	6,3	

Fonte: Conab. Nota: Estimativa em janeiro/2020

Em relação ao nitrogênio, independência da cultura, os alertas feitos por Cantarella, H. em 2008 cabe perfeitamente neste contexto, sobre a Maximização da Eficiência e Minimização dos Impactos da Adubação Nitrogenada.

3.12. SOJA: EXIGÊNCIA DA CULTURA, FATORES LIMITANTES DOS SOLOS ARENOSOS

Em relação a este aspecto Felippi D. et al. (2021) indicaram que a semente de soja absorveu em média nos últimos 40 anos, em kg/M, 52,2 de N, 17,6 de K, 5,5 de P, 2,9 de S, 2,6 de Ca e 2,5 de Mg.

Na Tabela 8 observa-se as exigências da cultura de soja em termos de macro e micronutrientes no total da planta assim como a exportação de grãos e o que fica na palhada. Em relação aos restos culturais (palhada) tanto o N assim como o P estão imobilizados na celulose e hemicelulose, portanto, a mineralização é dependente dos anos de cultivo. No caso do K na palhada, ele está livre, e pode ser utilizado na próxima cultura.

Em relação aos nutrientes (Oliveira Junior et al 2009) os valores de grãos são em g/kg ou kg/t, e no caso de micro as quantidades em mg/kg ou g/t. Note que o total exportado de N seria de 61%, com fósforo 65% e 53% de K, sendo que em relação aos micros principalmente B e Zn seria de 26% e 66% respectivamente. Verifica-se que as quantidades de restos culturais são significativas em relação aos nutrientes.

Se o solo não contiver tais nutrientes eles devem ser aplicados na fundação por ocasião do plantio, nas aplicações em área total na palhada, ou nas aplicações aéreas.

Tabela 5 - Quantidade de nutrientes absorvido e exportado pela soja.

Partes da planta	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cl	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	g/kg ou kg/t de grãos												
Grãos	51	4,4	16,5	3,0	2,0	5,4	20	237	10	70	30	5	40
Restos culturais	32	2,4	14,9	9,2	4,7	10	57	278	16	390	100	2	21
Total	83	6,8	31,4	12,2	6,7	15,4	77	515	26	460	130	7	61
Exportação	61	65	53	25	30,0	35	26	46	38	15	23	71	66

Fonte: Oliveira Junior et al. 2009

3.13. NUTRIÇÃO DE SOJA DE TERRAS ARENOSAS DO BRASIL CENTRAL

Nas áreas de Cerrados no Brasil Central, nos últimos anos, o cultivo da soja teve grande expansão em áreas mais arenosas, inclusive no aspecto de nutrição. Tem havido questionamentos se não há diferenças na quantidade de fertilizantes nos tipos de terras sendo

que o trabalho de Salton C.J et al, 2019 dirimir tal dúvida. Tais autores se utilizaram de dois bancos de dados com informações de plantas de soja e solos com diferentes teores de argila (valores entre 30 e 840 g/kg), gerando dados de produtividade com a textura, histórico de uso e, em alguns casos, separando-se os efeitos por classes texturais: arenosa, média, argilosa e muito argilosa, além dos teores foliares de nutrientes com a textura e a produtividade.

Pode-se considerar que a produtividade de soja depende da textura do solo, sendo que condições climáticas e manejo de nutrientes adequado do solo são os principais fatores determinantes das respostas da cultura.

Observaram que o cultivo em solos arenosos apresenta potencial produtivo equivalente ou até mesmo superior aos dos solos argilosos, sendo que a sustentabilidade da produção é pouco dependente da textura do solo. Os fatores determinantes são as condições climáticas e o sistema de manejo nutricional adequado.

Potássio, cálcio e magnésio aplicados em área total se relacionaram positiva e significativamente com teor de argila e a produtividade, mostrando limitação, principalmente de K^+ e Ca^{2+} , no solo cultivada em solos mais arenosos. Quanto aos micronutrientes, atenção deve ser vista em termos de boro.

3.14. EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOJA E OUTRAS CULTURAS

Em relação às exportações de macronutrientes em kg/ha/ano para as culturas de soja, milho, cana, tomate e eucalipto (Gonçalves, J.L.G (2009) fez um relato a respeito (Tabela 9).

Como se observa, as culturas são diferentes em relação às exigências de nutrientes.

Tabela 6 - Produtividade média anual e nutrientes exportados.

Cultura	Produtividade média (t/ha/ano)	N	P	K	Ca	Mg	S
Soja (Grãos)	2,5	150	15	50	5	6	8
Milho (Grãos)	6	130	30	40	1	11	13
Cana (Colmo)	100	130	20	110	15	20	12
Tomate (Frutos)	40	70	20	130	7	7	9
Eucalipto (Tronco)	20	30	5	20	25	7	3

Fonte: Gonçalves (2009)

3.15. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS PARA SOJA

Climaticamente sabe-se que o cultivo de soja está na faixa de temperatura 20 a 30°C e fora deste intervalo pode provocar estresse por frio e calor, e em relação ao déficit hídrico. Ela é muito sensível no estabelecimento das flores e enchimento dos grãos, respondendo positivamente ao comprimento do dia, sendo que é extremamente sensível ao fotoperíodo e a radiação solar.

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta sendo que os maiores rendimentos de grãos são obtidos com 600 a 700 mm de água. Considerando uma produtividade máxima de 3.000 kg/ha a quantidade de água para produzir 1,0 kg de soja é de 2.000 a 2.333 litros de água nas condições de clima úmido. Em relação a tais componentes climáticos uma maior profundidade do sistema radicular (acima dos 0-80 cm de solo) desta cultura principalmente associado com culturas de cobertura em solos arenosos, tem sido fundamental.

Regiões com temperaturas menores ou iguais a 10°C são impróprias ao cultivo da soja e temperaturas acima de 40°C têm efeito adverso na taxa de crescimento, provocando danos à floração e diminuem a capacidade de retenção de vagens (Fundação Mata Grosso, 2004).

A evapotranspiração em função dos estádios de desenvolvimento da soja, estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 7 – Exigência hídrica da soja em função do estágio de desenvolvimento.

Subperíodos	Evapotranspiração diária (mm)
Semeadura – Emergência	2,2
Emergência – Início do florescimento	5,1
Início do florescimento – Surgimento de vagens	7,4
Surgimento de vagens – 50% folhas amareladas	6,6
50% folhas amareladas - Maturação	3,7

Fonte: Fundação MT (2004)

3.16. TEOR DA MATÉRIA ORGÂNICA E CTC

Nas terras arenosas devido aos baixos valores de MO, da ordem de 1,5 a 1,1 % na superfície e 0,8 a 0,6 % na subsuperfície, sendo que a Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

devido a esta MO está na faixa de 50 a 75% (ou mais elevadas nos solos do Brasil Central) destas cargas, verificando que a MO nestes solos será de valor inestimável.

Na Figura 3 indica a correlação entre a CTC em cmol/dm^3 e o teor de matéria orgânica dos solos indicados por Carolino de Sá M.A, et al. 2022 em solo do Brasil Central.

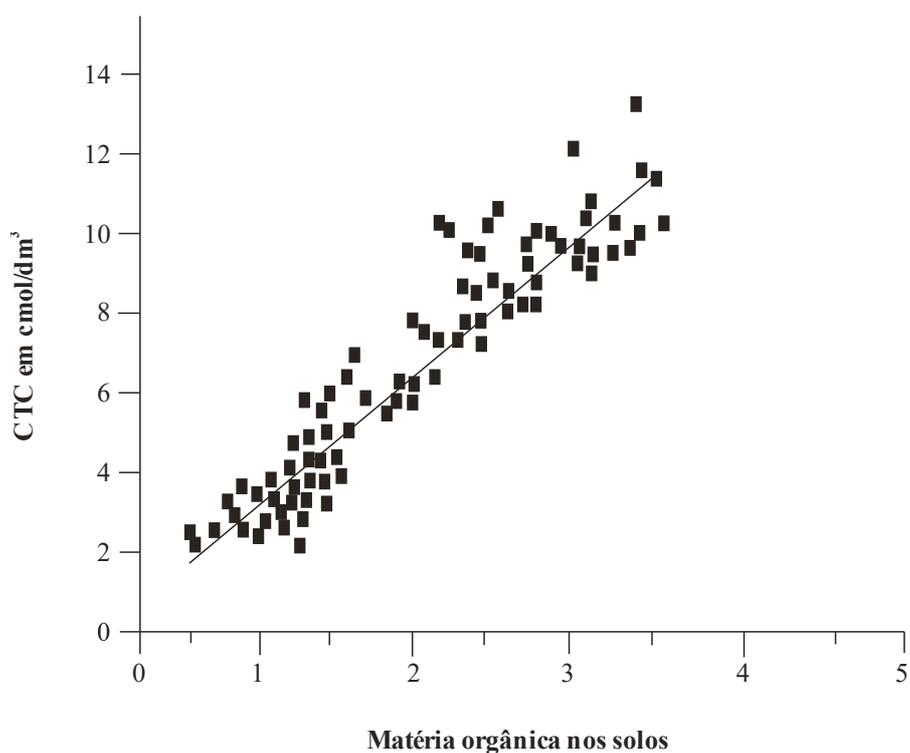


Figura 3 - Valores de cargas medidas pela CTC em cmol/dm^3 , e teores de matéria orgânica em percentagem. **Fonte:** Carolino de Sá M.A et al. (2022)

Além dos baixos valores de matéria orgânica tais solos devido às limitações destas terras, em termos de análises de solos, não devem ser cultivadas de 0-20 cm como tem sido feito, sendo infértil em profundidade. Sendo que as amostras deveriam ser fornecidas em maiores profundidades, posição está vindo de diversos pesquisadores.

Por outro lado, nestes solos não somente em termos de nutrição que devem se basear, mas sim no intervalo de água disponível. Sabe-se que os teores de água disponível devem ser vistos numa variação no intervalo de 1/10 – 15 atm e não no intervalo 1/3 – 15 atm, assim como observar as relações de areia fina/areia grossa, e da rugosidade, elas contribuem para aumentar a água disponível.

Nesta questão das areias, verifica-se nos trabalhos de Fidalski J. et al. (2013), trabalhando em duas Formações Geológicas com solos arenosos, o arenito Caiuá e arenito Paranaíba, noroeste do Paraná, que não diferenciam entre si em termos de textura na profundidade de 0-40 cm, inclusive na cultura de soja.

Tais autores verificaram uma maior produtividade de grãos de soja, após braquiária, no arenito Paranaíba em relação ao arenito Caiuá devido ao fato de que no arenito Caiuá apresentava maior areia grossa em relação a areia fina que refletia na quantidade de água disponível (Tabela 11).

O diagnóstico preciso da quantidade de areia fina e grossa é fundamental para verificar o potencial de determinada área para cultivo de espécies graníferas anuais como a soja.

Tabela 8 - Características granulométricas e carbono orgânico por camada de solo nas áreas de integração lavoura-pecuária e abacaxi nas Formações de arenito (Caiuá e Paranavaí), no noroeste do Paraná.

Camada (cm)	Argila	Silte	Areia			Carbono Orgânico
			Total	Fina ⁽¹⁾	Grossa ⁽¹⁾	
g kg ⁻¹						
Integração lavoura-pecuária na Formação Caiuá						
0 – 10	70	10	920	145	775	5,64
11 – 20	90	10	900	150	750	3,91
21 – 40	120	10	870	130	740	3,59
Média ⁽²⁾	92 Aa	10 Aa	897 Aa	142 Aa	755 Aa	4,38 Aa
Integração lavoura-pecuária na Formação Paranavaí						
0 – 10	90	10	900	332	568	6,46
11 – 20	120	20	860	305	555	5,68
21 – 40	145	10	845	276	575	3,74
Média ⁽²⁾	118 Aa	12 Aa	870 Aa	304 Aa	566 Ba	4,83 Aa
Abacaxi na Formação Caiuá						
0 – 10	30	90	880	280	600	7,28
11 – 20	40	70	890	290	600	5,64
21 – 40	80	10	910	290	620	3,50
Média ⁽²⁾	50 Aa	57 Aa	894 Aa	287 Aa	607 Ab	5,47 Aa
Abacaxi na Formação Paranavaí						
0 – 10	80	20	900	380	520	7,55
11 – 20	100	20	880	350	530	7,32
21 – 40	130	20	850	320	530	4,87
Média ⁽²⁾	103 Aa	20 Aa	877 Aa	350 Aa	527 Bb	6,58 Aa
Caiuá ⁽²⁾	72 B	33 A	895 A	214 b	681 A	4,93 A
Paranavaí ⁽²⁾	111 A	17 B	973 A	327 A	546 B	5,94 A

⁽¹⁾Areia Fina (0,02 – 0,2 mm) e areia grossa (0,2 – 2 mm) (Santos et al., 2005). ⁽²⁾Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si as formações (Caiuá e Paranavaí) e letra minúscula não diferem entre si as áreas (integração lavoura-pecuária e abacaxi) pelo teste t (p<0,05)

Fonte: Fidalski J. et al. 2013

Em consequência destes resultados foi determinado a retenção de água do solo na profundidade de 0-40 cm indicando que a Formação Paranavaí, em toda a extensão das curvas, se mostrou superior a Formação Caiuá estando neste aspecto a grande diferença destes solos arenosos (Figura 4).

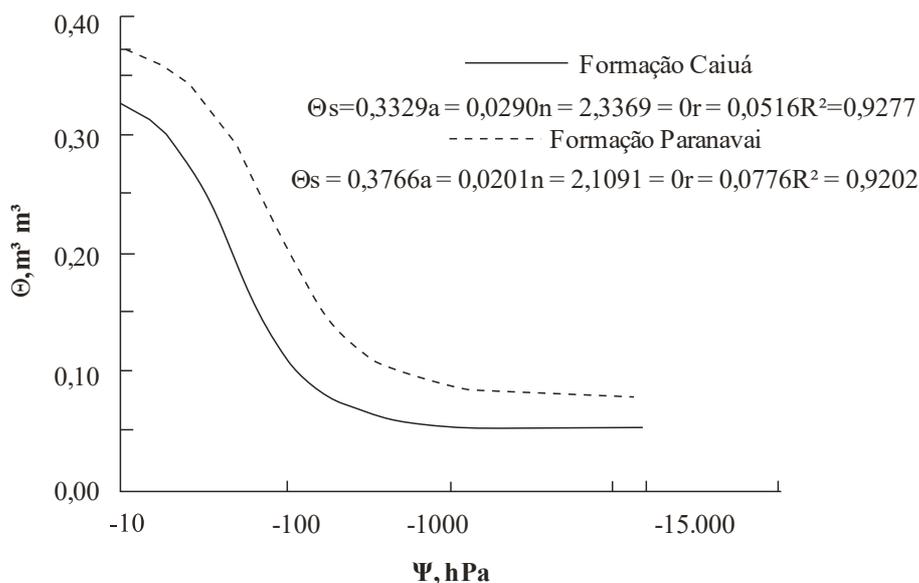


Figura 4 - Curvas de retenção de água do solo (0-40 cm) nas formações de arenito (Caiuá e Paranavai), no noroeste do Paraná. **Fonte:** Fidalski J. et al. (2013)

Tal situação ilustra que não somente dos nutrientes e sistemas de manejo adotados na produtividade da soja, mas deve ser visto também as relações de areia grossa e fina, pois tem impacto na retenção de umidade e, portanto, na produtividade.

3.17. A QUANTIDADE DE PALHA E O TEOR DE NITROGÊNIO

Em situações em que há grande quantidade de palha de espécies forrageiras, com alta relação C/N, e solos arenosos, tem sido questionado sobre os supostos benefícios da adubação nitrogenada sobre o desempenho da soja cultivada em sucessão. Em trabalho desenvolvido em Iporã, PR, constatou-se que a fertilização nitrogenada com 20 ou 45 kg/ha de N aplicados em diferentes estádios da cultura não promoveu aumento no crescimento das plantas e na produtividade de grãos (Balbiniot Junior et al. 2014).

Tem sido a posição de consultores e agricultores que a grande importância de terraceamentos e do cultivo em nível na retenção das águas de enxurradas fazem parte da conservação dos solos e da água inclusive no plantio direto (PD) e permanente assim como nas culturas de cobertura.

Como exemplo na Tabela 12 indica teores de argila variável e tipos de solos arenosos (como LV4-15 a 25% argila, AQ, PV4 – 15-25% argila em subsuperfície, nas profundidades

de 0-100 cm) em áreas de Fornecedores do Oeste de São Paulo, e na Região de São José de Rio Preto, também no Oeste de São Paulo, com argissolos, latossolos e neossolos com teores de argila em superfície e subsuperfície em cultura de cana-de-açúcar (Demattê J.L.I. (2018). Nestes tipos de solos os teores de alumínio em profundidade são elevados.

Tabela 9 - Resultados com solos arenosos com teores de argila em fornecedores de cana de açúcar na região de São José Rio Preto, SP.

Exemplos de solos arenosos			Solos arenosos – São José do Rio Preto, SP.				
Profundidade (cm)	Argila %	Solo	Profundidade (cm)	Argila %	Solos	Teor de argila	
						Superfície	Subsuperfície
0 – 20	13	PV4	0 – 20	13	Argissolo	<10	< 20 a 25
20 – 100	18		50 – 100	22		10 a 15	25 a 35
0 – 20	12	PV4	0 – 20	12	Latossolo	10 a 15	>35
20 – 100	19		50 – 100	17		15 a 25	15 a 25
0 – 20	10	Argissolo	0 – 40	12	Neossolo	25 a 35	25 a 35
20 – 100	12		41 – 100	27		<15	<15

Fonte: Demattê (2020).

Na Figura 5, (Demattê JAM 2019) representam perfis diversos de solos arenosos da região oeste de São Paulo com AQ, perfis latossólicos e solos podzolizados recobrimdo basalto sendo seus perfis mais avermelhados (itens A, B e D), o de Minas Gerais mais pardacentos (item C). O perfil podzolizado desenvolvido de arenito (item E) e argissolo (item F) da região de Piracicaba, SP.

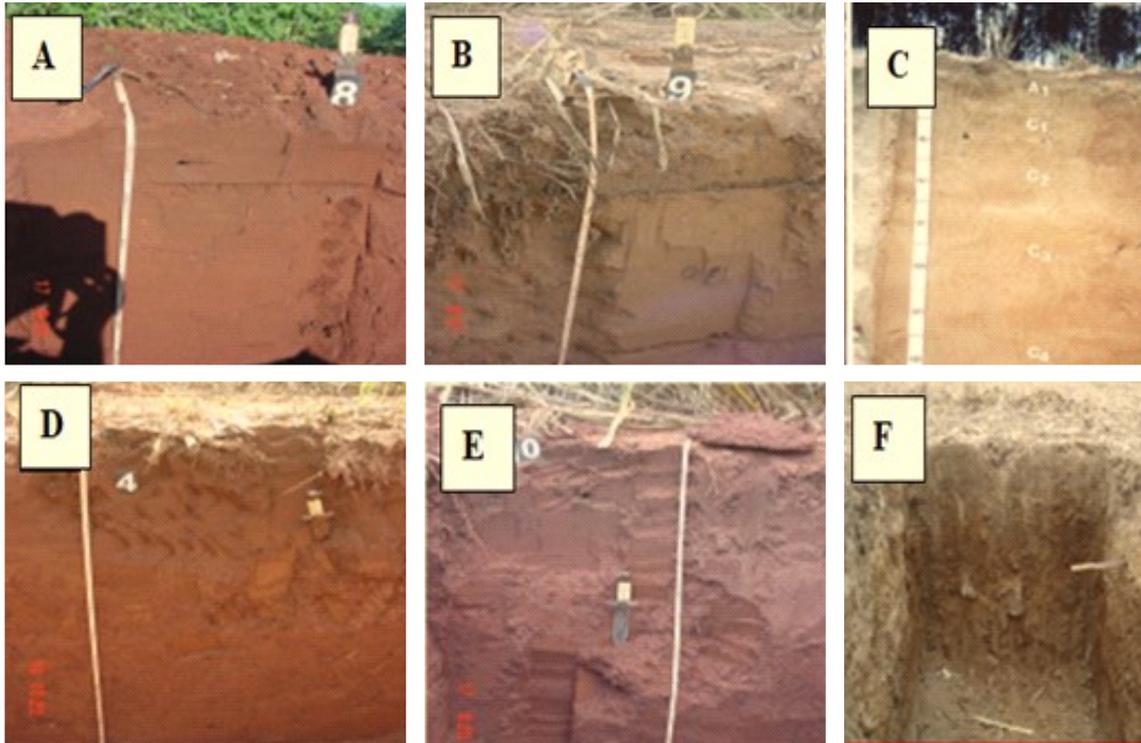


Figura 5 - A, B e D perfil de RQ (AQ) desenvolvida sobre basalto e C em Minas Gerais, E solo podzolizado e F argissolo da região de Piracicaba, SP. Fonte: Demattê JAM. 2019

3.18. SOJA NO SISTEMA LAVOURA – PECUÁRIA – FLORESTA (LPF)

Neste sistema, Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF), o agricultor teria a madeira como renda assim como o sistema de pecuária fazendo com que os animais tenham condições de se beneficiarem com um clima mais ameno. Em relação aos cultivos de culturas anuais o sistema de manejo pode ser interessante nestes tipos de terras, porém eles devem ser distanciados da Floresta.

No caso da soja tem sido questionada, em reuniões técnicas, sobre se as terras arenosas podem produzir, em equivalência de solos mais argilosos, tanto em cultivo solteiro assim como associados em florestas. Tais pesquisadores assim como a Embrapa argumentam se a baixa fertilidade destes solos for corrigida, se níveis de nutrientes em profundidades forem adequados através da calagem, gesso e o pH corrigido, e as culturas de cobertura forem instaladas, estes solos vão apresentar grande potencial para o cultivo da soja.

No noroeste do Paraná, município de Santo Inácio, Franquini et al. (2016) respondeu a tais questionamentos alegando que a soja foi plantada próximo às árvores de eucalipto, quando este estiver adulto, após 3 anos, a produtividade da soja será menor comparado a área solteira.

Em relação a tal aspecto, verificaram que a soja, nas duas safras, a produtividade nos entre renques com as árvores de eucalipto no estágio inicial de crescimento, não houve diferença na produtividade com a área solteira (Franchini J.C et al. 2016).

Entretanto, na terceira safra, 2011/12, a produtividade normalizada da soja solteira foi de (2.790 kg/ha) com 96,2% contra a soja cultivada na presença de árvores de 93,3%, indicando com isso que a soja próxima ao eucalipto desenvolvido causa redução na produtividade.

Na safra 2012/13 a produtividade em área solteira foi de 2.964 kg/ha sendo 27% maior junto ao eucalipto desenvolvido.

Tais considerações indicam que a soja pode ser plantada a 14 m da cultura de eucalipto até a terceira colheita, a partir desta a produtividade será menor. Uma das formas de reduzir as perdas de produtividade da soja neste sistema seria o de aumentar a faixa da soja em relação ao renque de eucalipto.

Por outro lado, tais pesquisadores observaram que a soja em plantio solteiro e após a braquiária a produção foi semelhante aos solos argilosos.

3.19. O PAPEL DO CÁLCIO NOS SOLOS EM CULTURAS ANUAIS E PERENES

A maior macroporosidade nas terras arenosas e o PD faz com que a translocação do corretivo na forma de CaCO_3 aplicado em área total ocorra. Neste particular o corretivo, além do pH, aumenta a CTC específica em profundidade, reduzindo a ação do alumínio tóxico que pode apresentar valores de 20 até 80% no perfil de solo e bloqueiam qualquer ação de desenvolvimento de culturas.

Em subsolos deficientes em cálcio a raiz para de crescer por não encontrar o nutriente no solo. O íon Ca^{2+} não se transloca nas plantas e, portanto, há de ter cálcio no solo em profundidade no perfil para que as plantas cresçam e se desenvolvam (Ritchey, K.D; et al. 1980).

Para aplicações em profundidade de cálcio, sem o calcário, pode ser utilizado o gesso assim como outros produtos contendo Ca^{2+} solúvel (biológicos ou químicos), sendo que seria uma possibilidade adequada para incorporar cálcio em profundidade onde o calcário não consegue.

O nutriente é absorvido pela parte jovem das raízes não suberizadas sendo necessário que ela vá buscar o nutriente sempre na direção do crescimento da cultura. Uma vez absorvido pela planta ele (o Ca^{2+}) é transportado através da corrente transpiratória e permanece no tecido de destino, sendo pouco móvel (Quaggio, 2000). Assim o sistema radicular não tem como receber cálcio vindo de outras partes da planta, e nestes aspectos não há como os solos em profundidade serem férteis.

3.20. TEORES DE BASES (Ca+Mg+K) EM CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR, VARIAÇÕES DE pH 7,0 A 4,5

Numa simulação em solo arenoso com valores de CTC de 2,5 e 4,0 obtido na Usina Costa Pinto em Piracicaba, SP, (Demattê, J.L.I. 2020) os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} decrescem em função do pH efetivo, de 6,0 a 4,5. No caso de um pH de 4,5, há suficiente H-Al para se dissociarem criando cargas e aumentando o pH.

O acréscimo de pH 4,5 para pH 6,0 seria de 1,5 unidades para uma CTC efetiva de 2,5 cmol/dm^3 e de 2,7 unidades para uma CTC efetiva de 4,0 cmol/dm^3 . A saturação de bases neste caso seria de 20% (menor teor de bases) a 60% (maior teor de bases) e com ganhos dos teores de Ca+Mg+K substancial como se verifica (Tabela 13).

Caso contrário haverá perdas de bases e incremento de H+Al , não é interessante a cultura. Como se vê as correções em profundidade além dos 0-20 cm ou 0-40 cm seria fundamental.

Tabela 10 - Correlação entre capacidade de troca de solos arenosos e sua relação com a soma de bases e índice V%.

Profundidade do solo em cm	pH H ₂ O	CTC efetiva (cmol, dm ³)		Soma de bases	V %
	pH 7,0	2,0 a 3,0	3,1 a 5,0	Ca + Mg + K	
0 – 100	Média pH 7,0	2,5	4,0	7,0 a 7,5	70 a 75
	6	2,3	3,7	6,0 a 6,5	60
	5,5	2,0	2,7	5,0 a 5,7	50
	5	1,5	1,7	3,0 a 4,0	30
	4,5	0,8	1,0	2,0 a 2,5	20

Fonte: Demattê (2020)

CAPÍTULO 4: CULTURAS DE COBERTURA

4.1. ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS

A rotação de culturas foi definida como sendo alternância ordenada de diferentes culturas, em um determinado espaço de tempo (ciclo), em uma mesma área e na mesma estação do ano. Seria o caso da rotação de aveia preta (*Avena strigosa*) + nabo (*Brassica rapa*)/milho (*Zea mays*) - aveia branca (*Avena sativa*)/soja (*Glycine max*) - milho safrinha/soja – trigo (*Triticum spp.*)/soja. Neste caso, ocorre a alternância de espécies dentro de uma mesma estação, sendo que no inverno cultiva-se 25% da área com aveia preta + nabo forrageiro, 25% com aveia branca para grão, 25% com milho safrinha e 25% com trigo enquanto no verão cultiva-se 75% com soja e 25% de milho (Carvalho et al. 2022).

A sucessão de culturas é definida como sendo o ordenamento de duas culturas na mesma área agrícola por tempo indeterminado, onde cada uma é cultivada em uma estação do ano. Neste caso, tanto o trigo como o milho safrinha são cultivados em 100% da área todos os anos no inverno e a soja 100% todo o ano no verão (Francchini et al. 2011). As culturas componentes destes sistemas devem apresentar determinados princípios, como a produção suficiente de fitomassa tanto da parte aérea como do sistema radicular, bem como promover condições favoráveis que diminuam os ataques de pragas e doenças, dentre outros.

4.2. CULTURAS DE COBERTURA

As plantas de cobertura foram um grande marco no sistema agrícola do país, pois elas apresentam uma série de dados importantes no sistema solo-clima-cultura principal, sendo que o sistema final seria o controle de erosão e a ciclagem de nutrientes. Tais culturas podem estar associadas a culturas anuais, semi-perenes e perenes como eucalipto, citros, café etc. É fundamental que as culturas de cobertura ofereçam contínua cobertura do solo através da biomassa residual sendo que a quantidade e qualidade desta biomassa seja direcionada para a produção.

Na Figura 6 ilustra o trabalho de Bertol, I. et al. 2009 sobre a influência do sistema de cobertura em relação à erosão. Neste trabalho há coberturas de plantas e sem cobertura. No sistema sem plantas de cobertura, a quantidade de água no compartimento correspondente é

suja, indicando que o solo sem cultura de cobertura pode erodir e no solo com cobertura o compartimento de água é mais limpa, indicando que a erosão é menos acentuada.



Figura 6 - Calhas coletoras, com o divisor de enxurrada tipo “Gibb” entre as caixas. **Fonte:** Bertol I.

Aliado às culturas de cobertura, o sistema de preparo do solo se desenvolve com o mínimo revolvimento, ou seja, plantio direto e na palha, sendo que as culturas de cobertura podendo ser dessecadas.

Em um plantio de grãos, dependendo do sistema climático, como no Brasil Central, com as condições de precipitação de 70 a 80% desde meados de outubro até maio, seria possível cultivar duas culturas principais, a soja e o milho, sendo que o milho seria uma segunda cultura, a produtividade é mais baixa, sendo designado como milho safrinha, porém com culturas de cobertura.

BARBOSA (2019) observou que o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas apresentou a ordem: $K > N > Ca > Mg > P > S$ para ambas as espécies, onde o colmo foi o principal órgão de acúmulo de nutrientes, A exportação de nutrientes pelos grãos seguiu a ordem $N > K > Ca > Mg > P > S$ para *C. juncea* e $N > K > P > Ca > S > Mg$ para *C. spectabilis*. A *C. juncea* acumulou maiores quantidades de nutrientes e matéria seca, bem como o tempo necessário para o máximo acúmulo foi maior em relação à *C. spectabilis*.

No Brasil há diversos sistemas de culturas de cobertura, relacionados às condições de clima, e, portanto, diversos nomes regionalizados aparecem como no Sul do país, em São Paulo, Minas Gerais, Amazonas etc.

4.2.1 Principais Características das Plantas de Cobertura

As plantas de cobertura, para os diversos cultivos devem ser plantadas no período úmido e ter as seguintes características: fácil estabelecimento; reciclagem de nutrientes de solo; rápido crescimento; tolerância ao déficit hídrico; proporcionar rápida e alta produção de biomassa; boa cobertura do solo; auxiliar no sistema integrado de manejo de plantas daninhas; não serem hospedeiras de pragas e doenças; reduzir a multiplicação de nematoides; sistema radicular vigoroso para a manutenção de umidade assim como permite aumentar a infiltração de água e ar; redução da erosão; aumento da matéria orgânica degradável dos solos; mineralização de nutrientes, principalmente de fósforo e potássio, dentre outros (Figura 7).

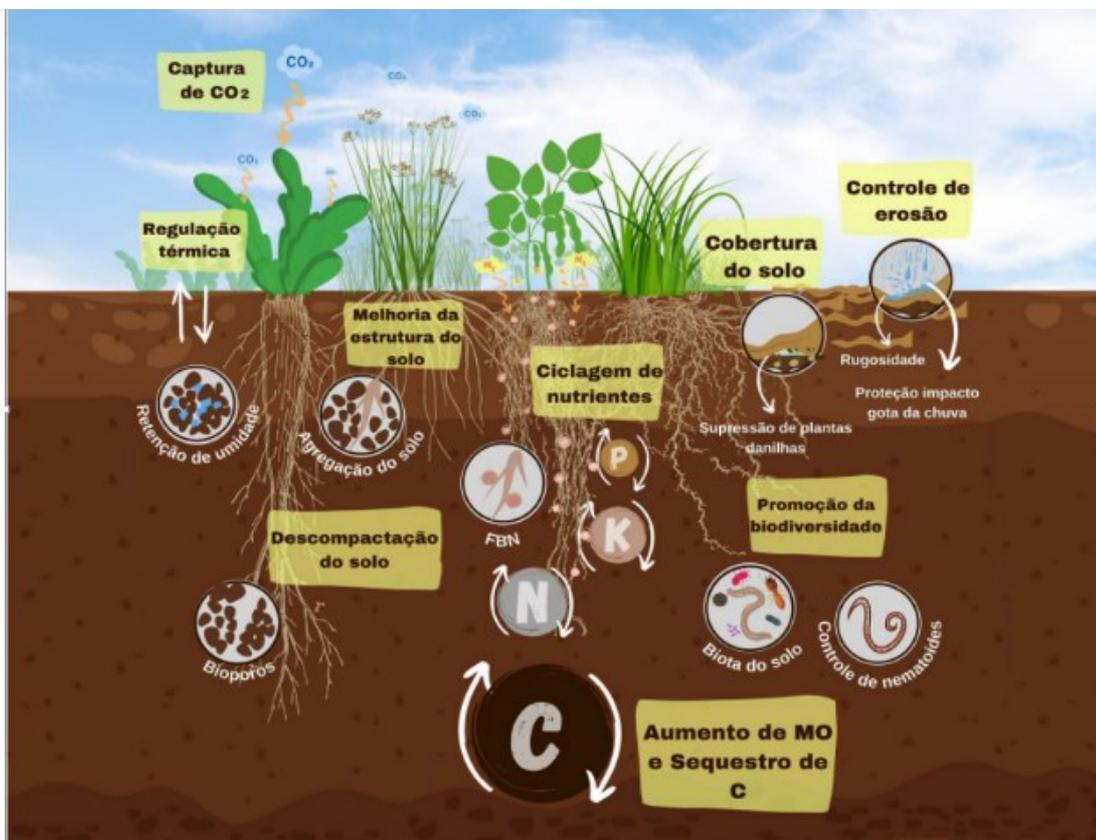


Figura 7 - Benefícios ao funcionamento do solo fornecidos pela utilização de plantas de cobertura. **Fonte:** Carvalho M.L (2022).

Como se verifica é muito grande as características das plantas de cobertura em termos de Brasil. A seguir, um resumo das principais culturas de cobertura:

- **Braquiárias** (*Brachiaria spp.*): se adaptou em todo o Brasil, com diversos cultivares, tanto em culturas anuais, como semi perenes e pastagens, tanto em consórcio com milho e pastagens, assim como em outras culturas como citrus e café. No sistema de ILPF foi dado o apelido de “Santa Braquiária” por Cardoso (1996). Entre outras qualidades produzem elevada quantidade de matéria seca além de terem um sistema radicular abundante, extraindo diversas quantidades de nutrientes, reciclando e melhorando a infiltração das águas e ar do solo, reduzindo a erosão, o escoamento superficial da água, a desagregação da estrutura e mantendo o solo coberto.

- **Milheto** (*Pennisetum glaucum*): gramínea anual de fácil instalação, condução e produção de sementes. O sistema radicular é vigoroso, reciclando diversos nutrientes do solo, principalmente potássio. Apresenta boa tolerância à seca e se adapta a solos de baixa fertilidade, e apresenta boa capacidade de cobertura do solo, porém inferior às braquiárias.

- **Crotalárias** (*Crotalaria spp.*): são leguminosas com a grande vantagem de fixarem o nitrogênio atmosférico e são de diferentes hábitos de crescimento. Uma das mais vigorosas como a *C. juncea*, sendo superior a 1,0 metro e as de menor porte como as *C. spectabilis*, *C. ochroleuca* e a *breviflora*.

- **Regiões mais frias:** as culturas de nabo, tremoço, ervilha, aveia, assim como culturas principais como trigo, milho safrinha etc. Na primavera/verão culturas como soja e milho, pois assim os consórcios são comuns.

- **Regiões mais secas:** Brasil Central, são comuns as crotalárias, milhetos e braquiárias, podendo ter o guandu, colônia (*Panicum maximum*) e predominando no verão culturas de soja, milho, algodão etc.

4.2.2. Exemplos de Culturas de Cobertura nos Tabuleiros de Uberaba

Nos tabuleiros (áreas planas de altitude maior de 800 m) de Uberaba - Mg (Franco, 2007), o autor verificou que as produtividades relacionadas à matéria seca em t/ha de uma série de culturas de cobertura assim como as relações C/N e as extrações de potássio, na forma de K, estão indicadas na Tabela 14.

Essas extrações, principalmente pela braquiária e milho, foram respectivamente em termos de potássio na forma de K, 214 e 219 kg/ha no final do ciclo de um solo de textura média arenosa. Após 42 dias observou-se que a braquiária já havia liberado 44% e o milho 51% de potássio. Após 210 dias a liberação foi respectivamente de 11% e 32%.

Neste aspecto o milho seria considerado em termos de extração de potássio um produto de liberação lenta juntamente com as demais culturas, em comparação com a braquiária. A área de pousio teve um desempenho bem inferior às demais culturas na faixa de 2,1 t/ha de MS.

Tabela 11 - Teor de potássio (K) nas culturas de cobertura ciclo de agosto a abril safra 2000/2001.

Cultura	Matéria seca	Relação	K acumulado		Dias após manejo		
	MS		C/N	Após 42 dias		164	210
	kg/ha	kg/ha		kg/ha	%	%	%
Pousio	2.1	19	23	21	91	22	12
Milheto	10.3	21	219	112	51	43	32
Sorgo	7.1	24	194	84	80	37	30
Crotalária	3.9	11	59	33	55	36	32
Aveia	2.4	30	33	15	45	36	25
Guandu	1.6	11	31	23	74	36	30
Braquiária	6	16	214	96	44	21	11

Fonte: Franco, 2007. RBCS (2008).

As coberturas de plantas ao solo oferecem resistências às erosões. Na Figura 8 verifica-se que à medida que as culturas de cobertura aumentam a erosão diminui.

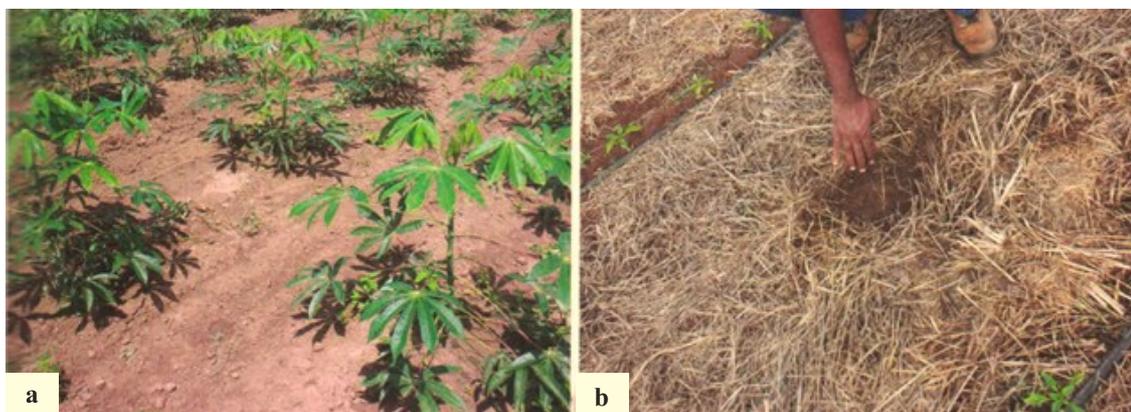


Figura 8 - Áreas de cultivo com solo descoberto (a), exposto à ação das chuvas, e área utilizando a prática de cobertura morta (b) com fitomassa residual para proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva. Fonte: De Maria, I.C. et al. (2019)

Como as culturas de cobertura são importantes no sistema de manejo, os agricultores tendem a obter sementes visando atribuir as melhores características das limitações do meio, como solo, clima e cultura etc.

Para Ferreira A.C.B et al. (2016), trabalhando com o sistema, utilizaram o “Valor Cultural da Semente” (VC) obtido em porcentagem de germinação de 100, 60 e 40% (Tabela 15).

Tabela 12 - Quantidade de sementes por hectare de plantas de cobertura em termos da qualidade.

Espécie / cultivar	kg/ha	kg/ha	kg/ha
	sementes	sementes	sementes
	VC de 100%	VC de 60%	VC de 40%
Panicum maximum cv. Mombaça e Tanzani	2.0 a 3.0	3.3 a 5	5 a 7.5
Panicum maximum cv. Aruana	2.0 a 4.0	3.3 a 6.7	5 a 10
Panicum maximum x P. Infestum (Híbrido Massai)	2.0 a 2.5	3.3 a 4.2	5 a 6.3
Brachiaria ruziziensis	2.0 a 4.0	3.3 a 6.7	5 a 10
Brachiaria brizantha cv. Piatã, MG 4, MG 5	3.0 a 5.0	5.8 a 8.3	8.8 a 12.5
Sorgo granífero	10.0 a 15.0	16.7 a 25	25 a 37.5
Milheto	10.0 a 12.0	16.7 a 20	25 a 30
Crotalária spectabilis	8.0 a 12.0	13.3 a 20	20 a 30
Crotalária ochroleuca	4.0 a 8.0	6.7 a 13.3	10 a 20
Crotalária juncea	20.0 a 30.0	13.3 a 50	50 a 75
Guandu	20.0 a 30.0	33.3 a 50	50 a 75

(1) VC= Valor cultural. Quantidade de semente /ha = quantidade de semente 100% de germinação e 100% de pureza 100/VC

Fonte: Ferreira et al. 2016.

4.3 PLANTAS DE COBERTURA: PAPEL DA BRACHIARIA BRIZANTHA

Para Franchini J.C *et al.* (2016) são unânimes em afirmar que nas áreas arenosas a cobertura do solo com espécies forrageiras de metabolismo C4, que apresentam alta relação C/N, como as *U.brizantha* é fundamental, não somente no controle da erosão, mas em relação a diminuição do selamento dos sulcos, no controle de ervas daninhas, na ciclagem de nutrientes, bem como no aprofundamento do perfil podendo chegar a 1,0 m de profundidade. Foi observado também que na sucessão de culturas antes da soja a *U. brizantha* tem a opção de descompactar o solo favorecendo com isso os benefícios com a infiltração das águas, por exemplo.

Dados obtidos pelos autores indicaram que a massa seca de raízes da *U. brizantha* “Xaraes” na camada de 0-100 cm foi de 9,0 t/ha aos 18 meses após a semeadura. Entretanto,

em áreas com elevada população de nematoides como *Pratylenchus brachyurus*, o uso de braquiárias deve ser avaliado com muito critério, pois são hospedeiros.

A redução da evaporação deve ser feita também com a cobertura viva ou morta sendo que 3 a 6 t/ha de palha de aveia preta em solo com 13% de argila na camada 0-30 cm em PD proporcionou redução de perda de água de 18% e 38% comparado com solo desnudo. Tal redução é devido a reflexão da radiação solar pela palhada e a redução dos picos da temperatura sendo outro benefício da cobertura do solo, onde foi observado em solo arenoso na camada 0-5 cm com redução de até 9,1°C na temperatura máxima.

4.4. CULTURAS DE PROTEÇÃO EM SISTEMAS AGRO-FLORESTAL

No sistema de integração designado de ILPF (Integração lavoura-pecuária-floresta) inclui cultivos de grãos com silvicultura, grãos com pastagens, sendo que culturas de proteção são adequadamente instaladas.

Neste aspecto, tais sistemas têm sido pesquisados por órgãos públicos como Embrapa, empresas privadas, cooperativas, institutos de pesquisas etc. Independente do sistema utilizado, tem sido propício à colocação de culturas de cobertura numa sucessão de espécies de acordo com as diversas regiões do Brasil, nos mais diversos solos e topografias.

No sistema ILPF, as possibilidades são inúmeras de combinação com os componentes agrícolas de grãos, pecuária e floresta, gerando renda e assim tornar a região adaptada para a produção diversificada. O ILPF é recente no Brasil, como nas regiões do Paraná, Goiás, Mato Grosso Sul, Minas Gerais e outras. Entretanto, tem sido utilizado há mais de centenas ou milhares de anos, inclusive na antiguidade, principalmente na Europa, assim como por índios do Brasil.

Na Figura 9 indica um sistema ILPF, com floresta e pecuária (De Maria et al 2019), assim como uma cultura de cobertura de Kudzu sobre bananeira na Amazônia (Leal, M.A.A. et al 2019).

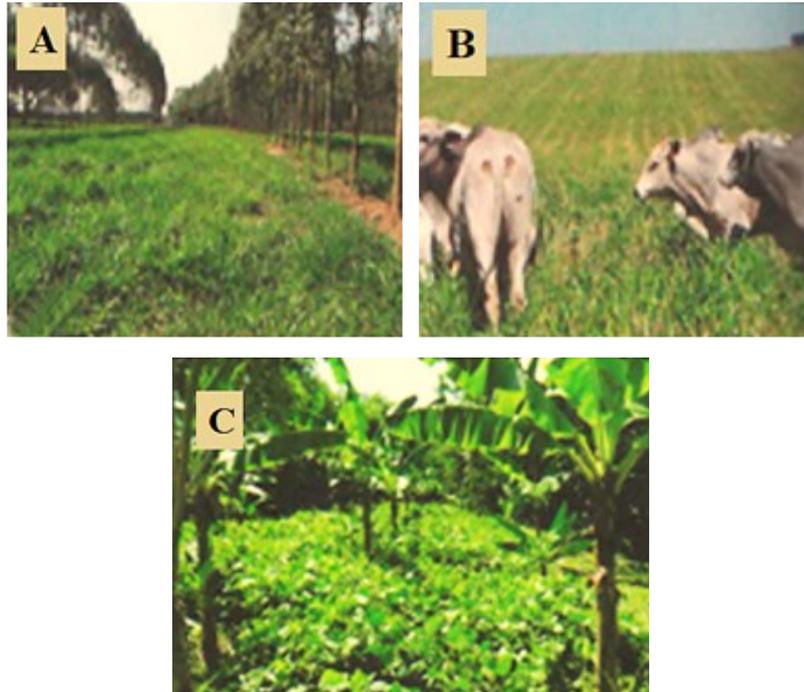


Figura 9 - Culturas num sistema de Integrado Lavoura-Pecuária e Floresta (A e B) e sistema com bananeira protegido com Kudzu. (C) na Amazônia. **Fonte:** (A e B) De Maria, I.C, et al. 2019. e (C) Leal, M.A.A et al. (2019)

4.5. CULTURAS DE COBERTURA EM SOJA EM SOLO ARENOSO

A Embrapa do Paraná (Franchini *et al.* 2016) desenvolveu trabalhos em solos arenosos em soja e as coberturas com as diversas *Ruziziensis*, *Tanzania* + *Ruziziensis*, *Brisantha* e *Tanzania* com produtividade da soja, em g/ha, variando de 2.826 (*Tanzania*) a 3.426 (*Ruziziensis*) (Figura 10).

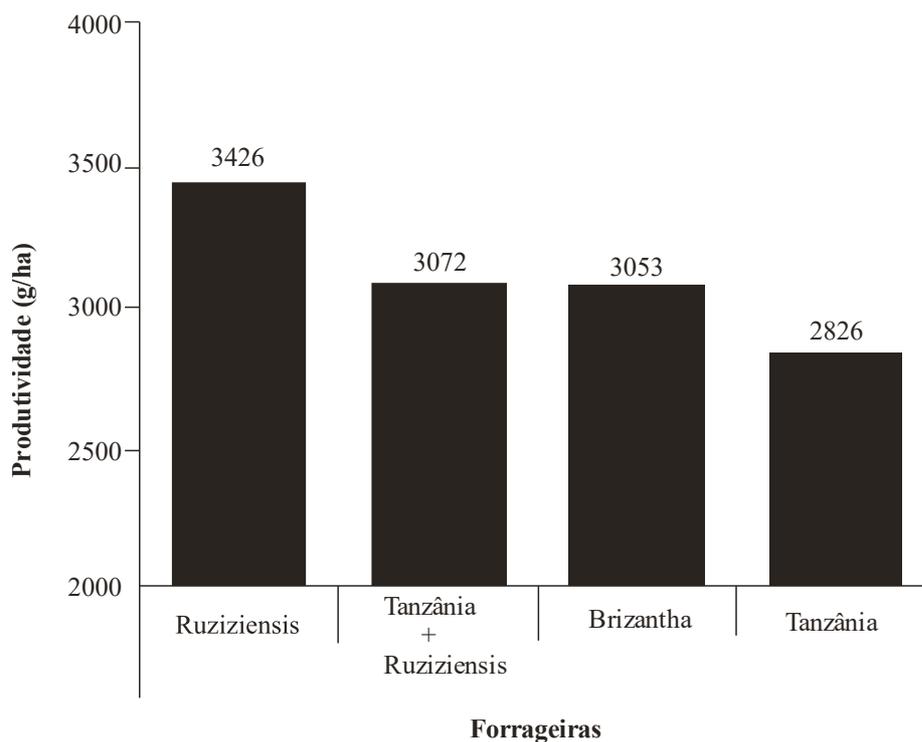


Figura 10 - Produtividade da soja cultivada após diferentes espécies forrageiras. Estância JAE, 02/2007, Santo Inácio – PR. **Fonte:** Franchini et al. (2016)

4.6. CULTURAS DE COBERTURA NO SISTEMA SOJA-MILHO-ALGODÃO

Há necessidade de regionalizar as culturas de cobertura, pois com raras exceções, elas são diferentes. Assim, como no Oeste Baiano, a produtividade de soja, milho e algodão está aumentando graças aos avanços da tecnologia. Nas áreas planas ou ligeiramente onduladas é possível utilizar os equipamentos de elevado rendimento. Entretanto, em muitas áreas ainda prevalece o sistema convencional de preparo do solo (SCP) com forte mobilização no uso de máquinas e implementos, com todos os inconvenientes sabidos a este sistema.

Nesta região na cultura de algodão, que pode durar na faixa de 200 dias, a rotação de culturas de cobertura é de fundamental importância para manter o solo coberto, sendo sua palhada suficiente para o plantio da soja e, posteriormente, o algodão.

Algumas espécies de culturas principais apresentam grande capacidade de produção, como milho, sorgo, porém há um baixo potencial para cobertura do solo, pois grande proporção de biomassa é constituída por colmos, assim como o algodão, que apresentam pouca produção de restos culturais. Neste caso é desejável que a planta de cobertura antecessora apresenta

elevada persistência sobre o solo favorecendo a cultura sucessora, como por exemplo na Figura 11.

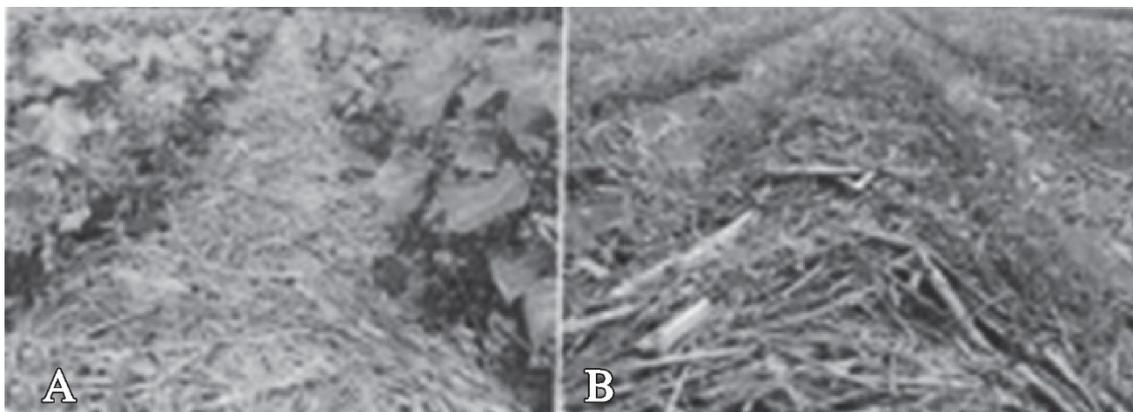


Figura 11 - Cultivo de algodoeiro em (A) e de soja em (B) em PD sobre palhada de milho + *Brachiaria ruziziensis* em solo arenoso. **Fonte:** Bogiani, J.C. e Ferreira, A.C., 2017.

Em regiões mais secas no inverno as culturas de proteção não resistem às intolerâncias do clima sendo que uma dúvida em relação a este tópico seria qual a quantidade de palha necessária para cobrir o solo. É difícil obter uma resposta, porém a planta de cobertura neste caso deve ter alta relação C/N, resistente às intempéries.

4.7. NUTRIENTES E CULTURAS DE COBERTURA UTILIZADAS NA BAHIA

A Tabela 16 ilustra a quantidade de macro (kg/ha) e micronutrientes (g/ha), respectivamente, em função das culturas de cobertura utilizadas no sistema usado na Bahia. Esses resultados indicam que tais plantas podem restituir nutrientes extraídos da subsuperfície do solo e os liberam após a decomposição dos seus resíduos (Duda G.P et al., 2003).

Por outro lado, verifica-se que as braquiárias e o milheto, em sucessão a soja, extraem bem mais nitrogênio, fósforo, enxofre, mas principalmente, mais potássio que as demais culturas (Tabela 16).

Os efeitos da ciclagem de nutrientes devido tais culturas é mais evidente em solos arenosos, como nos cerrados da Bahia, devido à maior lixiviação em subsuperfície do que em solos mais argilosos, principalmente potássio (Bogiani, J.C & Ferreira, A.C., 2017)

No caso da *Brachiaria brizantha* cv, Piatã, foi cultivada em sucessão a soja e a extração foi de 147 kg/ha de potássio na forma de K (equivalente a 306 kg/ha de KCl). Quando ela foi cultivada em consórcio com milho, a extração foi de 136,2 kg/ha na forma de K ou equivalente a 284 kg/ha de KCl, montante bem maior quando se compara com área em pousio com valores respectivamente em termos de K de 41,3 e 24,9 kg/ha. Apesar das plantas de cobertura apresentarem menos tempo de desenvolvimento em uma sucessão de soja em consórcio com milho, o potencial de ciclagem de K foi semelhante.

A rotação de culturas também possibilita o aproveitamento do nitrogênio deixado pela soja e que pode ser utilizado pelas culturas de cobertura posteriores.

Tabela 13 - Quantidade de macro e micro acumulados na biomassa de plantas de cobertura cultivadas em solo arenoso em sucessão a soja em consórcio com milho Luis Magalhães, BA safra 2015/2016.

Plantas de cobertura	N	P 205	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	(1) Micro acumulados em kg/ha						(1) Micro acumulados em g/ha				
Cultivo com sucessão à soja (3)											
Sem planta de cobertura (4)	31,9	5,3	41,3	16,5	9,6	4,3	412,0	10,8	84,1	75,7	32,5
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	63,6	5,3	61,1	52,3	21,1	4,5	951,0	18,3	111,8	153,8	83,9
<i>Brachiaria ruzizienzis</i>	87,3	6,8	149,4	22,9	20,1	5,8	394,8	10,2	79,5	100,7	55,7
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã	90,4	7,7	147,0	26,2	26,5	6,0	522,9	15,4	94,6	178,7	67,5
Milheto (<i>Pennisetum glaucum</i>)	65,0	8,7	136,6	35,6	22,2	9,9	619,4	15,0	174,7	177,9	66,7
<i>B. brizantha</i> cv. Paoiaguas	80,1	8,3	153,3	19,1	26,5	7,1	649,9	16,9	92,2	148,8	58,0
Guandu (<i>Cajanus cajan</i>)	65,5	4,8	16,0	16,9	14,6	4,9	553,9	17,2	55,9	68,9	35,5
<i>Crotalaria spectabilis</i>	62,2	4,0	93,4	16,7	14,5	4,9	332,9	6,9	50,4	55,0	36,10
Cultivo consorciado com o milho safra no sistema Santa Fé (5)											
Sem planta de cobertura (4)	27,4	3,7	24,9	12,1	5,1	2,4	344,3	8,3	72,9	65,5	41,1
<i>Brachiaria ruzizienzis</i>	48,8	7,2	101,6	24,3	16,9	3,9	320,5	10,4	93,0	151,3	38,4
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã	79,1	8,4	136,2	26,9	26,0	5,0	550,6	13,3	108,0	273,6	67,8
<i>B. brizantha</i> cv. MG 4	86,8	8,8	130,3	26,3	23,8	6,1	437,7	17,6	114,0	182,2	70,6
<i>B. brizantha</i> cv. MG 5	63,7	5,4	105,5	15,0	15,6	3,3	440,3	15,3	75,0	168,3	57,5
<i>B. brizantha</i> cv. Paoiaguas	63,0	6,4	96,2	18,8	22,8	4,5	405,0	8,6	82,1	169,8	53,9
<i>Crotalaria breviflora</i>	169,9	7,4	83,2	25,8	10,1	3,0	282,4	12,7	68,8	42,3	60,8
<i>Panicum maximum</i> cv. Aruana	97,2	7,9	134,0	33,6	28,8	7,3	664,0	20,7	141,0	169,7	60,8
<i>Crotalaria spectabilis</i>	82,5	7,8	69,6	69,8	13,3	6,4	293,3	15,8	94,6	94,0	98,2

(1) Macro nutriente e micronutriente

(3) Semeadura segunda quinzena março dessecação julho

(4) Resto cultura principal e plantas daninhas presentes na área

(5) Semeadura primeira quinzena dezembro e dessecadas em julho

Fonte: Bogiani, J.C. e Ferreira, A.C. (2017)

4.8. CULTURA DE LIMÃO COM BRAQUIÁRIA

As plantas de cobertura neste sistema devem apresentar diversas qualidades como produzir grande quantidade na parte aérea e que não seja degradável facilmente assim como

muita massa seca de resíduos. O sistema radicular deve ser agressivo, precisando ter lignina em sua composição em quantidades suficientes para contribuir com a matéria orgânica do solo. A braquiária apresenta essas características, diferentemente das leguminosas. Dados da literatura indicam que 1,0 t de massa seca da braquiária incorpora 5,0 a 12,0 t de massa seca de raiz podendo chegar a teores maiores do que o estipulado.

À medida que o sistema radicular se aprofunda no solo, a taxa de oxigênio decresce, uma vez que as raízes em profundidade necessitam pelo menos de 12% a 15% de oxigênio, sendo que a braquiária resiste a este déficit (Favarin J. L. et al., 2018)

A Figura 12 (De Maria I.C. et al 2019) ilustra o cultivo de Limão (a) e com pomar estabelecido com a braquiária na entrelinha. (b)



Figura 12 - Manejo de plantas invasoras (A) na entre linha de pomar recém-implantado; e (B) em pomar de limão manejado com roçadeira ecológica, concentrando a palha próximo a fileira de plantas. Fonte: De Maria I.C et al. (2019).

4.9. BRACHIÁRIA NA INTEGRAÇÃO AGRICULTURA E PECUÁRIA NO PD

A braquiária é utilizada em diversas regiões do Brasil devido a uma série de benefícios, como por exemplo: possui um bom valor alimentar e nutricional para os animais; produz sementes uma vez ao ano; fácil de ser manejada para evitar o praguejamento da área; é

extremamente sensível ao herbicida dessecante; no plantio da cultura principal é usado um herbicida de efeito residual curto, entre 50 e 60 dias.

A braquiária é semeada junto com o milho em outubro/novembro juntamente com a adubação da cultura principal. Após a colheita da cultura principal em março-abril, a braquiária produz excelente pastagem devido a adubação residual da cultura principal. Ela se estabelece permitindo uma pastagem de excelente valor nutritivo no período abril a outubro, quando ela é dessecada formando uma cobertura morta necessária para o plantio direto para a cultura principal.

4.10. CULTIVO CONSORCIADO DE MILHO E GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS

O Sistema conhecido como Santa Fé (MT) consiste no cultivo de milho para a produção de grãos e ao mesmo tempo cultivando uma espécie de forrageira, geralmente braquiária. Além de servirem de alimentação animal, fornecem matéria seca para a semeadura direta da cultura em sucessão. Neste caso o milho pode ser cultivado como cultura principal ou numa segunda safra designada de safrinha.

4.11. SISTEMAS PARA SEMEADURA DE BRAQUIÁRIA E DO MILHO

Neste caso há diversos sistemas para a semeadura da gramínea forrageira, como semeadura a lanço. Tal sistema após a dessecação da área e antes da semeadura do milho, deve proceder a semeadura de braquiária a lanço que vai ser incorporada ao solo pela semeadura do milho. No caso de grande massa da cultura anterior e após a semeadura da braquiária, e antes da semeadura do milho, recomenda-se passar um correntão na cultura anterior munido de discos ou facas.

Outro sistema seria a semeadura do milho junto com sementes de braquiária misturada com fertilizante ou então semeada em fileiras intercaladas com milho. Tal sistema pode ser adaptado tendo uma terceira caixa na frente da semeadora, onde as sementes são distribuídas no solo, inclusive a do milho (Luz, P.H & Otto, R, 2010).

Na Figura 13 ilustra o Consórcio entre espécies forrageiras e milho safrinha em semeadura direta com soja, no verão, após a colheita do milho, Médio Paranapanema, SP, (De Maria I.C et al., 2019).



Figura 13 - Consórcio entre espécies forrageiras e milho safrinha em semeadura direta com soja, no verão, após a colheita do milho, Médio Paranapanema, SP

4.12. PRODUTIVIDADE NO PLANTIO DIRETO (PD) E CONVENCIONAL (SC) NO OESTE BAIANO

Em trabalhos em solo arenoso, na região de Luís Eduardo Magalhães (BA), foi observado que ao longo de 3 anos a produtividade de soja, milho e algodão em PD, com as culturas de cobertura e em rotação, tem sido maior em relação ao sistema convencional (SC), sem a rotação e sem culturas de cobertura (BogianI, J.C. E Ferreira, A.C., 2017).

Na Tabela 17, em relação a produtividade no período de 10 anos, observaram que na implantação, no primeiro ano, houve necessidade de se proceder ao SC em um sistema de monocultura com a produtividade acumulada de 3.659 kg/ha. Posteriormente, no segundo ano de cultivo, em um SPD (Sistema de Plantio Direto) com a palhada na cobertura baseada nas *Brachiaria ruzizensis* e *Brachiaria brizantha* assim como na *Crotalaria spectabilis*, a produtividade foi além na faixa de 4.402 kg/ha, superior ao pousio de 4.014 kg/ha. No terceiro ano de cultivo, também com SPD, porém alterando a relação na rotação com algodão/milho/soja, assim como nas culturas de cobertura com a *B. brizantha* e a *C. spectabilis* a produtividade foi semelhante, entretanto superior ao pousio produtividade de 3.801 kg/ha.

Neste trabalho, assim como nos demais, pode-se observar que o SPD tem sido superior ao SC de preparo do solo.

Tabela 14 - Produtividade de algodão em caroço em sistema de rotação de soja, milho e algodão.

Culturas	Ano Letivo	Preparo do solo	Rotação	Cultura de cobertura	kg/ha
algodão/ algodão/ algodão	1º	SC		Monocultura	3659
algodão/soja/milho	2º	SPD		pousio/pousio	4014
algodão/soja/milho	2º	SPD	rotação	B. rozizensis + B.r	4100
algodão/soja/milho	2º	SPD	rotação	B. brizabta + B.b.	4134
algodão/soja/milho	2º	SPD	rotação	C. spectabilis + C.s	4402
algodão/milho/soja	3º	SPD		pousio/pousio	3801
algodão/milho/soja	3º	SPD	rotação	B. brizabta + B.b.	4162
algodão/milho/soja	3º	SPD	rotação	C. spectabilis + C.s	4151

Fonte: Bogiani, J.C. e Ferreira, A.C., 2017

Em regiões com período seco, a produtividade do milho safrinha pode ser inadequada, neste caso é indicado o sorgo granífero, mais resistente à seca.

4.13. PLANTIO REDUZIDO EM CULTURA SEMI-PERENE E PERENES

No ciclo dessas culturas semi perenes e perenes não há possibilidade de se falar em PD como há consenso em culturas anuais. O que se tem observado é o preparo reduzido de solos que tem sido evoluído no plantio na mesma linha do plantio anterior. Nas banquetas do plantio de café, citrus, tem sido utilizado o cultivo de plantas de cobertura como braquiária ou de grãos como na cultura principal, cana-de-açúcar, soja, amendoim, milheto, dentre outros (De Maria, I.C. et al 2019).

4.14. PREPARO REDUZIDO EM CANA-DE-AÇÚCAR

O preparo de solo reduzido na cana-de-açúcar está em franca evolução sendo extremamente favorável em relação ao sistema tradicional de preparo de solo com média de produtividade em quatro cortes, de 96 t/ha contra 77,2 t/há, respectivamente. Sendo assim, esses

resultados indicam que solos arenosos, devidamente manejados em nível de manejo compatíveis são adequados (Demattê, J.L.I. 2016).

Porém, Carolino de Sa et al (2022) indicou que na cultura de cana o Sistema Convencional e o Direto não diferem na palha (Tabela 18). Neste trabalho, afirmaram que 36 experimentos na literatura nacional em diversos solos, inclusive arenosos, mostram que a maioria da produtividade seria semelhante. Insiste que o termo “Plantio Direto” em cana-de-açúcar é inadequado, indicando que há expressiva mobilização do solo. O termo “Preparo Reduzido” seria o mais adequado, preliminarmente.

Tabela 15 - Usina Gasa, produtividade em função do sistema de plantio (Obs.: o termo plantio direto corresponde ao plantio reduzido).

Safra	Sistema Plantio	Categoria	TCH	
2011/12	Convencional Direto	1° C	94	119
			81	99
2012/13	Convencional Direto	2° C	79	90
			55	85
2013/14	Convencional Direto	3° C	77,2	96,0
2014/15	Convencional Direto	4° C		
Média	Convencional Direto		77,2	96,0

Safra	Sistema Plantio	Categoria	TCH	
			Min.	Máx
2011/12	Convencional Direto	1° C	94	119
2012/13	Convencional Direto	2° C	81	99
2013/14	Convencional Direto	3° C	79	90
2014/15	Convencional Direto	4° C	55	85
Média	Convencional Direto		77,2	96

Fonte: Demattê (2016).

Tabela 18: Produtividade em cana de açúcar em função do sistema de plantio

(Obs.: o termo plantio direto corresponde ao plantio reduzido)

Tabela 18. Produtividade da cana de açúcar (SP 81 3250			
e sistemas de manejo			
Manejo do Solo	Colmos	ATR	Fibras
	t/ha		
	cana planta safra 2013		
Convencional	93,8 a	11,3 a	11,2 a
PD com palha	92,6 a	11,2 a	11,4 a
PD sem palha	88,1 a	10,5 a	10,2 a
CV%	9,8	11,4	9,3
	Primeira soca - safra 2014		
Convencional	97,2 a	11,4 a	11,1 a
PD com palha	99,9 a	11,9 a	11,1, a
PD sem palha	84,4 b	10,0 b	9,0 b
CV%	8,5	9,2	8,2
	Segunda soca - safra 2015		
Convencional	72,0 a	8,9 a	8,1 a
PD com palha	65,7 a	8,2 a	7,7 a
PD sem palha	50,6 b	6,5 b	5,9 b
CV%	11,9	14,6	11,4
t/ha: tonelada hectare: ATR: Açúcar Total Recuperável. CV: Coeficiente de Variação. Mesma letra não difere a 5%			

Fonte: Carolino de Sa et.al (2022)

Em relação ao teor de Matéria Orgânica os teores não diferem (Figura 14)

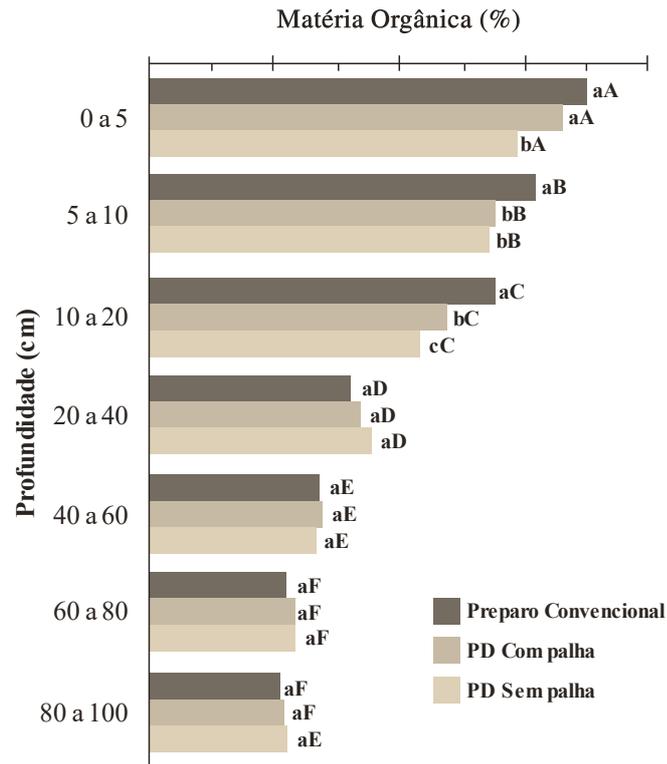


Figura 14 - A Matéria Orgânica não difere em relação as atividades de manejo em cana-de-açúcar em solo argiloso no Brasil Central. **Fonte:** Carolino de Sá et al. (2022).

4.15. PLANTIO REDUZIDO EM ÁREA DE EUCALIPTO

A Figura 15 indica implementos utilizados no preparo do solo em áreas de cultivo mínimo em cultura de eucalipto (Gonçalves J.L.G. et al., 2019).



Figura 15 - Equipamentos utilizados no sistema de preparo reduzido ou Plantio Direto em eucalipto. Item (A) subsolador florestal; item (B) cavadeira dupla; item (C) moto cavadeira; item (D) cavadeira Rotroe. **Fonte:** Gonçalves J.L.G. et al. (2019).

Em uma área de reforma de eucalipto e após a liberação proceder ao acerto quanto ao aspecto de erosões, estradas e carregadores. Aplicar o herbicida nas brotas de eucalipto, bem como proceder a abertura do sulco na entrelinha do eucalipto aplicando o fosfato reativo e a fórmula de NPK. Deve-se usar equipamento como o subsolador associado com disco cortante e adubadora para aplicação do fósforo associado aos micronutrientes, principalmente o boro. E dessa forma, proceder ao plantio.

4.16. PLANTIO DIRETO DE CITRUS EM ÁREA DE PASTAGEM DE BRACHIARIA

Neste tipo de PD há necessidade de acertar a área quanto às erosões antigas e limpá-la quanto às pedras, raízes, tocos etc. Aplicar o herbicida em área total, assim como o corretivo (use 50% da dosagem na faixa onde vai haver o plantio). Proceder a marcação da sulcação e sulcar aplicando o adubo no sulco de plantio. Durante o desenvolvimento da cultura, o corretivo seria aplicado em área total e não incorporado. Mantenha a entrelinha controlada com roçadeira ou com herbicida, assim como o plantio de uma cultura de cobertura.

4.17. SOLO EM POUSIO

Não seria interessante deixar o solo sem proteção após uma cultura anual, pois caso contrário poderá aparecer a incidência de pragas e doenças. Neste caso o mato seco seria a base para a cultura principal apesar desta situação favorecer a infestação com ervas daninhas de difícil controle, como capim amargoso e a buva, aumentando o banco de semente além do fato de serem hospedeiro para pragas (nematoides) e doenças.

Tem sido reportado no mundo inteiro resistência ao Glifosato principalmente nas culturas de soja, milho, algodão, sendo que no Brasil há constatação de pelo menos 40 plantas daninhas resistentes a este herbicida. Um dos caminhos adotados para este inconveniente seria os sistemas de manejo das culturas, assim como a rotação de herbicidas, preparo convencional do solo que vai auxiliar o controle de nematoides e ervas daninhas e a introdução do corretivo (calcário). Neste caso, não deixe a área em repouso, utilize culturas de cobertura.

Outro problema recorrente em solos arenosos são pragas de solo como os nematoides. A expansão da soja em áreas de solos arenosos, combinada à utilização de cultivares muito suscetíveis e à semeadura de espécies vegetais hospedeiras como o milho, soja, cana entre outras. Uma forma de combate a pragas como o *P. brachyurus* seria o uso da crotalária. Debiasi et al. (2016). Tais autores observaram que o cultivo de *C. spectabilis*, solteira ou consorciada ao milheto 'ADR 300', foi a melhor opção para reduzir a população e os danos causados por *P. brachyurus* à soja na entressafra.

4.18. CANTERIZAÇÃO NO PREPARO DE SOLO PARA CULTURAS PERENES

Atualmente tem sido desenvolvido preparo canteirizado na cana-de-açúcar ou em outras culturas perenes, com a finalidade de manter o tráfego de máquinas controlado na entre linha. No caso de cana-de-açúcar num espaçamento de 1,50 m, a área de tráfego seria a entre linhas.

A Figura 16 (Demattê, J.L.I., 2020) indica as máquinas e os implementos para canterização do solo numa terra argilosa, porém nada impede que tal fato seja em solo arenoso. A manutenção do tráfego nas entre linhas tem sido um dos objetivos principais para reduzir a compactação, problema sério que tem sido desenvolvido ao longo dos milênios nas lavouras.



Figura 16 - Canteirização, sistema de preparo do solo em faixas. (A) Equipamentos para tracionar. (B) Equipamento de subsolagem. (C) Equipamento de sulcação (D) Preparo em faixas. **Fonte:** Demattê (2020).

4.19. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA EM ROTAÇÃO

Tem sido relatado nos últimos artigos que culturas de cobertura, entre suas características, apresentam aumento expressivo do teor de matéria orgânica mineralizável. Tal fato não deixa de ser importante, porém o aumento da matéria orgânica (MO) mineralizável é difícil principalmente em solos arenosos devido principalmente ao pequeno número de agregados.

Nos experimentos observados tem sido verificado que o aumento da MO mineralizável, justamente devido ao PD e as culturas de cobertura, esta MO pode ser queimada no processo, liberando nutrientes para as culturas, significando que se não houver a continuação do processo, o teor de MO tenderá a decrescer (Demattê J.L.I, 2019).

A Embrapa, em 2005, e num sistema designado *Integração Lavoura e Pecuária (ILP)* numa Unidade de Referência Tecnológica e de Pesquisa (URTP) em Sete Lagoas, MG fez experimento onde verificou que o aumento de matéria orgânica mineralizável é tênue.

Neste experimento a propriedade foi dividida em quatro piquetes cada um de 5,5 ha onde a cada ano são rotacionadas as culturas para produção de grãos (soja e milho) ou silagem (milho e sorgo) consociadas com capim *U. brizanta* e *M. maximum cv* e Mombaça para pastejo (Gontijo N. et al., 2018).

Os resultados após 10 anos (Tabela 19) indicam que o teor de carbono orgânico do solo não se alterou nos primeiros 0-10 cm, sendo que no caso de pastagem com Mombaça o aumento foi de 0,05 dag/dm³, sendo que para os três piquetes não houve aumento, indicando com isso que o aumento aparente do CO biodegradável é efêmero pois ele é oxidado, se queima, liberando os nutrientes para o solo ou próxima cultura, sendo que este é uma das características da MO biodegradável. Com isso se justifica que se não houver a continuação de lavouras e culturas de cobertura o teor de MO tenderá a ser semelhante ao estado original do solo.

Tabela 16 - Incrementos de COS após 10 anos de área ILP com rotação de grãos e pastagens.

Área total 22 ha	Culturas e Pastagens		Carbono orgânico Dag/dm ³
	Outubro / Inverno / primavera	Primavera e verão	
P1 (5,5 ha)	Pastagem	Soja	2,83
P2 (5,5 ha)	Pastagem	Milho + Braquiária	2,84
P3 (5,5 ha)	Pastagem	Sorgo + Mombaça	2,81
P4 (5,5 ha)	Pastagem com Mombaça		2,88
Cerrado			2,83

COS: Carbono orgânico solo dag/dm³. ILP: Integração – Lavora – pecuária
Profundidade do solo 0 – 10 cm

Fonte: Gontijo Neto et al. (2018)

4.20. BENEFÍCIOS DE CULTURAS DE SAFRINHA

As vantagens do PD em grãos repousam na obtenção de boas palhadas para proteger e recuperar os solos, através da cobertura morta ou de culturas de cobertura. Tal cobertura pela palhada pode ser obtida pela cultura anterior, pela dessecação do mato ou pela exploração de culturas de cobertura ou mesmo pela *safrinha*. O termo *safrinha* se refere a uma segunda cultura (Ceccon, G et al., 2014).

A palhada deixada pela *safrinha* geralmente é de boa qualidade, podendo alcançar entre 5 e 7 t/ha de massa seca nas culturas de milho, sorgo ou milheto. Os benefícios da *safrinha* são vários como a quebra do ciclo de pragas e doenças através da rotação de culturas; na redução

do nível de infestação de plantas daninhas, através da alelopatia; na reciclagem de nutrientes que tem ficado no solo após a exportação da cultura através da mineralização da palhada; no retorno financeiro, o lucro da *safrinha* conduzida a baixos custos tem sido suficiente para atenuar os custos do plantio direto.

Há necessidade de cuidados em relação ao plantio da cultura principal que deve ser com variedade precoce para dar tempo para o plantio da segunda cultura (*safrinha*). Se a cultura principal foi bem conduzida e colhida no limpo, o máximo a fazer seria tratar apenas as laterais dos carregadores, que geralmente ficam mais sujas, com herbicida; se a área estiver suja é conveniente fazer o tratamento com herbicida em área total, para evitar nova produção de sementes das ervas daninhas e perenização de certas ervas.

Na maioria dos casos a segunda cultura não é adubada, porém é preciso analisar o estado nutricional do solo, caso contrário ele pode empobrecer.

4.21. ÉPOCA DE PLANTIO DO MILHETO COMO CULTURA DE COBERTURA E QUANTIDADE DE SEMENTES

Dependendo da época de plantio, o milho pode produzir de 20 a 70 t/ha de massa verde sem adubação, como se pode verificar na Tabela 20.

Tabela 17 - Produtividade do milho e época de plantio.

Época de Plantio	Matéria Verde (t/ha)
Setembro - Outubro	50 a 70
Fevereiro	35 a 55
Março	30 a 40
Abril	20 a 25

Fonte: Ceccon, G et al. (2014).

A quantidade de sementes do milho irá depender da finalidade que se quer utilizar e no caso de produção de sementes usa-se 8 a 12 kg/ha, com espaçamento de 40 cm. Se plantado para massa seca se gasta de 15 a 40 kg/ha dependendo da forma de plantio, se a lanço ou em linha. Na retirada da cultura de proteção use o rolo faca, herbicida, roçadeira etc.

4.22. MILHETO COMO FORRAGEIRA

As culturas de cobertura necessitam de uma série de cuidados na escolha adequada de uma variedade em relação a região de trabalho entre outras: que tenha alta capacidade de produção de massa, deve ser uniforme no desenvolvimento, além da resistência a seca, na reciclagem de nutrientes e no controle da erosão.

O milheto apresenta tais características, como cultura de cobertura, preparando o solo para o PD da cultura definitiva, sendo que ele normalmente não é adubado.

Ele é tido como boa forrageira, com um teor de proteínas na faixa de 7.5%, acima dos teores do sorgo e do milho. Tais características aliadas a facilidade com que pode ser conduzido, fazem desta cultura uma excelente opção como cultura de sucessão para a soja ou o milho no PD. Outra vantagem adicional é representada pela facilidade com que esta cultura pode ser controlada com herbicida. Sendo assim o milheto pode substituir tanto o sorgo como o milho na composição de rações para animais (Ceccon, G. et al., 2014).

4.23. O HERBICIDA E O PD E A MARCAÇÃO PARA A CULTURA PRINCIPAL

Após o corte da cultura principal e na palhada há necessidade de executar a marcação para aplicação do semeio. Normalmente se usa o GPS como um componente para auxiliar na marcação. Entretanto, na falta deste equipamento tem sido utilizado a espuma sendo necessário alguns cuidados ao ser usada. Marcar antes do mato crescer usando um implemento apropriado para marcar a área (riscando) no espaçamento em que o pulverizador vai passar. Proceder ao balizamento com bandeira (dia) ou lanterna (noite). Unir um trator adicional paralelo ao trator com pulverizador, unido por corda ou corrente, que tenham comprimento idêntico ao da barra de pulverização. Enquanto o trator principal vai pulverizando o trator adicional vai deixando um rastro visível no mato, fácil de ser seguido na passada seguinte. Colocar um funcionário andando na frente da barra de pulverização atirando punhados de cal sobre a vegetação marcando assim a passada seguinte.

CAPÍTULO 5:

5.1. INTEMPERISMO E ROCHAS

O termo “intemperismo” seria o decompositor e ao mesmo tempo de síntese de novos minerais, agindo tanto nas alterações dos minerais de rochas, designados como minerais primários tais como, olivinas, plagioclásio, e minerais secundários no caso de solos, estes como minerais de argila, numa estrutura de filossilicatos (Meurer, E.J 2007).

Na classificação de rochas se verifica três tipos: as ígneas, sedimentares e metamórficas.

Rochas ígneas: formadas a partir do magma fundido e incluem rochas como granito e basalto. Os minerais destas rochas podem ser claros, como quartzo, moscovita e feldspatos e aqueles de coloração mais escura como biotita, augita e hornblenda, que contêm ferro e magnésio e são intemperizados mais facilmente que os minerais de cores mais claras. Os grânulos destes minerais estão dispostos aleatoriamente na massa da rocha.

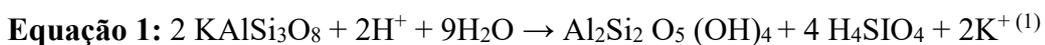
Rochas sedimentares (típicas de solos arenosos): se formam quando o produto de intemperismo de outras rochas mais antigas é liberado, desgastado, depositado pela água como sedimentos e podem ser reconsolidados em novas rochas. Casos como estes são abundantes na natureza como as areias de quartzo proveniente do granito e que podem vir a ser cimentados por ação do cálcio ou do ferro, originando arenitos ou então de sedimentos não consolidados sendo difícil constatar de onde veio. Da mesma maneira minerais mais argilosos nos sedimentos dando a origem aos folhelhos e siltitos. A resistência de uma rocha sedimentar contra o intemperismo irá depender dos minerais que a constituem assim como do tipo de cimento por ocasião da consolidação. Tais Rochas sedimentares dominam na faixa de 75% na Terra.

Rochas metamórficas: são formadas a partir de outras rochas, por processos denominados de metamorfismos. Tais processos, como do movimento das placas tectônicas, que ao se colidirem geram calor e pressão, fazendo com que os minerais de rochas podem ser modificados. O granito, rocha ígnea, pode ser modificada por ação da temperatura e pressão, dando origem ao gnaisse onde os minerais claros e escuros são reposicionados em bandas. As rochas sedimentares, como calcário e folhelho, podem sofrer a ação do metamorfismo transformando em mármore e ardósia respectivamente. A ardósia pode ser metamorfoseada novamente transformando em filito ou xisto, os quais normalmente apresentam micas que foi consolidada durante o metamorfismo.

5.2. INTEMPERISMO BIOGEOQUÍMICO

No processo de intemperismo eles agem juntos, tanto o físico, o químico e o biológico, e devido a isto o nome Biogeoquímico seria interessante. Em conjunto estes agentes transformam minerais contidos nas rochas em minerais de solos, bem como liberando íons e moléculas de interesse para as plantas. A atividade da vida dos solos, representados pelos organismos, apresentam um papel fundamental na vida do Planeta. Se não houvesse organismos vivos os processos de intemperismo seriam retardados em muitos anos, resultando em pouco ou nenhum solo.

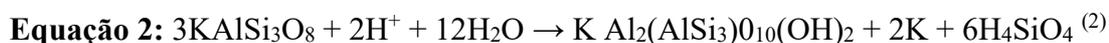
Tais alterações podem ser simplificadas num exemplo clássico onde um mineral de rocha (mineral primário), como o ortoclásio-K, pode ser alterado quimicamente para mineral secundário como uma caulinita, um filossilicato, num solo bem drenado. Os resíduos, desta reação o ácido silícico e íon potássio podem ser retirados do sistema por lixiviação ou ser absorvidos pela planta (equação 1).



Neste exemplo, o mineral primário de rocha é atacado pelo próton (H^+) proveniente de diversas fontes do meio, tais como, água das chuvas, ácidos orgânicos, que irá promover a dissolução deste mineral. O mineral de argila formado, no caso uma caulinita (mineral 1:1, correspondente há uma grade de tetraedros unidos por uma grade de octaedros) é controlado pela composição da solução do solo e a sua interação com o ambiente. Durante o intemperismo há remoção de íons e moléculas da massa do solo que dependendo das condições climáticas, o ácido silícico e o K^+ , produto das reações, podem ser lixiviados, sendo que o solo tende para um sistema de óxido. Neste caso o solo pode ser considerado como um sistema aberto, trocando continuamente material e energia.

O processo de lixiviação dos constituintes da reação, ácido silícico e íons, pode ser tratado numa situação envolvendo as condições climáticas menos agressiva como na região temperada ou de solos de drenagem reduzida. Numa região tropical úmida, em solos de drenagem mais lenta os íons dissolvidos e o ácido silícico fazem com que a Solução do Solo seja mais saturada, tendendo a não progredir na formação dos óxidos de alumínio e de ferro. Neste caso, o mesmo ortoclásio -K pode formar um mineral completamente diferente, no caso um filossilicato designado de ilita (mineral 2:1, um octaedro sanduichado por dois tetraedros),

e menos intemperizada que a caulinita. Portanto a formação de um mineral secundário, devido ao intemperismo, somente ocorre se os íons necessários estão presentes ou são introduzidos e os excedentes são removidos (equação 2).



Como visto um mesmo mineral de rocha, no caso um ortoclásio como nas reações 1 e 2, pode originar um solo muito intemperizado com minerais 1:1 ou um solo com minerais 2:1 menos intemperizado.

Neste aspecto as rochas e os solos são muito influenciados pelo clima com destaque para a quantidade de chuvas e temperatura assim como solos de drenagem boa a impedida.

Os minerais de argila formados estão na fração do solo muito pequena, menor de 0,002 mm assim como óxidos, hidróxidos e oxihidroxidos de ferro, alumínio e manganês. Nas frações maiores há dominância de minerais primários, onde há dominância do quartzo, resistente ao intemperismo químico. Na fração intermediária, seria uma mistura de quartzo e minerais de argila.

Nos solos o intemperismo age na formação da massa do solo, tais como a liberação de nutrientes essenciais para a planta como fósforo, cálcio, magnésio, potássio, sódio, como silício, mas também alumínio nocivo para a maioria das plantas assim como micronutrientes.

Como visto, o intemperismo é um processo físico-bioquímico que implica tanto na destruição como na síntese de minerais. Neste aspecto as rochas e minerais originais podem ser alterados tanto por desintegração física ou pelo aquecimento das rochas provocadas pela luz solar ou por incêndios, culminando com fragmentação constituída por material menores, porém com os mesmos minerais das rochas. Neste aspecto podem ser atacados por decomposição química e biológica, alterando assim os minerais, formando um novo mineral. Ao mesmo tempo neste ataque bioquímico, há liberação de matérias solúveis que servem de síntese para novos minerais. Neste processo os tamanhos das partículas continuam sendo cada vez menores.

A atividade e a vida dos solos, representados pelos organismos, apresentam um papel fundamental na vida do Planeta. Se não houvesse organismos vivos na Terra os processos de intemperismo seriam retardados em muitos anos, resultando em poucos ou nenhum solo. Como resultado destas ações, a espessura do material intemperizado é variável dependendo de

situações relacionadas ao relevo e ao clima. Nas regiões tropicais úmidas a espessura da camada intemperizada é variável de centímetros até 10 ou mais metros, numa situação dinâmica, sempre modificando. O intemperismo não cessa, continuando as alterações dos minerais contidos nas rochas e nos solos, sendo moldados em função dos ataques físico, químicos e biológicos.

5.3. PROCESSOS DE OXI-REDUÇÃO

No intemperismo há diversas reações que não foram mostradas nestes exemplos, porém oxidação e redução fazem parte de tais reações. Tais processos são importantes principalmente nos minerais que apresentam apreciáveis teores de ferro. Em ambiente de elevado teor de oxigênio, o ferro, de valência 2 no mineral é oxidado para ferro de valência 3, no processo de formação dos solos, alterando as cores originais da rocha para cores mais avermelhadas ou amareladas nos solos. A oxidação no mineral de Fe^{2+} para Fe^{3+} gera um desequilíbrio no mineral de rocha que continua o processo de intemperismo desintegrando. O ferro liberado assim como o manganês se precipita como óxidos no solo.

Reações de redução ocorrem quando o material está saturado com água, sendo que o suprimento de oxigênio é baixo. Nestes tipos de ambiente e com a presença de matéria orgânicas complexantes redutores, criam condições inadequadas para o sistema de manejo assim como na redução de diversos compostos como NO^{3-} , Mn^{4+} Fe^{3+} e outros.

Devido a ação continuada aos avanços da tecnologia e conhecimento na área agrícola, através da aplicação de adubos, corretivos, moléculas de herbicidas, fungicidas, inseticidas, assim como de toda espécie de material descartável, tendem a agir nos minerais dos solos, intemperizando-os. Estes “entulhos” atuam nos processos de intemperização, principalmente o bioquímico, e podem ser avaliadas das possíveis alterações destas substâncias para a seleção de locais adequados para sua deposição. Caso contrário a poluição se instala na massa do solo fazendo com que minerais, íons, muitas vezes cancerígenos, atingem o lençol freático e posteriormente se estendendo aos tributários dos rios e oceanos.

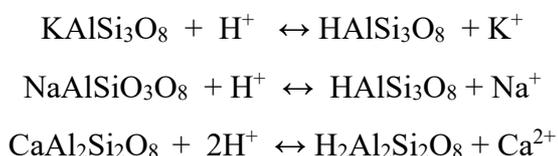
Os demais sistemas de intemperismo químico podem ser vistos nas referências de Lindsey (1979).

5.4. AÇÃO DA ÁGUA NA DESTRUÇÃO DOS MINERAIS E A LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES

A água penetra nos poros e clivagem das rochas e nos solos, dissolvendo os constituintes mais solúveis, sendo que o resíduo pode ser recristalizado em novos minerais ou lixiviados. Nesta reação envolve o próton (H^+) e a oxidrila (OH^-) provenientes da dissociação da água e um mineral. Tal decomposição da água produz o rompimento das ligações no mineral, principalmente do oxigênio, entre os íons de alumínio, e os demais de ferro, cálcio, magnésio e o silício dos silicatos. O resultado deste ataque seria a substituição dos íons liberados pelo próton com a consequência do colapso e desintegração da estrutura original do mineral de rocha ou do solo.

Os cátions K^+ , Na^+ e Ca^{2+} que estavam na estrutura dos minerais e posteriormente foram para a solução do solo, tendem a aumentar o pH do solo. Por outro lado, em condições de lixiviação intensa, o pH tende a ficar ácido onde haverá a liberação do Al proveniente da estrutura dos octaedros do solo. Seria está a principal reação de decomposição de silicato liberando íons para o solo.

Exemplos:



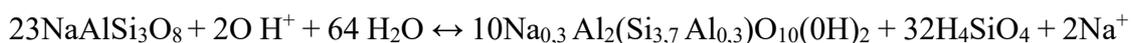
5.5. PROCESSOS DE FORMAÇÃO DOS MINERAIS DE SOLOS (2:1, 1:1, ÓXIDOS)

Dependendo de um único tipo de mineral de rocha, (equações 1 e 2) pode formar diferentes minerais de solo dependendo do clima e a drenagem dos solos, tais como caulinita, illita, montmorilonita etc. Em relação a estes conceitos Eswaran H & Bin, W.C (1978) trabalhando com oxissol no Hawaii originado de um feldspato, observaram que à medida que aumentava a precipitação, de 500 a 3.800 mm, os minerais de argila passavam de montmorilonita para caulinita e estes para óxidos de gibbsita, goethita e hematita.

De acordo com a intensidade do fluxo de água através do solo a ação do intemperismo pode ser classificada em três níveis (Melfi A.F. *et al.* 1979) a saber:

- Nível 1: **bissialitização**. Fluxo de água pouco intenso (clima temperado e semiárido ou árido), lixiviação fraca, desilicatação limitada. A quantidade de ácido silícico é razoável e a formação de minerais 2:1 ou 2:2 assim como os interestratificados são formados.

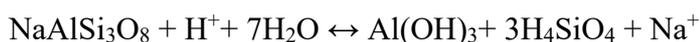
Exemplo: a intemperização do feldspato albita e a formação de uma esmectita (beidelita).



- Nível 2: **monossialitização**. Fluxo de água moderado, lixiviação mais acentuada e a dessilicatação moderada, permitindo a formação de caulinita. O processo é ilustrado pela albita formando caulinita.



- Nível 3: **alitização**. Fluxo de água muito intenso, lixiviação muito forte, dessilicatação intensa, ficando somente o Al. Processo de alteração de uma albita em gibbsite.



Os minerais essenciais e acessórios nas rochas através da decomposição do intemperismo, tendem a fornecer nutrientes aos solos. Tais nutrientes dependem da situação da formação dos solos sendo que estão sujeitos a uma série de reações, como lixiviação, absorção pelas plantas, adsorção pelos minerais dos solos, formação de novos minerais secundários e erosão (Melo, V. de F. *et. al* 2009.). A Tabela 21 ilustra os minerais primários e acessórios assim como os nutrientes liberados.

Tabela 18 - Minerais primários essenciais e acessórios fontes de nutrientes para as plantas.

Minerais primários essenciais	Nutrientes no mineral	Minerais primários acessórios	Nutrientes no mineral
Ortoclasio/microclínio	K	Granada	Ca, Mg, Mn
Plagioclásio	Ca, Cu, Mn	Turmalina	Ca, Mg, B
Olivina	Mg, Fe, Cu, Mn, Mo, Zn	Apatite	Ca, Mg, P, Fe
piroxênio	Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn	Esfeno	Ca
Anfibolio	Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn	Epidoto	Ca, Fe
Biotita	K, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn	Magnetite	Fe, Zn, Mn, Cu
Muscovita	K	Borax	B
Talco	Mg	Espinélio	Mg, Fe, Zn, Mn
Calcita	Ca	Fluorita	Ca
Dolomita	Ca, Mg	Pirita	Fe, S
Gipsita (gesso)	Ca, S		

Fonte: Melo, V. de F. et. Al. (2009).

Na Tabela 22 apresenta os minerais primários de rocha e de solos assim como os principais elementos liberados no processo de intemperismo de importância para a planta e na formação de novos minerais.

Tabela 19 - Minerais e elementos liberados e minerais secundários.

Mineral Primário e secundário	Elementos liberados	Mineral secundário
Olivinas	Si, Al, Fe ²⁺ , Mg ²⁺	Serpetina, esmectita, caulinita
Piroxênios, anfibólios	Si, Al, Mg ²⁺ , Fe ²⁺	Clorita, esmectita, calcita, talco, goethita
Feldspatos	Si, Al, Ca, Mg, K	Micas, esmectita, caulinita, gibbsita, haloisita
Micas	Si, Al, Mg, Fe ²⁺ , K	Illita, Mica-Vermiculita, caulinita, gibbsita, Vermiculita, esmectita, mica-caulinita, hematita
Clorita	Si, Al, Mg, Fe ²⁺	Vermiculita, esmectita, mica-caulinita, hematita, Clorita-esmectita
Esmectitas	Mg e Fe ²⁺	Esmectita, caulinita-esmectita, caulinita, goethita
Vermiculita	Si, Al, Mg	Vermiculita com hidróxi entre camadas

Fonte: Melo, V. de F. et. al, (2009).

À medida que os solos evoluem sua composição mineral começa a depender mais do ambiente do que a composição de seu material de origem, principalmente nos trópicos úmidos. Devido a este fato a composição dos minerais na fração argila é considerada indicadores do grau de desenvolvimento do solo. Baseado nestas premissas, inicialmente Jackson M et al. (1948) e posteriormente em 1968 (Jackson M), propuseram uma sequência de estabilidade dos

minerais na fração argila dos solos, constituída de 13 estádios, em ordem crescente de estabilidade, que corresponde a índices de intemperismo.

Nesta situação os primeiros índices de intemperismo até o quinto os teores são de minerais primários, do 6 ao 9 de minerais secundários 2:1 do 10 aos 13 estágios avançados de intemperismo, com a caulinita e halloysita no estágio 10 e nos estádios 11 e 12, gibbsita e óxidos de ferro e finalmente no estágio 13 os óxidos de titânio, zirconita e coríndon.

5.6. REAÇÕES DA SUPERFÍCIE DOS MINERAIS

Neste capítulo serão analisadas apenas as reações da superfície dos minerais de argila em relação aos óxidos de alumínio, de ferro, de manganês e de silício tanto para solos argilosos como para solos arenosos (Lindsay 1979).

5.7. QUÍMICA DO ALUMÍNIO E A IMPORTÂNCIA DO CALCÁRIO

Durante o intemperismo o Al é liberado de minerais primário e precipitado no solo, formando minerais secundários, como óxidos de alumínio como gibbsita e material amorfo. Ao mesmo tempo há liberação deste elemento (alumínio) do mineral, colocando-o na forma trocável e na solução no solo. O pH rege as reações do alumínio indicando que acima de pH 5,7 ele se precipita e não teria seu efeito tóxico para as plantas e abaixo deste valor, ele estaria na solução do solo, sendo tóxico para a maioria dos vegetais sendo inclusive poluente.

Para um mesmo pH, as atividades do Al^{3+} em solução irá depender da mineralogia do solo numa sequência decrescente a seguir:

Material amorfo $Al(OH)_3$ > gibbsita > caulinita (1:1) > vermiculita, micas, etc (2:1)

As equações indicam as condições de equilíbrio entre o Al^{3+} em solução e os minerais da fase sólida (Lindsay, 1979,):

Al(OH) ₃ amorfo:	$\log Al^{3+} = 9,66 - 3pH$	com $\log K^{\circ}$ de 9,66
Gibbsita:	$\log Al^{3+} = 8,04 - 3pH$	com $\log K^{\circ}$ de 8,04
Caulinita:	$\log Al^{3+} = 2,73 - \log H_4SiO_4^{\circ} - 3pH$	com $\log K^{\circ}$ de 5,45
Minerais 2:1		com $\log K^{\circ}$ de 2,68

Quando se considera o Al(OH)₃, amorfo ou gibbsita, somente o pH afeta a atividade do Al³⁺ em solução. No caso da caulinita, além do pH, o H₄SiO₄^o afeta a quantidade de Al³⁺ em solução, assim como minerais 2:1 como a montmorilonita que além do silício os íons de Fe e Mg.

As atividades do Al³⁺ em solução serão tanto maiores quanto mais avançados o estágio de intemperismo. Em outras palavras, os problemas da toxidez Al³⁺ ocorrem em solos ácidos, devido o decréscimo do pH do solo, com argilas de baixa atividade, e bem menores nos solos de mineralogia 2:1.

Os efeitos do íon alumínio em concentração tóxica se manifestam principalmente no sistema radicular das plantas, onde a quantidade de raízes é reduzida, engrossada, reduzindo a absorção de nutrientes e de água, com reflexos diretos na redução da produtividade.

Sobre este aspecto a Tabela 23 indica que o sistema radicular de duas variedades de sorgo apresenta diferenças na quantidade de raízes à medida que aumenta o teor de alumínio em percentagem. A variedade de sorgo TEY 101 é mais resistente ao alumínio.

Ao mesmo tempo variedades de trigo Siete Cerros são menos tolerantes a elevados teores de alumínio do que variedades brasileiras como a BH 1146 desenvolvidos em solos com elevado teor de alumínio e baixo pH (Sanches, P. 1985).

Os mecanismos que explicam a tolerância das plantas ao alumínio são vários, não sendo um único para explicar a ocorrência, porém há uma revisão a respeito do assunto em Rossiello, R.O.P *et al.* (2018), inclusive o teor de fósforo (ânion específico) que bloqueia o alumínio nas raízes das plantas, são sistemas que se utilizam tal procedimento para a redução do Al.

Há trabalhos indicando que a acidez de Al em percentagem, *índice m*, na solução do solo, é reduzido a pH próximo a 5,7 (Raij B.van, 2011).

Tabela 20 - Comprimento de raízes, variedade de sorgo e teores de saturação de alumínio em %.

	Variedade sorgo	Saturação de alumínio, %				
		10	12	33	42	78
Comprimento sistema radicular em cm/3	TEY101	202	170	75	60	45
Comprimento radicular cm/3 de solo	RS610	105	80	45	45	15

Fonte: de Souza et al. (2007) Sanches, P. (1985).

5.8. QUÍMICA DO FERRO E AÇÃO DO CALCÁRIO

Independente da textura do solo, o ferro do solo é proveniente da decomposição de minerais primários, onde ele estaria na forma reduzida (Fe^{2+}), e através do intemperismo se transforma no Fe^{3+} , sendo precipitado na forma de minerais de óxidos, hidróxidos e oxihidroxidos. Na Tabela 24 verifique que o pH em H_2O , da mesma maneira que o Al, governa as formas de ferro no mineral assim como o trocável e em solução do solo. À medida que aumenta o pH do solo tende a reduzir as formas de ferro como íons poluentes.

Verifica-se que o pH afeta a atividade do Fe^{3+} em solução e serão, de modo geral, tanto maiores quanto mais avançados o estágio de intemperismo, devido o decréscimo do pH (devido ao aumento da acidificação), com argilas de baixa atividade, sendo, portanto, poluente. Em outras palavras, o calcário tende a reduzir as formas de ferro na solução do solo.

Em solução aquosa, na solução do solo, o Fe^{3+} encontra-se em coordenação 6, circundado por seis moléculas de água formando o íon $Fe(H_2O)_6^{3+}$. Com o aumento do pH, há remoção de H^+ das moléculas de H_2O dando origem aos vários produtos de hidrólise, como $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_3^0$, $Fe(OH)_4^-$ e $Fe_2(OH)_2^{4+}$. Nas reações liberando Fe^{3+} seria semelhante ao Alumínio.

Portanto, o pH governa a ação do Fe^{3+} no solo (Tabela 24). As equações indicam as condições de equilíbrio entre o Fe^{3+} , em solução, e os minerais da fase sólida (Lindsay, 1979).

Tabela 21 - Reações de dissolução dos óxidos de Fe³⁺.

Mineral	Reação de equilíbrio	Log K ₀
Fe amorfo	$\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	3,54
Fe-solo	$\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	2,70
Maghemita	$1/2\text{FeO}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1,59
Lepidrococita	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	1,39
Hematita	$1/2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3/2\text{H}_2\text{O}$	0,09
Goethita	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,02

Fonte: Lindsay (2001).

5.9. QUÍMICA DO MANGANÊS DE pH DEPENDENTE

O manganês está na parte sólida do solo assim como íon trocável na solução podendo ser absorvido pelas plantas. Da mesma maneira que o alumínio e o ferro dependendo do teor trocável, o solo através do intemperismo pode dissolver e fornecer Mn na forma solúvel. Por outro lado, o Mn é um micronutriente podendo ser fixado pelo solo na forma iônica. Entretanto, pode ser poluente em quantidades acima da indicada.

O Mn tem comportamento semelhante ao alumínio e o ferro, entretanto a química deste mineral é mais complexa porque envolve três estados de oxidação, Mn^{II}, Mn^{III} e Mn^{IV}. A mobilidade do Mn e sua disponibilidade para as plantas dependem da solubilidade dos compostos de Mn (minerais) nos solos e sedimentos, que por sua vez depende do pH, do potencial de oxirredução e complexação. Lindsay, 1979

5.10. SISTEMA DE MANEJO

A solubilidade do Mn aumenta em pH baixo, sendo o uso de pH acima de 6,0 seria indicado, através da utilização de calcário, carbonatos e sulfatos de baixa solubilidade (Lindsay, 1979). O uso de material orgânico, produzem elétrons, que tendem a formar minerais mais estáveis de Mn e com isso reduzir a poluição.

5.11. QUÍMICA DA SÍLICA EM SOLOS

Silício é o segundo mais abundante elemento da crosta terrestre e os solos apresentam 32% silício por peso. Este elemento está presente em minerais primários, nos alumínio silicatos e várias formas de SiO₂. Cátions como Fe²⁺, Fe³⁺, Al³⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ são incluindo

em silicatos e devido a esta razão é importante em entender o equilíbrio químico em várias espécies de silicatos.

Nos alumínio silicatos o Si está na forma de tetraedros circundado por quatro oxigênio. Quartzo é considerado o mais estável mineral SiO_2 em condições normais de temperatura e pressão. As relações de solubilidade nas diversas formas de sílica em termos de H_4SiO_4 variam de $10^{-2,74}$ (na forma de Si amorfo) a 10^{-4} (na forma de quartzo) assim como os demais minerais de Si estão nas formas intermediárias (Tabela 25).

Durante o intemperismo o ácido silícico é solúvel e se perde por lixiviação em solos bem drenados formando minerais 1:1 e óxidos. Em solos de drenagem restrita o silício não se perde na sua totalidade, permanece formando minerais 2:1.

Tabela 22 - Reações de equilíbrio de várias espécies de silicatos.

Reações de equilíbrio	Log K_0
SiO_2 (Amorfo) + $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	-2,74
SiO_2 (Solo) + $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	-3,10
SiO_2 (Tridimita) + $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	-3,76
SiO_2 (Cristobalita) + $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	-3,94
SiO_2 (Quartzo) + $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	-4,0

Fonte: Lindsay, 1979.

CAPÍTULO 6:

6.1. FORMAÇÃO DE SOLOS ARENOSOS E O PROCESSO DE INTEMPERISMO

Solos arenosos são influenciadas pelas ações do intemperismo gerando solos profundos, sem diferenciação de textura (exceto os argissolos e podzolizados), de pH dependente e elevado teor de alumínio em profundidade, sendo dependentes da ocorrência em função do clima. A composição da fração argila é variável, mas constituída principalmente de caulinita, halloysita e os óxidos de ferro e de alumínio, amorfos ou cristalinos. Nas frações mais grosseiras, silte e areia, há predominância de minerais primários principalmente o quartzo, um tectossilicato (Lindsay 1979).

Os materiais de origem podem ser classificados como sendo formados *in situ*, como um manto residual intemperizado da rocha originária ou podem ser transportados de um local e depositados em outro lugar por diversos processos, principalmente pela água ou vento. Tal material pode conter argilo-minerais formados em ciclos anteriores.

Normalmente o material (designados por Formações Geológicas) estão sobre uma rocha eruptivas ou metamórficas ou sobre uma mesma rocha sedimentar, de diversas origens, de acordo com a geologia da região, ou nenhuma rocha, simplesmente depositado como um manto arenoso.

Na fração areia domina o quartzo e os solos são de perfis profundos, bem drenados, elevados teores de alumínio e de pH dependente e de baixa fertilidade.

Em clima semiárido pode haver composição de materiais decompostos de outros minerais primários e com isso dando uma conotação na massa de solo mais fértil.

Nas associações de rochas eruptivas e metamórficas as frações do solo são constituídas de fragmentos de rochas de diferentes origens, podendo afetar em termos de fertilidade com minerais menos intemperizados.

Em relação aos solos originados das aluviões devido aos cursos de água podem gerar diversos materiais de origem que apresentam diversas texturas, não somente as arenosas. A espessura deste manto é variável assim como os detritos depositados. O material arenoso pode ser depositado sobre um material mais argiloso e de constituição totalmente diferente da camada

superficial, tendo inclusive diferentes graus de intemperismo e em consequência de diferentes fertilidades como nas aluviões da Amazônia (Teixeira, W.G.et al 2019);

Tais solos são férteis muito desejados pelos agricultores devido a topografia mais plana, riqueza de água e de solos.

Tem sido comum a formação de “linhas de pedras” ou de cascalhos de dimensões tênues a diversos centímetros ou até metros de espessura em posição aleatória no perfil, ficando extremamente difícil verificar de onde tal material veio, tanto acima como abaixo da linha de pedras.

As plantas retiram nutrientes dos solos usando no seu metabolismo e posteriormente, com a queda das folhas, galhos, troncos etc., estes íons são mineralizados pelos microrganismos. O processo de absorção de nutrientes continua e em consequência os solos vão se tornando mais ácidos e com alumínio em profundidade, tornando-os empobrecidos e inférteis.

Na obtenção de terras para agricultura há remoção da vegetação natural inclusive da serrapilheira com todas as consequências benéficas como a decomposição da MO, destruição de compostos tóxicos, transformações inorgânicas, fixação de nitrogênio etc. A principal consequência desta alteração seria proliferação de pragas e parasitas das plantas, como tem ocorrido. Os papéis dos animais são importantes como o tatu, tamanduá, formigas, cupim perfurando o solo facilitando o movimento das águas das chuvas e do ar para camadas mais profundas.

Em relação ao relevo (diferença de nível ou de altitude, inclinação e posição na paisagem), podendo apressar ou retardar o trabalho das forças climáticas, principalmente em relação a profundidade de solos que gira em função de regiões mais planas onde a *erosão* < *intemperismo*.

Em regiões acidentadas, mais altas, ricos em sais, através das chuvas, tais sais por erosão ou fluxo subterrâneo, atingem áreas mais planas depositando nos solos, tanto na superfície como subsuperfície tornando-os mais férteis.

Em Mato Grosso (Tabela 26) tem sido frequente em situação de relevo suavemente ondulado, os sedimentos arenosos apresentam diferenciação de fertilidade. Na parte alta (normalmente de perfis latossólicos) tais sedimentos são mais férteis e à medida que se dirigem para a encosta e através do fluxo de subsuperfície, a água tende a destruir parcialmente os

minerais de argila assim como os óxidos tornando os solos mais claros e arenosos (perfis de Areia Quartzosa) assim como os íons do complexo de troca contribuindo para solos menos férteis. À medida que se dirige para os tributários, as águas mansas dos riachos contenham ferro dissolvidos dos solos.

Tabela 23 - Resultados de solos arenosos em cana de segundo corte em Mato Grosso do Sul.

Localização	Profundidade cm	pH	CTC cmo/dm ³	v	m	Teor argila
					%	
Parte alta	0 – 20	5,6	3,7	59	0	23
	20 – 50	5,3	2,6	48	20	18
	50 – 100	4,9	1,9	25	50	13
Meia encosta	0 – 20	5,3	3,8	55	5	24
	20 – 50	5,3	2,3	40	28	14
	50 – 100	4,7	8	28	55	13
Final encosta	0 – 20	5,1	2,6	43	29	13
	20 – 50	4,6	1,9	26	46	10
	50 – 100	4,2	1,3	17	58	7

Fonte: Usina Santa Helena, MS 1996.

Outro procedimento em relação aos solos arenosos e o relevo principalmente em regiões do Estado de São Paulo seria a formação de argissolos de fertilidade completamente diferenciada. Assim é que a Formação Marília, constituída de arenitos com cimentos calcários, tendem a formar argissolos de acordo com o relevo. Nas partes mais elevadas, em situações mais planas a suavemente onduladas, se desenvolvem solos arenosos de perfis profundos sem diferenciação no teor de argila, menos férteis. À medida que se dirigem para as encostas há diferenciação de argilas, mais arenosas na superfície, variação de 5 a 8% e mais argilosa na subsuperfície variação de 14 a 22%, porém mais férteis, são os argissolos, tendendo para o arenito.

Em relação ao tempo de formação dos solos se inicia quando a rocha é exposta, através de uma série de eventos, como a água dos rios que escavam e formam uma nova paisagem, as inundações dos rios depositam novos materiais sobre os remanescentes, ou quando uma escavadeira remove as terras de um determinado lugar e colocando-a em outro, nivelando o terreno para futuras construções.

De maneira geral solos arenosos são conhecidos como deposições arenosas, consolidados ou não e neste caso de difícil diagnóstico em relação à origem.

6.2. TAXA DE INTEMPERISMO

A relação molar de $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ou índice Ki indica os dados da mineralogia de solos (Embrapa, 1999) sendo valores de 1,8 a 2,0 apresentando a caulinita como mineral predominante, teores mais elevados indicando presença de minerais 2:1 e valores menores que 1,0 apresentando dominância de óxidos.

A Tabela 27 indica as variações na Amazônia dos solos arenosos (Rodrigues, T.E; Oliveira, R, C 1995), contendo Areias Quartzozas inclusive Podzóis hidromórficos. Note que os minerais da fração argila, (índice Ki) como caulinita podendo ter minerais de grade 2:1, indicando com isso as deposições frequentes nas inundações assim como os remanejamentos de minerais menos intemperizados devido ao tempo. Na fração areia há dominância do quartzo e podendo ocorrer concreções ferruginosas (Embrapa, 1999).

Tabela 24 - Solos arenosos na Amazônia e valores de teor de argila e índice Ki.

Solo	Horizonte	Argila	Índice Ki ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)	Mineralogia	Fe ₂ O ₃ (dag/kg)
Areias Quartzozas	A	12	1,85	Caul + óxidos	1,49
Hidromórficas	C	9	1,65	Caul + óxidos	1,49
Areia Quartzosa	A	8	2,2	Caul + 2:1	1,1
	C	8	1,95	Caul	1,8
Podzol	A	13	3,1	Minerais 2:1	
Hidromórfico	E	3	1,4	Caul + óxidos	
	Bhs		3,6	Minerais 2:1	
Podzol Hidromórfico	A	12	1,6	Caul + óxidos	1,4
	E	7	0,7	Óxidos	1
	Bhs	11	0,7	Óxidos	0,7

Modificado caul: caulinita

Fonte: Rodrigues (1995).

6.3. PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE SOLOS

Durante a formação dos solos, (Buol, S.W.et al. 1980) o perfil passa por uma série de mudanças designados de “Processos de Formação dos Solos”, a saber: adição, transformação, translocação e perdas (remoção). As adições compreendem o que vai ser adicionado no perfil, como o caso da MO e raízes mortas; as Transformações ocorrem quando minerais são modificados pelo intemperismo; as translocações compreendem o que vai ser transportado de uma camada superior para a inferior ou vice-versa, sendo que a água seria o principal veículo

nestes processos. Neste caso seriam parte dos minerais de argila da camada superior sendo transportados para camadas inferiores do solo. Em relação as perdas ou remoções, seriam as lixiviações profundas que podem atingir o lençol freático ou processos de erosão.

No caso dos solos arenosos, a lixiviação, designada de Perdas, atua com maior intensidade, assim como em clima mais seco a adição e o transporte para a superfície têm suplantado as perdas.

6.4. PERFIL DO SOLO

Devido ao enfoque neste livro em relação aos solos arenosos seria interessante que os usuários consultassem a Embrapa (2018).

Durante os milênios a superfície da Terra tem passado por uma série de transformações fazendo com que um conjunto de eventos formassem as camadas ou horizontes em cada segmento da paisagem, no qual se chama “solos”. Quando esta sequencie exposta é chamada de perfil do solo. Os horizontes ou camadas são designados de O, A, E, B, C e R. Os horizontes serão comentados somente os principais assim como as formações especiais.

- Horizonte A: Formado na superfície de um solo mineral rico em matéria orgânica parcialmente decomposta, dando uma cor mais escura.

- Horizonte E: Corresponde a uma camada de solo de lixiviação intensa de íons e destruição parcial ou total de argila e óxidos de ferro e alumínio, designado de camada de eluviação (do latim *lavare*). Não faz parte de uma Areia Quartzosa, mas sim de um Podzol inclusive hidromórfico.

- Horizonte B: Se desenvolve abaixo dos horizontes subjacentes, podendo ser constituído por diversas matérias na massa do solo. Como designação há formação de material fino vindo dos horizontes acima, que podem ser depositados nas camadas da massa do solo designado de material *iluvado* (do latim *il significado dentro*) como Bt, característico dos argissolos com textura franco arenosa ou mais fina (mais de 15% de argila). Tal horizonte pode não ocorrer, e neste caso seria designado de horizonte Bw, como nos latossolos, cujas características perfazem um avançado intemperismo, apresenta na fração argila minerais caulinita, sesquióxidos de Fe e Al e minerais primários resistentes ao intemperismo na fração areia, como o quartzo.

- Horizonte C: Corresponde a material não consolidado, sem estrutura ou podendo ser semelhante a rocha que deu origem ao solo. Tal material não consolidado é permeável a água e ao ar, onde pode ter desenvolvimento radicular. Pode ser de grande espessura, acima de 10 a 15 metros como nas Areias Quartzozas e nos latossolos. Suas camadas com o tempo podem ser desenvolvidas para um incipiente Bw, fazendo parte do solum.

Designações especiais, as formações especiais tais como fragipã, duripã, plintita e petroplintita e outras, sem posição definida no perfil, de textura de areia a argilosa, normalmente de baixo teor de MO, com densidades elevadas.

O Duripã é semelhante ao Fragipã, porém cimentado por sílica, mas pode ter óxidos de Fe na forma de mosqueados, porém não são quebradiços mesmo quando úmidos. Podem estar abaixo ou entremeados com horizonte Bt, Bw e C, impedindo o desenvolvimento radicular, água e ar. Plintita (*plintita ou Litoplintita*) incluindo parte ou a totalidade do C. A Litoplintita são camadas de plintita endurecida por ferro e alumínio.

A relação Ki destes componentes é inferior 2,2 podendo ser maior devido a presença de minerais argila 2:1.

6.5. NÍVEIS CATEGÓRICOS DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO BRASILEIRA DE SOLOS

Há seis níveis previstos neste sistema, a saber: ordem, subordem, grande grupo, subgrupo, família e série. Em cada nível a generalização dos atributos seria de maior, no caso de ordem, para menor, no caso de série, mais homogênea em relação aos atributos dos solos. Neste nível deverá ter por base características diretamente relacionadas com o crescimento das plantas, no relacionamento do solo-água-planta.

Um exemplo clássico seria no caso do Nível 1, Ordem de Solos, no caso dos Neossolos, seriam os solos designados de NEOSSOLOS REGOLÍTICOS, NEOSSOLOS LITÓLICOS, NEOSSOLOS FLÚVICOS E NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS (Areias Quartzozas). Em consequência, quando se refere a solos arenosos eles são distintos nos mais diversos aspectos, cabendo aos especialistas proceder às semelhanças ou diferenças entre eles. Entre estas questões estão diferenças na mineralogia, capacidade de troca catiônica e granulometria da fração areia.

6.6. SEPARADOS E A TEXTURA DOS SOLOS ARENOSOS

Os separados dos solos, areia, silte e argila, estão resumidos na Tabela 28, ligeiramente modificada em relação à fração argila, porém é intenção deste trabalho o de manter a classificação feita pela Embrapa (2018).

Tabela 25 - Separados de solos em milímetros.

Fragmentos grosseiros		Frações areia					Silte	Argila		
Calhaus	Cascalhos	Muito grossa	Grossa	Média	Fina	Muito fina		Argila	Argila grossa	Argila fina
250 a 75	75 a 2	2 a 1	1 a 0,5	0,5 a 0,25	0,55 a 0,1	0,1 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002	0,002 a 0,0002	<0,0002

Fonte: Embrapa, 1999.

Partículas maiores do que 2,0 mm, tais como cascalhos, seixos, matacões e outros, seria os fragmentos grosseiros, de constituição mineralógica muito variável desde fragmentos de rochas contendo minerais primários de diversos tipos até de quartzo ou elementos ferruginosos. Os fragmentos de 2 a 75 mm são denominados de *cascalhos ou seixos*, de 75 a 250 mm denominados de *calhaus* e maiores do que 250 mm denominados *matacões*. A classe textural, neste caso, pode ser denominada seguida por um termo *cascalhenta*. A fração mineralógica destes cascalhos pode ser de minerais alteráveis ricos em íons que serão absorvidos pelas plantas ou então de concreções ferruginosas de difícil diagnósticos a olho nu.

Neste sistema os separados do solo, menor que 2,0 mm, são classificados em frações (Brady e Weil, 2013) como a areia de 2,0 a 0,05 mm, que podem ser divididas em sub frações de areia muito grossa (2,0 a 1,0 mm), areia grossa (1,0 a 0,5 mm), areia média (0,5 a 0,25 mm), areia fina (0,25 a 0,10 mm) areia muito fina (0,10 a 0,05 mm). Tais frações são visíveis a olho nu, A natureza mineralógica destes constituintes não é muito variável, dominada pelo quartzo (SiO₂), porém pode ocorrer minerais primários pouco alteráveis, além de compostos ferruginosos. Portanto a dominância do quartzo faz com que este componente é de pouca influência na fertilidade do solo, porém há casos que apresentam influência na compactação e no sistema relacionados a dinâmica da água.

Como as partículas de areia são grandes em relação as demais, não retendo água contra a gravidade, e, portanto, drenam, fazendo com que os espaços porosos podem ser ocupados pelo ar. Devido à natureza do quartzo, quando secos, podem desenvolver atividade de

cimentação, fazendo com que é comum a presença de crostas superficiais de consistência dura, A sua superfície específica é baixa, inferior a 5.000 m²/g podendo chegar a zero.

Fração silte: as partículas estão na faixa de 0,05 a 0,002 mm de diâmetro, podendo ser de natureza como o quartzo, tem pouca ação em relação a fertilidade dos solos. Entretanto devido a seu tamanho menor que areia, pode ter pequena ação na retenção de umidade devido a superfície específica maior, na faixa de zero a 30.000 mm²/g. Nos solos tropicais de boa drenagem a fração silte é pequena, normalmente inferior a 10% ou 30% e nos laboratórios de análises de solos ela é deduzida das frações areia e argila.

Fração argila, faixa menor que 0,002 mm, de elevada superfície específica superior a 100.000 mm²/g, constituída principalmente de filossilicatos intemperizados o que lhe dá uma margem muito grande para reter umidade assim como ter todas as situações relacionadas a fertilidade e demais características dos solos. Tal fração pode ser subdividida em argila grossa (0,002 a 0,0002 mm) e argila fina, de diâmetro menor que 0,0002 mm.

Cada tipo de mineral de argila e dependendo da quantidade, imprime nos solos as características típicas de fertilidade, expansão e contração, plasticidade, densidade, retenção de água etc.

A Tabela 29, relaciona as características influências do solo em função dos separados.

Tabela 26 - Influência das frações do solo em função das principais características.

Características / comportamento do solo	Areia	Silte	Argila
Capacidade de retenção umidade	Ausente - baixa	Baixa - alta	Alta
Aeração	Alta	Média	Baixa
Taxa de drenagem	Alta	Média	Lenta
Teor de matéria orgânica	Baixa	Baixa - média	Alta
Aquecimento (calor específico)	Alto	Média	Baixo
Suscetibilidade a compactação	Baixo	Baixo – médio	Alto
Erosão hídrica	Alto	Alta	Baixo
Expansão e contração	Muito baixo	Baixo	Médio – alto
Cultivo logo após chuvas	Alto	Baixo – moderado	Restrito
Lixiviação de poluentes	Alto	Baixo – moderado	Baixo
Armazenamento de nutrientes	Ausente – baixo	Baixo – médio	Alta
Resistência a mudança de pH	Baixa	Média	Alta
CTC a pH 7,00	Ausente	Baixa – média	Alta
Decomposição de matéria orgânica	Alta	Baixa – média	Lenta

Exceções a esta regra são devidas a mineralogia das argilas

Fonte: Brady e Weil, 2013 modificado

6.7. TEXTURA DOS SOLOS

O percentual das frações areia, silte e argila, uma vez misturados, constituem a textura dos solos. Quando se examina determinado solos, a textura seria um dos primeiros tópicos a ser levantados, sendo que as demais propriedades dos solos são determinadas. Tal situação não é considerada variável nas terras, portanto, a textura é inerente aos solos, fazendo com que ela não se modifica com o sistema de manejo (Brady e Weil, 2013).

A divisão da textura pode ser feita em situações generalizadas em três grandes classes tais como arenosa, média (ou textura franco) e argilosa. Na Figura 17 (Embrapa, 2018) indica as classes texturais constituídas com os teores de argila, silte e de areia numa composição utilizada na maioria dos casos, com 13 classes.

Num sistema mais utilizado nos solos tropicais profundos, não hidromórficos, a textura dos solos pode ser definida como teores de argila, a saber: teores menores de 15% (solos arenosos); teores de 15 a 25% (textura média arenosa); teores de 26 – 35 a 40 % (textura média

argilosa); teores de 35 a 40 - 60% (solos argilosos); teores maiores de 60% (textura muito argilosa).

Na definição de uma Areias Quartzozas deve ter 85% de areia, 5% de silte e o restante 10% de argila ou as combinações. Entretanto solos arenosos constituem teores de argila menores de 25% como perfis de latossolos e argissolos, estes de gradiente textural os mais variados.

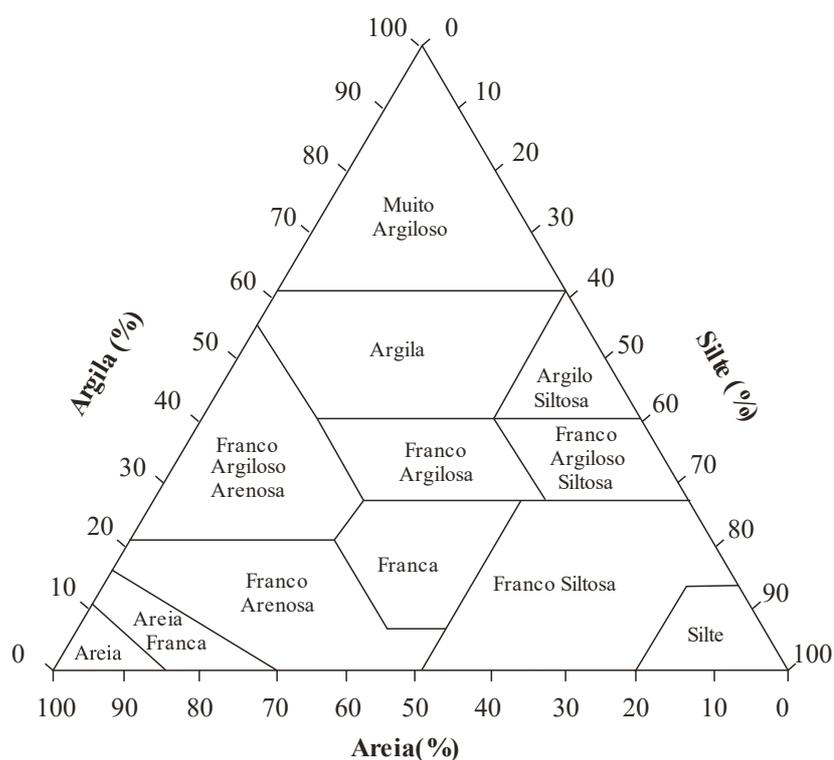


Figura 17 - Classes texturais de material constitutivo de horizontes e perfis de solos. **Fonte:** Embrapa (2018).

6.8. ESTRUTURA DOS SOLOS

O arranjo das partículas de areia, silte e argila associado a matéria orgânica nada mais é do que uma estrutura do solo e devido as forças do solo em relação a esta união formando os *agregados ou peds*. Tais forças normalmente físicas ao se manifestarem num determinado solo tendem a unir os agregados em unidades estruturais tais como umedecimento e secagem, contração e expansão, ação do sistema radicular, escavações feitas por organismos, atividades humanas, alterações devido ao sistema de manejo principalmente na camada superficial. A maioria dos grandes agregados podem ser formados por unidades menores, sendo obtidas com

manuseio. A rede de poros existentes entre e no interior destes agregados, tem grande influência na movimentação do ar e da água assim como no crescimento das raízes e atividades biológicas e na decomposição da matéria orgânica mineralizável.

Alguns solos podem exibir uma estrutura de *grãos simples* onde as partículas não estão agregadas ou pobremente agregadas, em contraste com solos bem mais argilosos, que devido ao intemperismo, formam uma estrutura maciça. De qualquer modo a maioria dos solos apresentam algum tipo de agregação (estrutura) que podem ser caracterizados por um tipo (granular, blocos, prismática ou laminar), por uma classe (corresponde ao tamanho, pequena, média e grande) e por um grau (resistência ao manuseio ou grau de desenvolvimento).

A formação dos agregados do tipo granular, caracterizando camadas superficiais ou de grãos simples, no caso de solos arenosos, não deixa de ser uma característica dinâmica podendo ser modificada. Um agregado pode ser desmanchado e outro formado através das forças do solo e organismos ou atividades humanas. Os macros agregados, são constituídos por micro agregados e estes por agregados ainda menores até a individualização em areia, silte e argila e matéria orgânica.

A agregação dos solos, principalmente nas camadas superficiais, é influenciada pelos organismos. Estes organismos através de seus constituintes tais como na produção de aminoácidos ou na exsudação de compostos orgânicos produzidos nos sistemas radicular das plantas, principalmente nos pelos absorventes, ou ingerindo as camadas de terras e posteriormente depositando-as como as minhocas, formando os *pellets*.

A matéria orgânica (MO) gerada pela decomposição da flora e fauna dos solos assim como do material produzido por elas, tem uma ação na agregação nos solos pois através de sua decomposição geram calor e energia necessária aos organismos, fazendo com que atuem na agregação dos solos. Durante o processo de agregação a MO tende a revestir as partículas maiores do solo formando polímeros orgânicos e que podem interagir com fração mais argilosa formando pontes unindo as camadas.

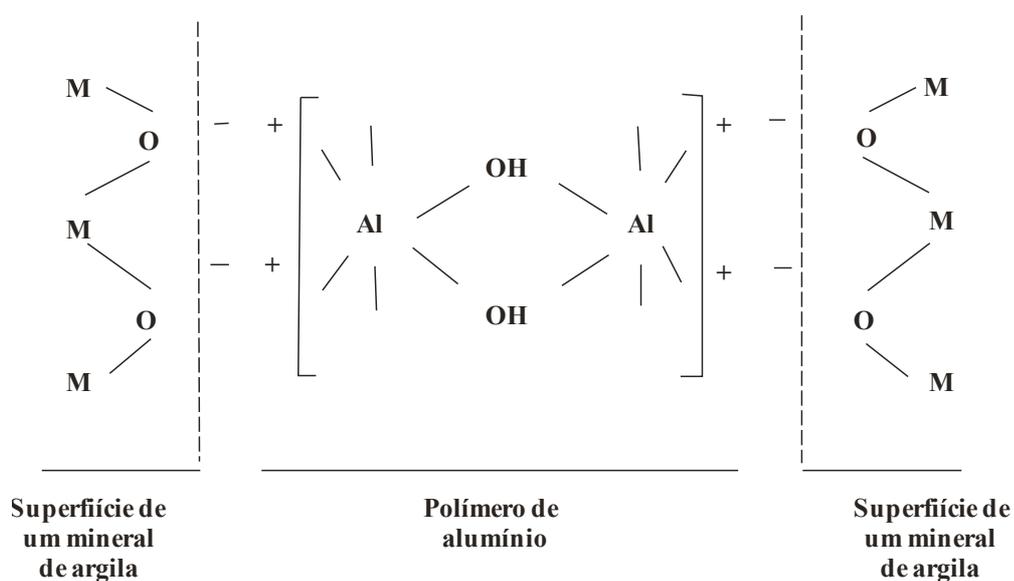
Entretanto a estrutura de um solo não pode ser confundida com *torrões* que podem ser blocos comprimidos e coesos de material de solo normalmente formado com aração de um solo úmido ou molhado, atividades de máquinas nas superfícies dos solos como compactação etc.

6.9. FORMAÇÃO DE AGREGADOS (FLOCULAÇÃO E DISPERSÃO DOS COLÓIDES DOS SOLOS)

Há diversos esquemas na formação dos micros agregados normalmente com cargas negativas nos minerais de argila e matéria orgânica, unindo através de íons pontes (tais com o Ca^{2+} e Mg^{2+}) ou polímeros de alumínio positivamente carregados nas extremidades do coloide

No diagrama é mostrado cargas negativas do coloide dos solos (total de quatro) e na superfície de cargas positivas dos polímeros de um óxido ou hidróxido de alumínio (total de quatro) que se unem, positivo e negativo, formando um agregado. Neste esquema (Zhang, G.Y. & Yu, T.R 1997) o íon M do solo representa um Fe ou Al de coordenação 6 com moléculas de água ou grupos OH assim como do hidróxido de alumínio (Figura 18).

A união se daria através de forças eletrostáticas, e pontes de hidrogênio nas faces de quebra dos coloides. Utilizando técnicas com microscópio eletrônico, observaram a presença de gel amorfo de alumínio (hidróxido de Al não cristalino) unindo partículas de argila.



M - Cátions trivalentes em coordenação 6, assim como o Al

Figura 18 - Esquema ilustrando a ligação entre o polímero de Al (cargas positivas) e as superfícies de dois minerais de argila (cargas negativas) formando um micro agregado. A coordenação é 6 para cátion M e Al e a eletrovalência é 1/2. As cargas são dependentes. **Fonte:** Zhang, G.Y. & Yu, T.R. (1997)

6.10. FORMAÇÃO DE MICRO AGREGADO COM MATÉRIA ORGÂNICA (MO)

Um micro agregado pode ser formado na superfície de um solo negativo com íons pontes e matéria orgânica. O esquema seria o seguinte:

Cargas negativas do solo - íons pontes (cargas positivas) - MO (cargas negativas) - íons pontes (cargas positivas) - cargas negativas do solo

A matéria orgânica com o grupo funcional carboxílico matéria orgânica (ácidos fúlvicos e húmicos) é introduzido entre os íons pontes e a superfície do solo formando um micro agregado num complexo *mineral-orgânico*, muito estável, alterando assim as características da nova superfície do cristal formado.

Num solo muito intemperizado na subsuperfície com minerais de cargas positivas tais como goethita ou gibbsita se unem com MO (estes com cargas negativas), formando um micro agregado num esquema seguinte:

Cargas positivas do solo – MO (cargas negativas) – Cargas positivas do solo

Entretanto, tal processo é mais comum em solos mais argilosos, principalmente na *floculação* ou atração mútua do mineral de argila, com cargas positivas na subsuperfície dos solos, e matéria orgânica com cargas negativas funcionando como um íon ponte. Tais agregações podem também ocorrer com cargas negativas da fração argila e matéria orgânica estabilizado por um cátion ponte como cálcio, alumínio, ferro.

No sistema de preparo do solo, principalmente na camada superficial, pode construir como destruir em parte a camada orgânica e em consequência a agregação. E extremamente importante a MO introduzida no solo através do sistema radicular das plantas ou plantas de cobertura ou em plantio direto em terras arenosas.

CAPÍTULO 7:

7.1. MANEJO DA MATÉRIA ORGÂNICA

O conceito de matéria orgânica do solo (MOS) é um tema de muita discussão na comunidade científica e, por isso, ainda não está consensualmente definido. Para isso, sugere-se aos interessados consultar os compêndios e os artigos básicos publicados sobre o assunto.

Numa resenha Malavolta (2006) sobre o livro “Soil Diversity in Amazonian and other Brazilian ecosystems”, fez um comentário de que “1,0 g de solo fértil contém 1012 de bactérias, 104 protozoários, 102 nematoides e 25 km de hifas de fungos, indicando que ser este um número maior do que a população do mundo”, tal autor indicou que a Biodiversidade do solo na Amazônia e demais ecossistemas como a Mata Atlântica, o Cerrado, o Pantanal e a Caatinga, refletem as diferenças de clima, solo e idade, assim como tem sido sinônimo de preservação de plantas e animais.

De maneira geral, a MOS pode ser definida como sendo todo material orgânico decomposto ou não, de origem biológica, vivo ou morto, que se encontra no solo. Tal material é decomposto por ação dos organismos dos solos e tende a gerar cargas negativas que se ligam umas às outras através de um emaranhado de cátions, pontes como cálcio, magnésio, ferro, oriundos da decomposição.

Na região tropical, em solos com cargas variáveis e dependentes de pH, grande parte das reações físico-químicas são atribuídas à MOS. Ela fornece macro e micronutrientes, principalmente N, P e S, e aumenta a quantidade de água retida no solo, alterando o Ponto de Carga Zero (PCZ).

Raij, B von (2011) relata que a capacidade de troca de cátions do solo (CTC) atribuída à matéria orgânica (MO) na camada superficial varia de 56 a 82%, em solos com teores de argila de 5 a 64%. Na camada de subsuperfície, na profundidade de 74 a 150 cm, a CTC da MO é menor devido ao decréscimo, variando de 6 a 59%.

Silva L. B (2007) observou que a contribuição do carbono orgânico total (COT) na CTC do solo é 157 vezes maior que a contribuição da fração argila, enquanto a maioria dos autores são unânimes em considerar que a CTC da MOS está na faixa de 150-200 cmol.dm^{-3} .

Em relação à composição elementar, a MOS é constituída de carbono, na faixa de 50 a 60%, oxigênio, cerca de 35%, seguidos de nitrogênio (N) e hidrogênio (H), na faixa de 3 a 7% respectivamente, e de enxofre (S) e fósforo (P), que ocorrem na proporção de 2% ou menos (DICK et al., 2000).

A MOS apresenta alguns componentes básicos, sendo que um deles é possível identificar parcialmente os constituintes do material originário (material que pode ser decomponível), e no outro o material já está bem mais degradado e mineralizado, contendo principalmente ácidos húmicos (AH) e fúlvicos (AF). A fração mineralizada das substâncias húmicas (SH) é constituída por uma série de misturas de substâncias polidispersas, sem fórmula molecular definida, contendo os principais grupos funcionais do carbono. A elevada reatividade dos AH e dos AF, originando a alta CTC da MOS, se deve à desprotonação de diversos grupos, os carboxilos, formando cargas negativas (R-COO-) e hidroxilas fenólicas (R-fenol-O-), que são responsáveis pela sua acidez 94 (Figura 19).

De maneira geral, a MOS apresenta cargas negativas, e as cargas positivas somente aparecem em pH abaixo de 3,0.

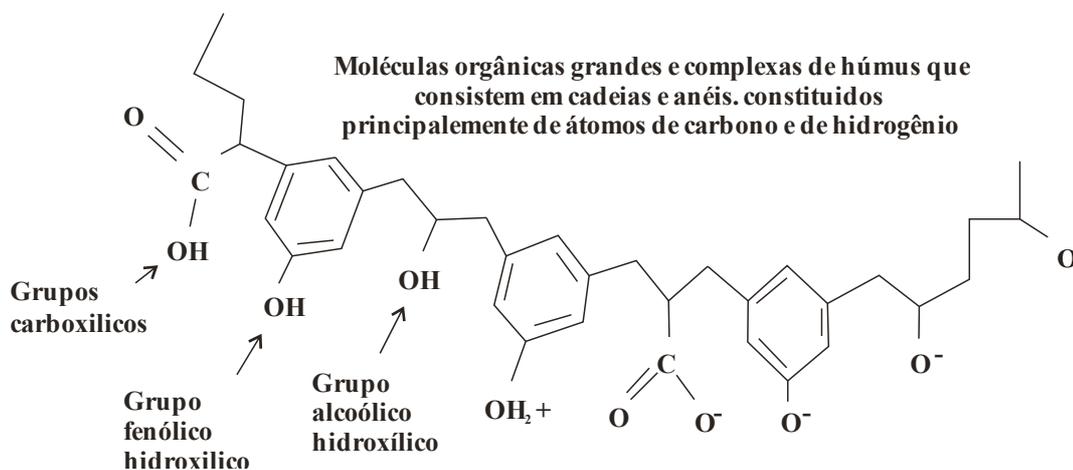


Figura 19 - Uma representação da provável estrutura de um ácido húmico, que é um componente primário do húmus coloidal dos solos. Uma inspeção cuidadosa revelará a presença de muitos dos grupos ativos de hidroxilas (OH), assim como certos grupos de nitrogênio e grupos contendo enxofre. **Fonte:** Dick D. P et al. (2000)

7.2. BASES PARA O ENTENDIMENTO DO MANEJO DA MATÉRIA ORGÂNICA

Há uma série de expressões que tentam explicar a dinâmica das MOS ou a relação que existe entre matéria bruta que entra no sistema solo e matéria estabilizada ao longo do tempo.

Num sistema mais simples de entender o sistema de manejo está expressa na fórmula a seguir (SANCHES, 1981):

$$C = \frac{b \times m}{k}$$

C = carbono orgânico no solo (t.ha⁻¹);

b = a/m = quantidade de MO bruta adicionada ao solo (t.ha⁻¹);

a = adição anual de carbono orgânico no solo (t.ha⁻¹);

m = taxa de decomposição da matéria bruta em material humificado do solo (%);

k = taxa de decomposição da matéria orgânica humificada do solo (%).

Independente do teor de argila, observou-se que há sempre dois componentes do carbono orgânico (CO), um biodegradável ou ativo, de interesse para a cultura, principalmente com liberação de nutrientes de CTC instável, e outro componente estável com interação entre coloide do solo e CO, não degradável ou passivo, porém com liberação metaestável de nutrientes, e CTC tida como estável.

A explicação para este fato é que o CO estável se aloja nos ultra-microporos dos minerais de argila e óxidos, inacessíveis e fora da ação dos microrganismos decompositores, e que este CO humificado permanece por décadas ou milhares de anos inalterado.

Portanto, o teor de CO será governado pelo k do solo, maior em solo arenoso (devido ao pouco teor de argila) e menor em argiloso (devido ao maior teor de argila) assim como ele é influenciado pela textura, mineralogia, clima, sistemas de manejo e demais atributos.

Em um solo sob mata, o teor de MO total (biodegradável e passivo) não se altera ao longo do tempo, pois está em equilíbrio dinâmico. Com a introdução de MO bruta

(biodegradável), fator b , há decomposição desta MO, fator m , e o fator k , mantém o equilíbrio (faixa a-b).

Com a remoção da mata há desequilíbrio no sistema. Em consequência, o teor de MO total cai (faixa b-c ou b-e) devido à redução do b e aumento do k . Dependendo do nível de manejo a ser instalado, o teor de MO ao longo do tempo tende a atingir um novo equilíbrio dinâmico (faixa c-d ou e-f), porém, sempre inferior ao nível original (a-b), (Figura 20, Dematte, J.L.I, 2019).

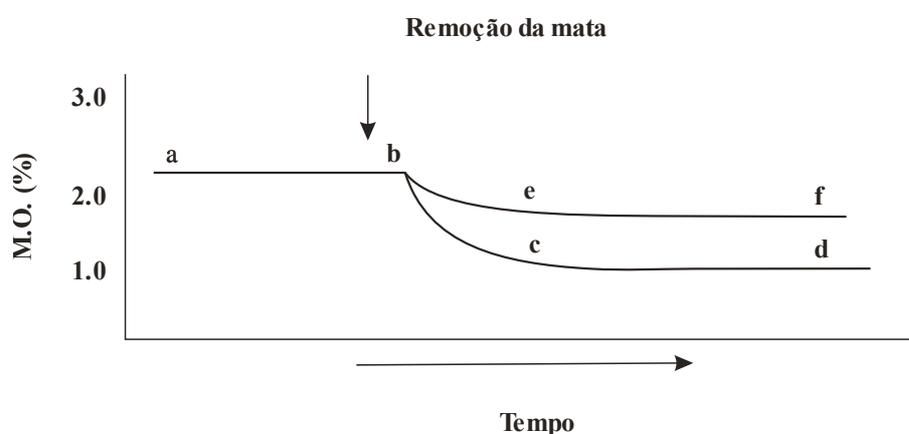


Figura 20 - Dinâmica da matéria orgânica no solo com a presença de mata e após a remoção da mata. **Fonte:** Demattê JLI (2019)

Legenda:

ab = equilíbrio dinâmico, não há alteração da MO;

bc ou be = queda no teor de MO devido às alterações do k , que aumenta, e do b , que diminui;

cd ou ef = novo equilíbrio dinâmico com as culturas. O teor de MO, entretanto, é menor do que no sistema original.

Em solos do Tabuleiro Costeiro, em Alagoas, o teor de MO (ativa e passiva) na profundidade de 0-100 cm era de 259 t.ha⁻¹ sob mata original. Após a retirada da mata, e com o cultivo de cana-de-açúcar por 35 anos, o teor de MO do solo foi a 148 t.ha⁻¹ (perda de 111 t.ha⁻¹ de MO ativa), com perda anual de 1,9%. Entretanto, tal perda não chega a zero, pois as condições de manejo atingiram um novo patamar, em equilíbrio dinâmico, porém inferior ao original.

7.3. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM REGIÃO TROPICAL E TEMPERADA

Ação dos fatores da equação:

$$C (t/ha) = \frac{b \times m}{k}$$

Na região de floresta (Sanches, P.1981), a taxa de decomposição da matéria bruta (m%) é constante nos dois ambientes climáticos: tropical e temperado (Tabela 30).

Na região tropical, a quantidade de MO bruta adicionada ao solo (b) é cinco vezes maior do que na região temperada, entretanto, a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (k%) é mais alta na região tropical. Com isso, o teor de MO final tende a ser semelhante em ambos os ambientes. Nas regiões de cerrado tropical e pradarias americanas, região temperada, o b e o k são semelhantes e, em consequência, também o teor de MO, uma vez que o m é constante em ambos os ambientes. Isso se explica por meio do clima: na pradaria americana, o frio intenso reduz a atividade biológica, enquanto na região de cerrado a seca que ocorre durante seis meses seguidos também reduz a atividade biológica do solo (Sanches 1981).

Tabela 27 - Estimativa da quantidade anual de matéria orgânica adicionada ao solo nas regiões tropical e temperada.

Vegetação	Localização	Clima	b	m	a	K	C	
			t/ha	%	t/ha	%	t/ha	%
Floresta tropical	Mato Grosso	Ustico	5,28	50	2,64	2,5	106	2,4
	Amazônia	Udico	6,05	47	2,86	5,2	55	1,2
	Califórnia		0,75	47	0,35	0,4	88	2
Floresta temperada	Califórnia (Pinus)		1,65	52	0,86	1	86	1,9
Savana tropical	Brasil central	1250 mm	1,43	50	0,71	1,3	55	1,2
Pradaria temperada	Minessota	870 mm	1,42	47	0,53	0,4	86	1,8

Fonte: Modificada de Sanches (1981).

Legenda:

b = quantidade de MO bruta adicionada ao solo;

m = taxa de decomposição da MO bruta;

a = adição anual de carbono orgânico no solo;

k = taxa de decomposição da MO humificada;

C = carbono orgânico no solo.

7.4. DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA CANA-DE-AÇÚCAR: BIODEGRADÁVEL E PASSIVA

Os dados a seguir foram extraídos de um dos trabalhos de Cerri (1986) apesar de ele ser considerado para solo argiloso, porém se aplica também para solos arenosos. Este autor trabalhou sobre dinâmica da matéria orgânica no solo, na região de Piracicaba, SP, cultivada com cana-de-açúcar, em três períodos de tempo, a saber: (a) T0, com 71,9 t.ha⁻¹ de CO em área de mata, (b) T12, com doze anos de cultivo de cana-de-açúcar, com 36 t.ha⁻¹ de CO total, e (c) T50, estimando-se 50 anos de cultivo de cana-de-açúcar, com 21,2 t.ha⁻¹ de CO estável (Figura 21).

Nota-se que a remoção da mata e a introdução da cultura de cana houve uma queda de 50% no teor do CO biodegradável da mata, o qual foi substituído gradativamente pelo CO da cana, também biodegradável, porém em quantidade menor que a original. O componente estável do CO, na faixa de 20,9 t.ha⁻¹, permaneceu inalterado ao longo dos 50 anos, enquanto a perda de CO biodegradável foi de 69%.

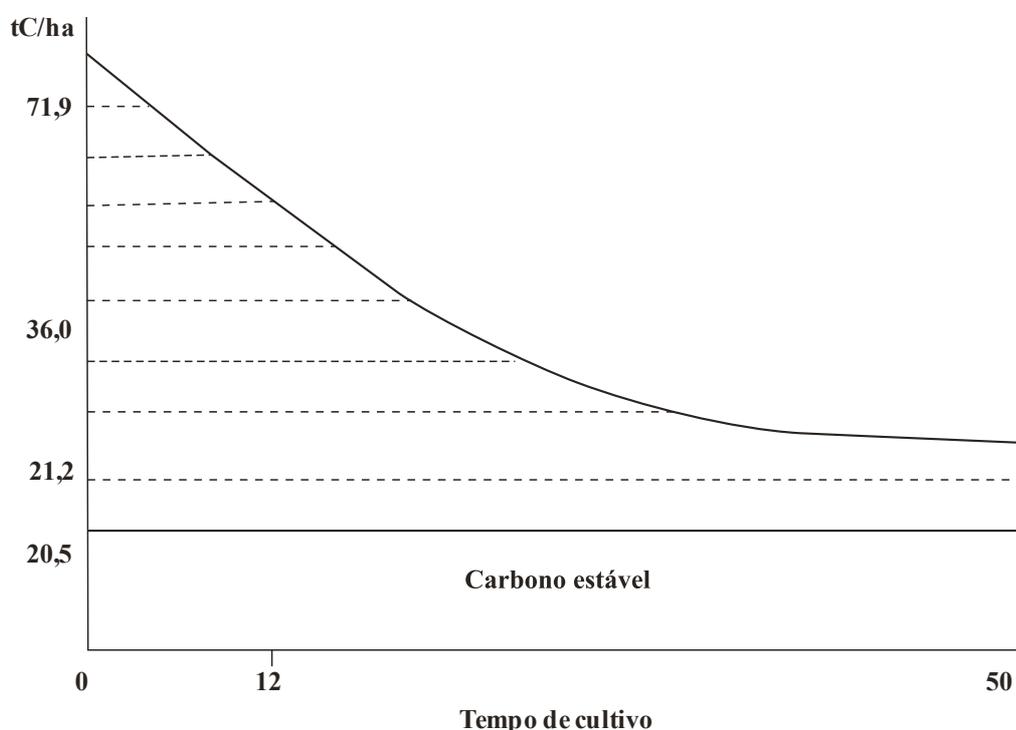


Figura 21 - Representação esquemática da quantidade de carbono total (CT) no solo em função do tempo de cultivo. O carbono total é representado pelo carbono estável da floresta (Cfe) e pelo carbono biodegradável da floresta (Cfb). **Fonte:** Cerri (1986).

Em relação a este tópico e em cultivo de pastagem na Amazônia em comparação com a floresta, ao longo dos anos de trabalho verificou-se que o teor de MO da pastagem foi gradativamente substituindo ao teor de MO da mata numa situação semelhante a cana-de-açúcar.

7.5. ATIVIDADE BIOLÓGICA

Tal autor também obteve resultados da atividade biológica na camada de solo de 0-10 cm nos tratamentos T0, T12 e T50. Verificou que a Biomassa Microbiana (BM) e o Carbono Facilmente Biodegradável (CB) decrescem ao longo do tempo, de T0 para T12, e que posteriormente se estabilizam. Levando-se em consideração o mesmo teor de CO (mg C/g CT), nota-se que a atividade biológica global do solo é nitidamente mais importante no solo sob floresta do que no solo sob cultura, no caso a cana-de-açúcar e que, conseqüentemente, a MO e o CB são mais facilmente biodegradáveis (Tabela 31).

Tal resultado indica que o CO dos solos cultivados por longo tempo com cana-de-açúcar perde significativamente o constituinte biodegradável e que a recuperação biológica é muito difícil de ser conquistada, por ser tempo dependente.

Tabela 28 - Carbono total do solo, biomassa microbiana (BM) e carbono facilmente biodegradável (CFB) na camada de 0-10 cm do solo em diferentes tempos de cultivo.

Áreas	CT Solo		BM		CB	
	mg C/g solo	micro C/g solo	mg C/g CT	micro C/g solo	mg C/g CT	
T0	37,2	65	1,75	20	1,1	
T12	16,5	15	0,91	2	0,12	
T50	14,6	16	1,1	1	0,07	

CT: Carbono Total do solo

Fonte: Cerri (1986).

Legenda:

T0 = tempo zero;

T12 = 12 anos de cultivo;

T50 = 50 anos de cultivo.

7.6. PERDAS DE CO

As perdas de CO do solo por lixiviação na camada 0-20 cm é intensa no tempo T0. Anualmente, são removidos naturalmente pela água de percolação das chuvas um total de 0,35 TC.ha⁻¹.ano⁻¹ no T0, 0,05 TC.ha⁻¹.ano⁻¹ no T12 e 0,03 TC.ha⁻¹.ano⁻¹ no T50. As perdas de N no

sistema de mata são apreciáveis, na faixa de 94,94 kg.ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto no sistema cana-de-açúcar elas são bem menores, na ordem de 20 kg.ha⁻¹.ano⁻¹ em T12 e de 17 kg.ha⁻¹.ano⁻¹ ao longo de T50 (Tabela 32).

Em relação aos constituintes do húmus (ácido fúlvico livre, ácidos fúlvicos ligados a diversos extratores e ácido húmico ligado a diversos extratores e huminas) nos dois sistemas estudados, nota-se um decréscimo de 40% nas huminas, ao longo do tempo, de T0 para T12, estabilizando-se a seguir, o mesmo ocorrendo em relação aos demais produtos, exceto para o ácido fúlvico livre, que praticamente permaneceu constante, indicando ser este componente mais estável.

Tabela 29 - Perdas de carbono e de nitrogênio na água de percolação em diferentes períodos de cultivo.

Situação	Líquido Percolado				C/N
	Carbono		Nitrogênio		
	ppm	kg/ha/ano	ppm	kg/ha/ano	
T0	136,08	349,09	37,01	94,94	3,7
T12	19,73	51,28	7,7	20,02	2,6
T50	11,52	30,09	6,54	17	1,8

Fonte: Cerri (1986).

Legenda:

T0 = tempo zero;

T12 = 12 anos de cultivo

T50 = 50 anos de cultivo.

Em outro trabalho sobre dinâmica da MO, BRADY & WEIL, (2013) observaram que na camada de 0-25 cm de profundidade e no tempo zero, em solo sob mata, o valor total da MO (ativa e passiva) era de 91 t.ha⁻¹ e o teor de MO passiva era de 44 t.ha⁻¹ (praticamente a metade). Após 40 anos de cultivo, a MO total foi reduzida em 50% e o teor passivo, com uma redução bem menor, em 39 t.ha⁻¹, ou 11%. Entretanto, havendo alterações no sistema de manejo, principalmente no conservacionista, a MO ativa foi a que mais aumentou dos 40 aos 100 anos de cultivo, enquanto a MO passiva permaneceu inalterada.

Sendo assim, e para manter o solo produtivo, é importante que o fornecimento de MO biodegradável nos solos, como por exemplo, incorporação de culturas de cobertura anuais, em consórcio ou não, seja feita, se possível, durante todo o ciclo da cultura principal.

7.7. FATORES QUE AFETAM O ESTOQUE DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

7.7.1. Textura e mineralogia de solo

Como os solos argilosos apresentam maior quantidade da fração argila e, portanto, maiores quantidades de micro agregados, em relação aos arenosos, as condições para a reação com a MO são mais propícias e, por isso, os solos de textura mais argilosos sempre apresentam maior teor de MO do que os arenosos. Em outras palavras, os solos argilosos apresentam fator k menor, comparado ao dos solos arenosos, independentemente da profundidade estabelecida, ficando extremamente difícil aumentar o teor de MO estabilizada nos solos arenosos.

A Tabela 33 exemplifica a influência da textura do solo na taxa de decomposição da MO ativa, comparando um solo argiloso, com 71% de argila, a um solo arenoso, com 22% de argila em função do sistema de preparo do solo (BAYER, C. 1996).

No caso do solo argiloso, a taxa de decomposição observada no sistema de preparo do solo convencional foi de 1,14%, enquanto no solo arenoso foi de 4,9%. Em relação ao plantio direto, a taxa de decomposição foi de 1,12% no solo argiloso e de 2,50% no solo arenoso. O pesquisador calculou a quantidade de CO anual via quantidade de fitomassa que deve ser adicionada ao solo para a manutenção do estoque inicial de C no solo, que foi de 8,84 t.ha⁻¹ no sistema de preparo convencional e de 3,92 t.ha⁻¹ de C no sistema plantio direto. Valores superiores ou inferiores a estes valores críticos levam a situações de acúmulo ou perda de MOS. Tais resultados confirmam a tendência de que o plantio direto, independente da textura do solo, mas principalmente nas terras arenosas, seria a melhor opção para o manejo.

Tabela 30 - Taxa de decomposição da matéria orgânica em função do teor de argila e do sistema de preparo do solo

Latosolo vermelho, 71% de argila, caulinita e óxidos		
Taxa de decomposição	Sistema de Preparo	
	Convencional	Plantio direto
	1,14%	1,12%
Argissolo vermelho, 22% de argila, caulinita e óxidos		
Taxa de decomposição	4,90%	2,50%

Fonte: Bayer (1996).

Posteriormente em 2006, Bayer C *et al.*, verificaram que no sistema convencional de preparo do solo, a ação da aração e da gradeação tendem a reduzir o tamanho dos agregados,

alterar as condições hídricas do perfil, aumentar a aeração e a temperatura do solo, assim como as demais características, proporcionando um ambiente favorável à decomposição da MO instável do solo. Além disso verificaram que a taxa de decomposição da MO biodegradável no sistema convencional de preparo de um Argissolo Vermelho foi de 4% ao ano, enquanto no manejo de plantio direto esta taxa foi de 1,9% ao ano, durante 13 anos. Os autores verificaram que a necessidade anual de adição de C, via fitomassa, para a manutenção do estoque inicial de C no solo foi 8,84 t.ha⁻¹ no preparo convencional e de 3,92 t.ha⁻¹ no plantio direto, ou seja, 44,3% a menos nos solos sem revolvimento.

No caso da cana-de-açúcar, em situação de reforma de canavial, em solo arenoso a quantidade de matéria seca incorporada ao solo, incluindo as raízes e a soqueira da cana, gira em torno de 15%. Considerando um ciclo de 5 anos, e uma produtividade de 70 t.ha⁻¹, tal cultura incorpora por ano o equivalente a 10 t.ha⁻¹ de MO. Este material é mineralizado, porém não aumenta a MO estável do solo. Sendo assim, tudo indica que os teores de MO em áreas de cana-de-açúcar têm permanecido constantes ao longo dos anos (Demattê, J.L.I 2019).

7.8. FATOR *k* INFLUENCIADO PELO CLIMA (TEMPERATURA E ALTITUDE)

O fator *k* é influenciado pelas condições de clima, neste caso em função da altitude e em consequência a MOS. Numa referência empírica, a cada decréscimo de 10°C na temperatura há um aumento de 2 a 3 vezes no teor de matéria orgânica do solo, principalmente a biodegradável.

Kampf e Scwetmann (1983), trabalhando numa climosequência em solo argiloso no Estado do Paraná de extensão de 400 km, partindo de Foz do Iguaçu, considerado a quilometragem zero, com altitude de 150 metros, até Guarapuava, altitude de 1.200 metros. Tais autores notaram variações da temperatura que foram influenciadas pela altitude de 1.200 m a 150 m; com média anual de 17 a 22°C e de teor de carbono orgânico de 4,0% a 1,5%, observaram que os maiores teores de CO encontravam-se a 1.000 m de altitude, cerca de 3,5%, e que decresciam para cerca de 1,7% a 100 m de altitude.

7.9. IMPORTÂNCIA DO SISTEMA RADICULAR E QUANTIDADE DE MOS PRODUZIDA

De longa data sabe-se que o sistema radicular fasciculado das gramíneas apresenta maior quantidade de MO do que o sistema radicular pivotante das dicotiledôneas (DICK *et al.*, 2009). Para comprovar esse fato, (Demattê, J. L. I & Demattê, J.A.M., 1993) comparou os perfis de solos da região Amazônica, representando principalmente pelas raízes pivotantes, com os perfis de solos da região de Cerrados, onde predominam as raízes fasciculadas no substrato rasteiro, com base no levantamento de solos realizado pelo Projeto Radam Brasil. Para o cálculo do CO foi considerado a profundidade de 0-100 cm e a densidade de $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$ em ambas as regiões.

Na região dos cerrados, a contribuição das raízes das plantas em termos de MOS é relativamente mais importante do que em uma floresta assim como o total de biomassa produzida pelo sistema radicular em profundidade. Observa-se na Figura 22 que a quantidade total de CO nos solos da região dos Cerrado é sempre maior que nos solos da região Amazônica, independentemente do teor de argila no solo.

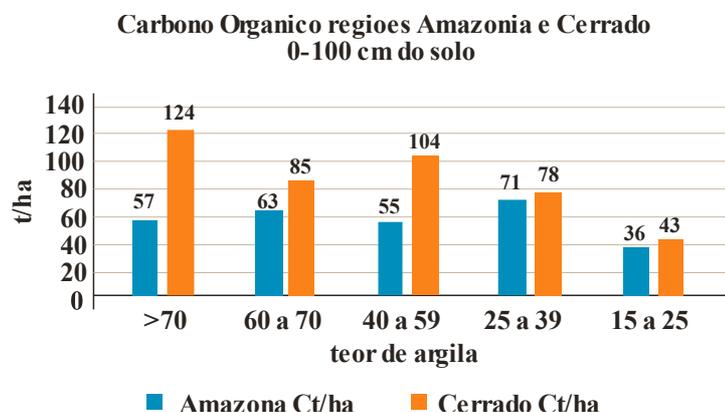


Figura 22 - Quantidade de carbono orgânico em solos das regiões Amazônica e Cerrado em função do teor de argila do solo, na camada de 0-100 cm. **Fonte:** Demattê, J.L.I & Demattê, J.A.M. (1993)

7.10. AUMENTO DA QUANTIDADE DE MO ADICIONADA AO SOLO ARENOSO (FATOR b)

Os dados de literatura são unânimes em afirmar que o aumento da quantidade de MO adicionada ao solo (fator *b* da fórmula) por meio de matéria orgânica importada (restos

culturais, culturas de cobertura, composto orgânico, adubo orgânico, palha etc.), dependendo da quantidade, não aumenta o teor de matéria orgânica estabilizada do solo, apesar de auxiliar no aumento da MO biodegradável e em consequência da produtividade da cultura pelo aumento da CTC efetiva e dos nutrientes liberados. O principal motivo se resume no fato de que a taxa de mineralização deste material (fator *b*) é menor do que a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (fator *k*). Por outro lado, se houver aplicação frequente de MO importada, sempre em quantidade superior à taxa de mineralização da matéria orgânica, haverá aumento da MO instável do solo.

Tal fato pode ser ilustrado em experimento feito, em Barra Bonita SP (Demattê, J.L.I. 2019), em solo arenoso, com cana-de-açúcar de 18 meses adubada com fertilizante mineral, torta de filtro (TF) e composto orgânico, ambos ricos em matéria orgânica. A densidade do solo foi de $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$ e a profundidade 0-25 cm, onde pôde-se observar a evolução do estoque de MO do solo e da produtividade da cultura (Tabela 34).

O composto orgânico (seco) foi aplicado ao solo em doses que variaram de 5,0 a 50,0 t.ha^{-1} , e o fertilizante aplicado na dose de 500 kg da formulação 10-25-25. As análises de solo foram realizadas na época da instalação do experimento, designado tempo zero, e aos 280 e 540 dias, com 3 repetições. Nota-se que quando se aplica TF ou composto orgânico ao solo, o teor de MO é alto no início, porém decresce com o tempo, indicando a degradação da MO ativa do solo. No final do experimento, observa-se que o teor de MO ativa do solo não se alterou em relação ao teor observado no início do ciclo, de 3,1 e 3,2%, respectivamente, inclusive no tratamento T6, que recebeu adição de fertilizante químico. Isso significa que tanto a TF quanto o composto orgânico mineralizaram com o tempo porque a taxa de decomposição da matéria orgânica desses materiais é inferior à do solo. De qualquer forma, houve liberação de nutrientes, principalmente de fósforo.

O tratamento T5 foi uma exceção. Nele foram adicionadas 50 t.ha^{-1} de composto na superfície do solo, o que corresponde a um acréscimo de 2,0% de MO, ou um total de 5,1% (3,1 + 2,0). Mesmo assim, o teor de MO aumentou pouco, para 3,8%, o que corresponde a 12,3 t.ha^{-1} de MO. Portanto, pode-se concluir que somente com aplicações de TF ou composto orgânico, superiores a 50 t.ha^{-1} é possível obter maiores teores de MO degradável, e suplantam a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (fator *k*).

Porém, ao longo do tempo, o teor de MO do tratamento T5 diminuirá a um nível semelhante ao inicial, a não ser que o aporte de MO seja sempre superior ao *k*. Por outro lado,

no T6, que recebeu somente fertilizante mineral, o teor de MO e a CTC não diferiram dos demais tratamentos, a não ser do T5. Tal fato indica que a própria cultura, quando bem adubada e conduzida, torna-se grande fornecedora de M.O. para o solo.

Tabela 31 - Resultados da análise de solo adubado com torta de filtro, composto e fertilizante mineral e respectivas produtividades da cana-de-açúcar. Média de três repetições. Usina da Barra, 2002.

Tratamentos	Época (dias)	pH	MO	P	CTC	V	Produtividade t/ha
		H ₂ O	%	mg/cm ³	cmol/dm ³	%	
T1	0	4,9	3,2	5	5,9	35	117
	280	4,5	2,8	18	5,5	32	
	540	4,5	3,1	12	4,7	39	
T2	0	4,8	3,4	4	5,8	36	114
	280	4,6	2,8	19	5,6	34	
	540	4,6	2,9	11	4,8	30	
T3	0	5,2	3,1	7	5,7	42	114
	280	4,7	2,8	20	5,4	36	
	540	4,8	2,9	10	4,9	41	
T4	0	4,9	3,7	5	6,2	38	115
	280	4,8	3,0	60	5,7	40	
	540	4,7	3,2	28	5,4	36	
T5	0	4,9	3,9	6	6,1	41	120
	280	4,9	3,5	110	6,2	43	
	540	4,9	3,6	39	5,4	41	
T6	0	4,9	3,3	4	6,0	40	112
	280	4,6	2,8	27	5,5	34	
	540	4,6	3,1	13	4,9	32	

T1: TF 5,0 t/ha no sulco. T2: Composto 5,0 t/ha no sulco. T3: Composto 10 t/ha no sulco.

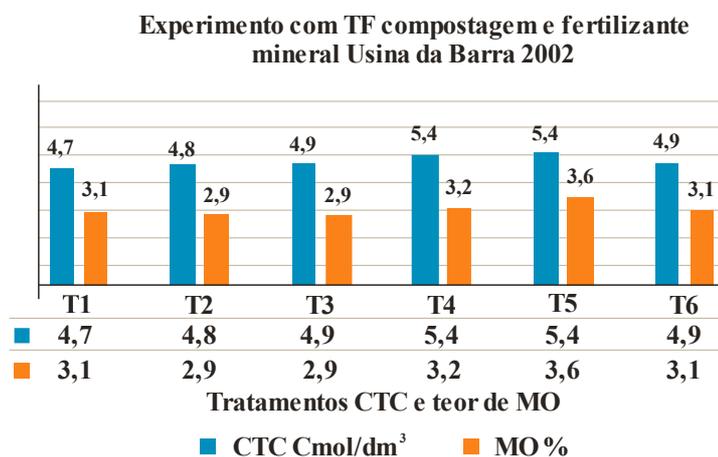
T4: Composto 30 t/ha. T5: Composto 50 t/ha. T6: Testemunha com fertilizante mineral.

Fonte: Demattê (2020)

7.11. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA ATIVA E CTC EFETIVA DO SOLO

Neste experimento (Demattê, J.L.I., 2019) observa-se que a CTC efetiva do solo tendeu a decrescer do tratamento inicial ao tratamento final, devido à mineralização da MO ativa, inclusive no tratamento T6, no qual foi aplicado somente fertilizante químico. Isso indica a estreita relação entre MO e CTC efetiva do solo devido a MO, exceto no tratamento T5, que tem sido maior. No tratamento com 50 t.ha⁻¹ de composto orgânico aplicado em área total, a CTC efetiva 4,7 passou para 5,4 cmol.dm⁻³, respectivamente, correspondente ao aumento da MOS ativa de 3,1 para 3,6% (Figura 23).

Novamente, tal resultado mostra que a quantidade de MO bruta adicionada ao solo suplanta a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo, fator k . Entretanto, se não houver acréscimo de MO bruta no solo ao longo do tempo, a CTC efetiva tenderá a se reduzir ao nível inicial.



Legenda: T1 = 5 t ha⁻¹ de torta de filtro no sulco; T2 = 5 t ha⁻¹ de composto orgânico no sulco; T3 = 10 t ha⁻¹ de composto orgânico no sulco; T4 = 30 t ha⁻¹ de composto orgânico; T5 = 50 t ha⁻¹ de composto orgânico; T6 = testemunha, com fertilizante mineral.

Figura 23 - Valores de CTC e matéria orgânica do solo em função de diferentes tratamentos.
Fonte: Demattê JLI (2019)

7.12. TEOR DE OXIGÊNIO EM FUNÇÃO DE SOLOS ARENOSOS

Entretanto, há um fator limitante relacionado a quantidade que um solo pode conter de MOS, *fator b versus fator k*. O fator k atua também em relação a quantidade de oxigênio no solo, tanto no arenoso como no argiloso. Solos arenosos apresentam densidade de 1,5 a 1,6 g.cm⁻³ e os argilosos de 1,0 a 1,2 g.cm⁻³. Levando-se em consideração que a parte física do solo é de 50% de sólidos e os demais 50% são ocupadas pela água e ar na macro e microporosidade. Entretanto, solos arenosos apresentam maior quantidade de macroporos (variação do diâmetro de 0,08 mm a > 5) e, portanto, maior quantidade de ar, em comparação aos solos argilosos, que apresentam maior quantidade de microporos (variação de diâmetro menor que 0,08 a 0,005 mm). Portanto solos arenosos apresentam maior aeração do que os argilosos, e seu consumo de oxigênio (O₂) chega à quantidade da pressão do ar de 21% (0,21 L/L) do volume desse ar ou aproximadamente de 21kPa.

Entretanto, há necessidade da saída do CO₂ devido as respirações dos organismos e raízes, e por causa da difusão e gradiente entre atmosfera e solo, sai CO₂ e entra O₂. O teor de MOS nos solos arenosos à medida que entra material orgânico ele é mineralizado, é queimado pelo oxigênio do solo e, portanto, o seu teor de MOS é baixo.

As alterações deste sistema seriam num solo encharcado ou num solo bem drenado, porém compactado, pode encharcar com irrigação ou chuvas. Em consequência deste fato solo arenosos teriam pouco oxigênio e, portanto, podendo acumular MOS. De fato, a difusão de oxigênio está na faixa de 10.000 vezes mais rápida através de um poro preenchido por ar do que de água (BRADY & WEIL (2013).

7.13. VINHAÇA COMO FONTE DA MATÉRIA ORGÂNICA DECOMPONÍVEL (Fator *b*)

Em experimento em Macatuba, SP (Lorenzetti J.M. et al., 1992) com soqueira de cana, em solo com 18% de argila, densidade 1,45 g.cm⁻³, 1,0% de MO na profundidade de 0-50 cm (corresponde a 70 t de MO), com uma quantidade de vinhaça de 200 m³.ha⁻¹ com concentração de 1,2 kg K₂O. Numa safra a quantidade de MO adicionada na forma de vinhaça foi de 4,0 t.ha⁻¹.ano⁻¹ ou, num ciclo de seis safras, 24 t.ha⁻¹ de MO ou um total de 34% do total o que corresponde a 1,34% de MO no solo.

Entretanto, observou-se que o teor de MO no final do ciclo foi de 1,07%, ou seja, foram mineralizadas praticamente 24 t.ha⁻¹ da MO instável da vinhaça. O teor de 0,07% corresponde à quantidade de MO bruta adicionada (*fator b*) que excedeu a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo. Porém, se a vinhaça não for aplicada o teor de MO permanecerá em 1,0% valor inicial do solo.

Esta situação pode ser visualizada nos resultados de um experimento conduzido por Penatti (2013) em solo argiloso, no qual foram comparadas duas áreas adjacentes, uma com e outra sem aplicação de vinhaça. A vinhaça foi aplicada desde a safra 1980, na quantidade de 200 m³.ha⁻¹ (1,8 kg.m⁻³ de K₂O e 20 kg.m⁻³ de MO).

Nota-se na Tabela 35 que a média do teor de MO no solo 1 foi de 25 g.dm⁻³, contra 22 g.dm⁻³ no solo 2, uma diferença de 4 g.m⁻³ ou 38,4 t, na profundidade de 0-80 cm, devido justamente à MO da vinhaça que não foi mineralizada, sendo um caso típico de *b* superior a *k*.

O aumento da CTC no Solo 1 se deve ao maior teor de MO, uma vez que o pH permaneceu constante nos dois solos.

Tabela 32 - Características de solos argilosos com e sem vinhaça, na profundidade de 0-80 cm. Usina Santa Elisa, Sertãozinho, SP, 1998.

Profundidade cm	pH	MO g/dm ³	K mmol/dm ³	CTC mmol/dm ³	% K CTC	V %
Solo 1 LR distrófico com vinhaça						
0 – 20	5,0	35	10	85	12,0	55
20 – 40	5,2	28	8	71	11,8	57
40 – 60	5,3	21	8	54	14,1	53
60 – 80	5,5	18	8	49	16,3	55
Média	5,2	26	8,6	65	13,5	55
Solo 2 LR distrófico sem vinhaça						
0 – 20	4,8	26	2	56	3,2	32
20 – 40	5,2	23	1	50	1,6	38
40 – 60	5,3	20	1	36	1,6	30
60 – 80	5,5	18	1	34	1,4	25
Média	5,2	22	0,9	44	1,9	31

Usina Santa Elisa, SP 1998.

Vinhaça: MO 25 kg/m³; 1,2 kg/m³; 200 m³/ha desde a safra 1980.;

Fonte: Penatti (2007).

7.14. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS VEGETAIS (Fator b)

A produtividade da cana-de-açúcar (média de seis cortes) da Usina Santa Adélia em Jaboticabal foi de 110,8 t.ha⁻¹ em solo de textura média-arenosa e a quantidade de massa seca incorporada ao solo por ocasião da reforma foi de 23,4 t.ha⁻¹. Na Usina São Martinho a produtividade foi de 77,4 t.ha⁻¹ e a quantidade de massa seca incorporada ao solo foi de 16,7 t.ha⁻¹. Com tais números foi gerada a Figura 24, que ilustra, a quantidade média de matéria seca incorporada por ocasião da reforma dos canaviais nas usinas (fator b), nota-se, entretanto, que não houve incremento da CTC e do teor de MOS nos solos das duas áreas, devido à pequena quantidade de material incorporado ao solo (Franco *et al.* 2007).

Em ambas as áreas, o estoque de nutrientes nos resíduos incorporados ao solo de acordo com os autores, obedeceu a seguinte ordem decrescente de grandeza: N > K > Ca > S > Mg > P.

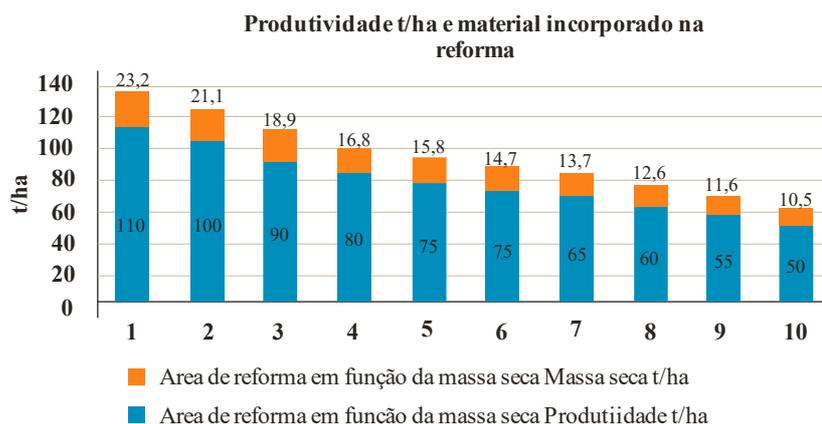


Figura 24 - Produtividade média da cana-de-açúcar e quantidade de massa seca incorporada ao solo na reforma do canavial. **Fonte:** Franco H. C. J et al. (2007).

7.15. MATÉRIA ORGÂNICA DE ADUBOS VERDES E DE OUTRAS CULTURAS (Fator *b*)

O emprego de adubos verdes na rotação de culturas não tem aumentado a MO estabilizada do solo, porém, tem sido relatado em inúmeros artigos e trabalhos que a ação destas rotações tem sido benéfica à cultura principal. Em trabalhos realizados pela Embrapa (Goedert, W.J *et al.* 1986), no período 1997 a 1979, em Latossolo Vermelho utilizando, além dos adubos verdes, soja e milho, com dois níveis de adubação, notou-se que, no terceiro ano, no final dos experimentos, o teor de MO do solo era semelhante ao teor inicial, no primeiro ano (Tabela 36).

A principal razão para essa resposta é a baixa estabilidade da MO dessas culturas (fator *b*) que, ao serem incorporadas ao solo, se decompõem, liberando nutrientes e trazendo uma série de benefícios à cultura posterior, porém sem aumentar a MO. No caso da cana-de-açúcar, o adubo verde, ou as outras culturas utilizadas nas reformas (soja, amendoim etc.), não promovem o aumento da MO estável do solo, porém, protegem o solo contra a erosão, além de fornecer nutrientes para a cultura principal e, em consequência, aumentar a produtividade da cana nos diversos ciclos.

Tabela 33 - Teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso após rotação com diferentes culturas anuais, em dois níveis de adubação, no período de 1977 a 1979.

Tratamentos	Culturas		Matéria Orgânica		
	1977 - 78	1978 - 79	Dez. 77	Set. 78	Mar. 79
Ad2	Soja	Milho	3,3	2,8	3,3
Ad2	Mucuna Preta	Milho	3,2	2,9	3,1
Ad2	Sorgo	Milho	3,3	2,9	3,2
Ad2	M. Preta + Sorgo	Milho	3,2	2,9	3,2
Ad1	Soja	Milho	3,3	3,0	3,1
Ad1	Mucuna Preta	Milho	3,4	2,9	3,3
Ad1	Sorgo	Milho	3,4	3,0	3,1
Ad1	Milho	Milho	3,3	2,9	3,1
Ad1	Milho	Milho + M. Preta	3,3	2,9	3,1

Ad1 e Ad2: níveis de adubação

Fonte: GOEDERT, W.J et al. (1986).

A Tabela 37 (Caceres, N. T.& Alcarde, J. C. 1995) ilustra a quantidade de matéria seca e de nutrientes dos principais adubos verdes utilizados em rotação com a cana-de-açúcar. Tomando-se como base a quantidade média de matéria seca produzida, de 8,3 t.ha⁻¹, nota-se que não houve aumento da CTC do solo, pois tal quantidade é pequena, porém, houve liberação de nutrientes, favorável à cultura principal, principalmente de N e K, numa relação de C/N favorável aos solos além de proteção contra o sistema erosivo. Lima filho et al (2023) apresentam os inúmeros benefícios da adubação verde em diferentes solos e qualidade de culturas.

Tabela 34 - Quantidade de matéria seca, relação C/N e teores de nutrientes nos principais adubos verdes utilizados em rotação com a cana-de-açúcar.

Espécie	Nome científico	Matéria	C/N	N	P	K
		seca t/ha				
Feijão de porco	Canavalia ensiformis D.C.	5,3	19,5	146,0	10	113
Lablab	Dolichos lablab L.	7,1	22,0	168,0	12	117
Crotolaria juncea	Crotolaria juncea L.	16,1	35,2	252,0	13	140
Mucuna preta	Mucuna aterrina – Piper e Tracy	9,1	24,4	191,0	12	125
Crotolaria paulina	Crotolaria paulina Schrank	5,1	22,0	118,0	9	147
Guandu	Cajanuscajan L.	17,9	29,4	336,0	21	180
Feijão-caupi	Vigna unguiculata L.	4,1	32,3	67,0	6	56
Feijão-bravo-do-ceará	Canavalia brasiliensis Mart.	7,4	21,3	174,0	14	150
Braquiária	Urochloa decumbens	3,8		31,4		11,6
Milheto	Pennisetum glaucum L.	7,3		68,0	23	194
Média	-	8,3		155,1	13,3	123,3

Fonte: CACERES, N. T. et al. 1995.

7.16. COBERTURA DA PALHA E DECOMPOSIÇÃO DEVIDO TEMPERATURA

No cultivo de cana-de-açúcar, a cobertura do solo pela palha, após a colheita, reduz a temperatura média do solo, conferindo vantagens (cobertura do solo, atenuação da temperatura, aumento do intervalo de temperatura, resistência a erosão etc.) e desvantagens (redução da temperatura em períodos frios, aumento de pragas e doenças etc.). As variações de temperatura variam em relação as diversas regiões do Brasil sendo que na região de Ribeirão Preto, SP, em setembro de 2017, a temperatura média de uma área sem palha foi de 36°C, enquanto em área com palha foi de 25°C, uma redução substancial de 11°C (Dinardo-Miranda, L.L. et al., 2008).

Entretanto, a cobertura morta de palha não proporciona aumento da MO, a não ser que, após a decomposição, a MO seja incorporada pelas chuvas, pois as palhas não têm raízes. A palha sobre a superfície do solo, dependendo da região, tende a ser mineralizada ao longo da safra e, portanto, não interfere no aumento da MO e da CTC efetiva. É o que indicam os dados da Tabela 38, que mostra a quantidade de palhada remanescente ao longo da safra de cana-de-açúcar em diversas regiões do estado de São Paulo. Observe que, no início da safra, a quantidade média de palhada remanescente das diversas regiões era de 11 t.ha⁻¹ e, à medida que o ciclo se desloca para o final de safra, a quantidade média de palhada remanescente cai para 4,2 t.ha⁻¹, com mineralização de 61,8%, sem aumento do teor de MO do solo (Rossetto R, *et al.*, 2013).

Tabela 35 - Quantidade de palhada remanescente após a colheita da cana-planta, no início, meio e no final da safra da primeira soqueira, em diversas regiões do estado de São Paulo.

Palha (t/ha)	Decomposição da palha ao longo da safra								Média
	Andradina	Sertãozinho	Pradópolis	Guaira	Orindiuva	S.J. Barra	Araçatuba	Guaira	
Safra	SP 813250	RB 855453	RB 7515	1816	RB 5054	SP 367	RB 5054	SP 3250	t/ha
Início	12,8	10,8	14	10,5	10,2	10,2	8,2	10	11
Meio	8	6,2	6	6,2	6	6	6	5,2	6 (45,4%)
Fim	5	5,8	4,5	6	3	3	2,8	3	4,2 (61,8%)

Quantidade de palha remanescente após colheita cana planta, logo após o corte, 6 e 12 meses após corte

Fonte: Rossetto et al., 2013.

No Brasil Central, Estado de Goiás, (Carolino de Sá *et al.* 2022), em cana-de-açúcar num sistema preparo convencional (SPC) e plantio direto (SPD) com palha e sem palha, observaram que em um perfil de solo na profundidade de 100 cm, verificaram que o teor de MO até os 40 cm de solo, foi superior no SPC. Em relação ao PD com palha e sem palha o PD com palha foi sempre superior ao PD sem palha. A partir desta profundidade os teores de MO são semelhantes.

Na produtividade de cana-de-açúcar plantadas na safra 2013/14, não houve diferenças entre os sistemas de preparo do solo, assim como na segunda e terceira socas para o SPC e PD com palha. No sistema de PD sem palha a produtividade das socas foi menor devido a maior evapotranspiração. Na conclusão os autores afirmam que em 36 experimentos nos mais diversos solos, inclusive arenosos, as produtividades de colmos foram na sua maioria semelhantes aos dois sistemas de preparo de solos.

Com tais resultados ocorre que o plantio direto em cana-de-açúcar mantendo a palha na superfície nas soqueiras, como foi visto anteriormente em solos arenosos no oeste de São Paulo, são válidos, a palha reduz a evapotranspiração.

7.17. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA NOS SOLOS DE SÃO PAULO

A Tabela 39 resume os teores de MOS com diferentes texturas cultivados há décadas em São Paulo, o que não difere muito do Brasil (Raij B van et al., 1996). Nota-se que os solos argilosos apresentam sempre maiores teores de MOS que os arenosos assim como maior CTC.

Em Ribeiros *et al.*, 1999 (Tabela 40), levando-se em consideração os teores médios em solo arenoso de 1,30% e densidade de 1.0 g.cm^{-3} , os valores de MO na faixa de 0-25 cm e 0-50 cm foram respectivamente de 32,5 a 65,0 t.ha^{-1} . Num solo argiloso tais valores foram de 137,5 a 275,0 t.ha^{-1} , não diferindo dos valores encontrados em trabalhos anteriores.

Em solos para cana-de-açúcar em São Paulo (Demattê, J.L.I., 2019) verificaram que os teores em solos arenosos permanecem pouco alterados, a despeito das frequentes incorporações de MO oriunda de plantas de cobertura assim como de outros materiais, como vinhaça, torta de filtro etc. Tal autor determinou os teores de MOS nestes solos de valor médio de 0,75% (0,6 a 1,0%), numa densidade de $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$, e na profundidade de 0-25 cm e 0-50 cm, de 18,7 e 37,5 t.ha^{-1} . Numa terra de textura média-arenosa com valor médio de 1,30%, nas mesmas condições

a anterior a quantidade da MO foi respectivamente de 32,5 e 65,0 t.ha⁻¹. Nas terras mais argilosas faixa de 41 a 60% de argila ou superior a este valor, os teores foram respectivamente de 66,2 a 132,4 t.ha⁻¹ e 97,0 a 195,0 ou maior.

A questão que fica pendente é a seguinte: porque não há aumento do teor de MO estabilizada nas terras mais arenosas, apesar de todos os esforços que estão sendo feitos nesse sentido? A explicação em relação a este inconveniente se refere a falta de ligações entre a MOS e os componentes mineralógicos da fração argila. Durante os anos de cultivo de culturas de cobertura e de rotações, a fitomassa formada pelos sistemas radiculares, pelas folhas e palha não têm sido suficientes para aumentar o teor de MOS, pelo contrário, ela é efêmera, tende a ser mineralizada e queimada, liberando nutrientes para a planta e conservando o solo contra erosão (Bayer *et al.* (2006).

Tabela 36 - Classe de solo, densidade, teor de matéria orgânica de São Paulo e CTC.

Classe do solo	Densidade (g/cm ³)	Classe de teor (MO)	MO (g/dm ³)	CTC (mmol/dm ³)
Muito arenoso	>1,60	Muito baixo	0 – 7	0 a 16
Arenoso	1,50 a 1,60	Baixo	>7,0 – 20	>16 a 43
Médio	1,35 a 1,45	Médio	>20 – 40	>43 a 86
Argiloso	1,10 a 1,20	Alto	>40 – 70	>86 a 150
Muito argiloso	1,0 a 0,9	Muito alto	>70	>150

Solos argilosos acricos não estão não estão nesta tabela

Fonte: Prochonow *et al.*, 2018 e Demattê, 2019.

Tabela 37 - Classes de teores de matéria orgânica e CTC.

Classe do solo	Classe de teor (MO)	MO (g/dm ³)	CTC (mmol/dm ³)
Muito arenoso	Muito baixo	0 – 0,7	0 a 1,6
Arenoso	Baixo	>7 – 20	>1,6 a 4,1
Médio	Médio	20 – 40	>4,1 a 8,6
Argiloso	Alto	>40 – 70	>8,6 a 15,0
Muito argiloso	Muito alto	>70	>15,0

Fonte: Adaptada de Ribeiros *et al.*, 1999.

7.18. MUDANÇAS QUÍMICAS NA RIZOSFERA E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

O sistema radicular exerce muitas funções essenciais nas plantas, como absorção de água e nutrientes, fixação do vegetal ao solo, e estabelecimento de interações com os microrganismos. Considerando a absorção de nutrientes, às células da rizosfera apresentam

duas camadas, a parede celular e a membrana plasmática. A parede celular é uma estrutura com alta organização, composta de diferentes polissacarídeos, proteínas e substâncias aromáticas (Figura 25). Tais elementos estão na forma de fibras, gerando cargas negativas (CTC dependente de pH), capacidade de troca de raízes (CTCR), devido à desprotonação dos radicais orgânicos, retendo água, cátions e ânions (pH acidez ativa), que podem ser absorvidos através dos sistemas de absorção, tais como bombas iônicas, transportadores de íons e canais iônicos (Manlio *et al.*, 2018). Por serem constituídas de elementos orgânicos, as fibras podem liberar compostos orgânicos na forma de exsudação ativa, lixiviação passiva, produção de mucilagem e degradação de células, que estimulam a decomposição da MOS (Fageria N. K *et al.*, 2009), auxiliando o teor de MOS.

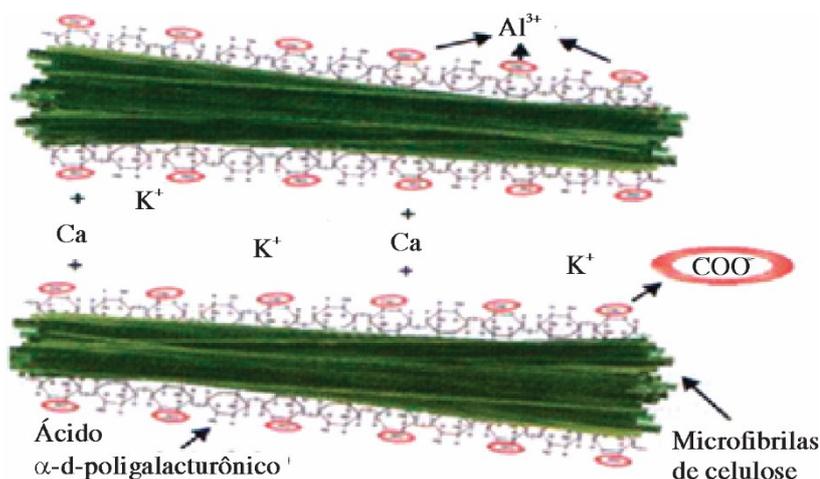


Figura 25 - Estrutura dos blocos de construção das substâncias pécnicas (ácido α -D-poligalacturônico) depositadas nas microfibrilas de celulose da parede celular. **Fonte:** Manlio S. F *et al.* (2018)

Nos moldes atuais de manejo da cultura, nos quais a mecanização tem sido utilizada em larga escala e há disponibilidade de fertilizantes e corretivos a preços razoáveis, não há razão para considerar a conservação da MO estável como um dos principais objetivos do sistema de manejo. De qualquer forma, a cobertura protetora do solo, via manutenção de resíduos vegetais sobre o solo, ou a rotação de culturas, alternando diferentes sistemas radiculares no solo durante as reformas, auxilia na manutenção da MO do solo, principalmente, por reduzir a temperatura, e proteger o solo contra a erosão - esta sim uma consequência nefasta para o ambiente e para a manutenção da produtividade.

CAPÍTULO 8:

Os trabalhos aqui apresentados representam culturas perenes em função da palha.

8.1. A PALHA NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Os trabalhos com palha na cana-de-açúcar foram feitos pela Copersucar e publicado por Oliveira M.W *et al.* (1999). Os resultados indicam que em relação a Matéria Seca (MS), houve decréscimo de 20% de redução, indicando que a palha da cana-de-açúcar é mais resistente do que as palhas de culturas anuais, haja vista a relação C/N de valor elevado permanecendo na faixa de 68%. Os nutrientes ocupam áreas diferentes da MS. Assim é que o N se encontra na celulose e lignina, enquanto o K na Hemicelulose e Conteúdo Celular. A mineralização destes nutrientes indicam ser o N, em t/ha, reduzido de 64 para 54 t/ha com 17% indicando que há imobilização deste nutriente devido a palha. A mineralização do K, Ca e Mg em relação ao total contido na palhada foi de 85%, 44% e 39% respectivamente. Destes nutrientes o potássio é o mais liberado, sendo que o cálcio e magnésio são liberados em quantidades menores. O enxofre foi mineralizado 11,1% e a matéria orgânica na forma de carbono orgânico foi reduzido em 41%. O fósforo praticamente não se alterou de maneira semelhante à celulose e à lignina. Houve reduções significativas na hemicelulose e no conteúdo celular (Tabela 41).

Tabela 38 - Matéria Seca (MS) da palha da variedade SP 79 – 1011, nutrientes e carboidratos estruturais contidos nas amostras de 1996 e 1997.

Ano	MS	N	P	K	Ca	Mg	S	C	Hemicelulose	Celulose	Lignina	Conteúdo celular	C/N
	(t/ha ⁻¹)	kg há ⁻¹											
1996	13,9	6 4	6,6	66 a	25 a	13 a	9	6.255 a	3.747 a	5.376	1.043	3.727 a	97 a
1997	10,8	5 3	6,6	10 b	14 b	8 b	8	3.642 b	943 b	5.619	1.053	2.961 b	68 b

Médias seguidas da mesma letra não definem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, o nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Oliveira et al. 1999.

De maneira geral, após o primeiro corte de cana sem queima, tem ficado sobre a superfície do solo em torno de 12 a 20 t/ha/ano de matéria seca, o que daria um total de nutrientes de acordo com a Tabela 42.

Tabela 39 - Quantidade de nutrientes na palhada de primeiro corte de 12 a 20 t/ha.

Nutrientes	Kg/ha
N	54,7
P	4,4
K	76,0
Ca	54,9
Mg	25,5
S	15,1

Fonte: Oliveira et al. (1999)

Numa primeira análise pode-se pensar em substituir nas adubações em cana-de-açúcar sendo 50% de N e Ca^{2+} , 76% de K. Entretanto, tais nutrientes necessitam ser liberados pela mineralização através da ação dos microrganismos, que é lenta, e depende das condições climáticas das regiões não sendo semelhante para todos os nutrientes. A mineralização do N da palhada foi pequena (18%) e sendo assim é inevitável a imobilização do N, porém a grande mineralização do potássio com 76% fez com que as usinas alterassem as formulações de soqueira passando para uma fórmula de 20 ou 25 de N e as mesmas quantidades para o potássio em K_2O . As demais formulações são semelhantes as canas sem palha, inclusive as de plantio (Penatti, C.P, 2013).

8.2. FONTES NITROGENADAS NAS SOQUEIRAS COM PALHA

A palha da cana-de-açúcar é mais resistente às intempéries do solo e, portanto, necessita de auxílio como fontes de nitrogênio, assim como nas soqueiras.

Atualmente a aplicação de fontes nitrogenadas nas soqueiras sobre a palha da cana-de-açúcar tem sido uma constante devido à dificuldade de incorporação sob a palha. Aplicando sobre a palhada tende a promover a imobilização temporária do nitrogênio devido a elevada relação C/N da palha. Dependendo da fonte aplicada há maiores riscos de perdas por volatilização do N amoniacal. Os dados da literatura são unânimes em demonstrar que a aplicação da ureia na superfície as perdas de N são substanciais, nas faixas de 40 a 60%. Tais perdas podem ser reduzidas com umidade através das chuvas ou da vinhaça (subproduto da indústria açucareira). Entretanto, a safra em SP vai de abril a dezembro, sendo que 75% dela ocorre no período seco vindo assim viabilizando a vinhaça.

Nas usinas assim como a Copersucar e o CENA em Piracicaba (SP), e o IAC em Campinas tem feitos trabalhos que tendem a reduzir as perdas de nitrogênio utilizando a Ureia, Vinhaça, a Torta de Fintro, o Uran, o Nitrato de Amônia, com incorporação e sem incorporação do fertilizante. Neste experimento (Vitti, A, C, et al 2005), safra 95/96 notou-se que a aplicação de ureia na faixa de 50 a 100 kg/ha na vinhaça sobre a palha de cana-de-açúcar foi o que mais perdeu em termos de N por volatilização atingiram um máximo após 5 dias de aplicação (16 kg de N/ha). Entretanto quando incorporado a ureia ao solo as perdas foram negligíveis. O sulfato de amônia (porém o mais caro) foi o mais estável ao longo do experimento tanto na superfície como enterrado.

Em outro experimento, na safra 96/97, os pesquisadores aplicaram o uran como fonte de N na vinhaça para verificarem se a mistura viabilizaria o uso da vinhaça. Tais autores pesquisaram os efeitos do Uran sobre o solo e sobre a palha, com e sem vinhaça. A vinhaça foi aplicada com 100 m³/ha concentrada, com teor de K₂O de 2,60/m³ e o Uran com 100 kg/ha. Os tratamentos foram os seguintes: VSP: Vinhaça sobre a palha; V + USP: Vinhaça + uran sobre a palha; VSS: Vinhaça sobre o solo; V + USS: Vinhaça + uran sobre o solo; V+ UES: Vinhaça + uran enterrado sob o solo.

Em solo de textura média arenosa, tais autores verificaram que houve maior perda de nitrogênio por volatilização no tratamento com 100m³/ha de vinhaça + uran aplicado sobre o solo sem palha (V + USS), chegando a 18 kg de N/ha oriundos dos 100 kg de N/ha do fertilizante após 15 dias de aplicação do fertilizante (Figura 26).

No tratamento Uran + vinhaça sobre a palha as perdas estavam na faixa de 12 kg de N/ha. A Figura 26 mostra os resultados da volatilização de amônia procedentes da vinhaça e do Uran sendo que o melhor tratamento seria a Vinhaça + Uran enterrado no solo com perda de 2,0 kg/ha de N proveniente do Uran após 15 dias de aplicação. Entretanto, as perdas de N por volatilização estão diretamente ligadas as condições climáticas e nas aplicações superficiais.

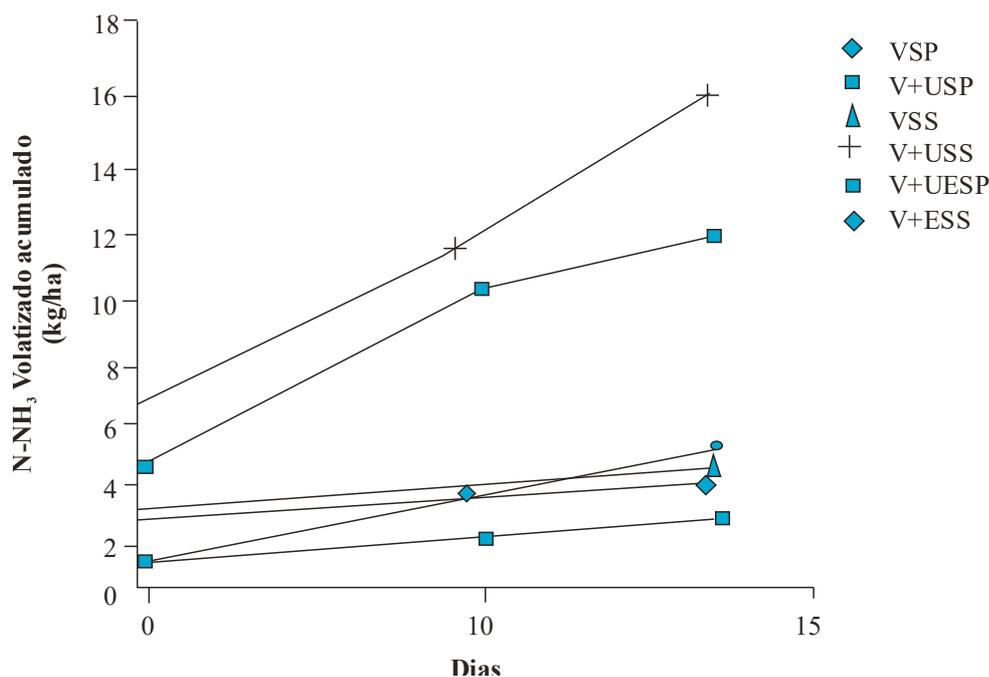


Figura 26 - Volatilização de amônia (N-NH₃) acumulado (kg/ha) em três épocas após a aplicação de vinhaça e uran. **Fonte:** Vitti, A, C, et al 2005

8.3. CULTIVO DE SOQUEIRA COM PALHA

No caso da palha nas soqueiras há necessidade de se aplicar o fertilizante (NK ou NPK), assim como os demais componentes do cultivo sobre a linha da cultura. Em experimentos de longa duração, em diversos solos (Tabela 43) nas Usinas São Martinho, Santa Luiza, São Francisco AB, da Pedra em SP os resultados indicam que a aplicação do fertilizante, sem cultivo e com adubo, a produtividade tem sido maior com 88 t/ha em 13 experimentos, sendo que o tratamento com cultivo e com fertilizante a produtividade tem sido ligeiramente inferior, com 85 t/ha. Portanto a tendência seria a de não cultivo com fertilizante porque o cultivo tende a danificar as raízes (Penatti, C.P 2013).

Tabela 40 - Número de experimentos e média por tratamentos em cultivo com palha.

Tratamentos	Nº de experimentos	Média por tratamento
		t/ha
Sem cultivo e sem adubo	7	76
Com cultivo e sem adubo	4	75
Com cultivo e com adubo	16	85
Sem cultivo e com adubo	13	88

Fonte: Penatti, 2013.

Na opção de se usar nematicida ou inseticida nas socas há obrigatoriedade de incorporação do produto ao lado da soqueira ou cortando a soqueira. A colocação destes produtos na superfície, sem incorporação, é perigosa para a área ambiental.

Em regiões onde a brotação de soqueira é afetada pela palha, a remoção na linha de cana-de-açúcar e a incorporação, favorece o aumento de produção.

Na Figura 27 (Demattê, JLI et al. 2015) ilustram os seguintes: modelo de sulcação alternada (item A); sulcação alternada, com remoção de palha na entre linha de 0-90 cm (item B); modelo de cultivador utilizada na palha (item C); e aplicação de corretivos (item D). Em sulco alternado (1,50/0,90 cm) a palha é removida do sulco de 0,90 m e o adubo é incorporado, e na linha de 1,50 m seria reservada para a palha e o tráfego.

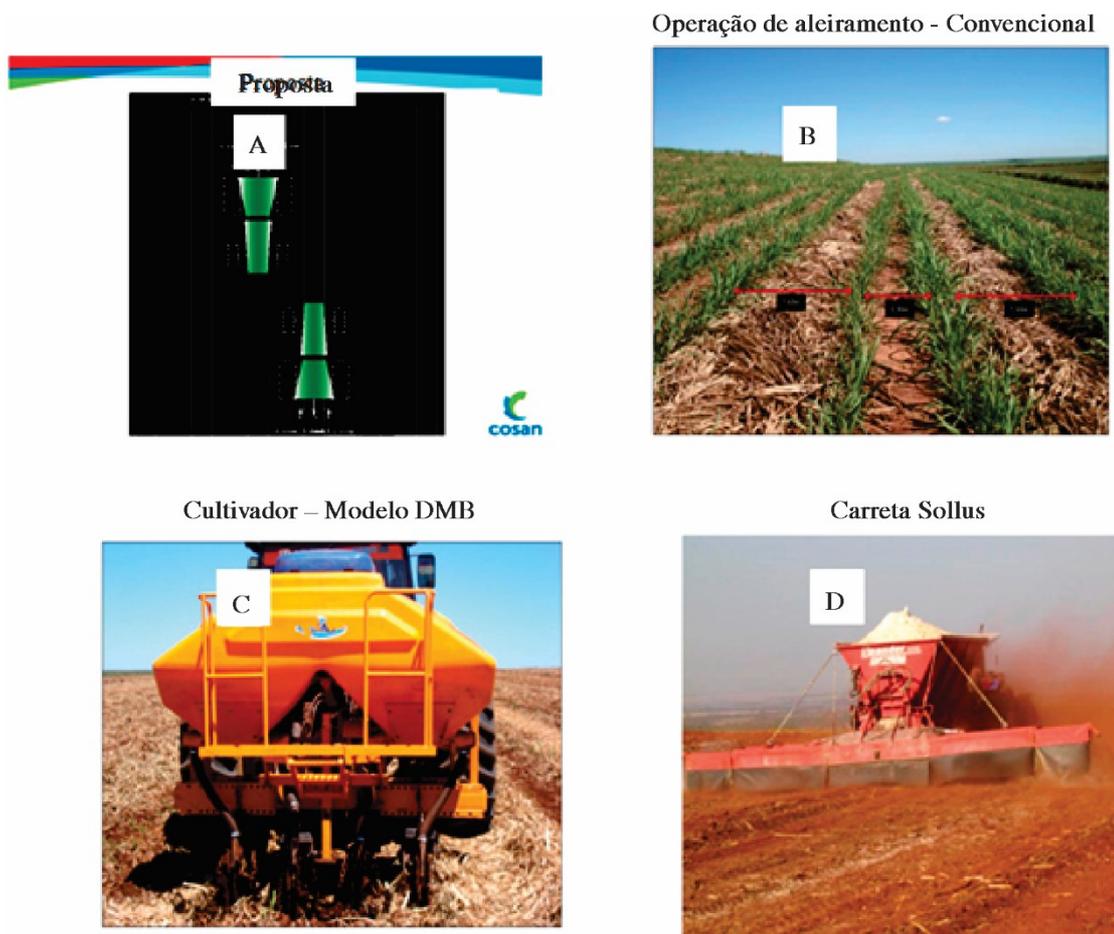


Figura 27 - A: esquema do sulco alternado. B: retirada da palha da linha de 0,90 cm. C: Implemento para aplicar o NK com palha no alternado. Aplicação de corretivo em soqueira. Fonte: Demattê, JLI et al (2015).

Em Barra Bonita, SP foi realizado um experimento relacionado a palha em soqueira na safra em 2000/2001 num solo arenoso, em terceiro corte com a variedade RB835089. Os tratamentos foram de 100% de palha sobre a soqueira e removendo a palha da linha de cana, a fonte nitrogenada foi a ureia na faixa de 182 kg/ha e a vinhaça com 100 m³/ha e o composto (2 partes de TF + 1,0 de cinzas) com 20 t/ha com 60% de umidade. Foi utilizado a vinhaça e o composto como componentes que podem mineralizar a palha assim como o nitrogênio.

Os resultados se verificaram que não há diferença entre as áreas com e sem palha na linha de cana sendo, que a redução da evaporação devido a palha favoreceu o aumento da produção para os tratamentos.

8.4. INCONVENIENTES DO PREPARO REDUZIDO EM CANA-DE-AÇÚCAR

Em meados da década de 80 teve início principalmente no Estado de São Paulo o preparo reduzido, nesta cultura, perdurando até os primeiros anos da década de 90, quando foi praticamente abandonado. As principais causas constatadas na época para a redução deste tipo de atividade foram a queda de produtividade, a não adequada correção química, ao aumento de pragas de solos, na escolha inadequadas de variedades etc. (Morelli, J. et al.1987).

Entretanto, atualmente com o advento de novas tecnologias, inseticidas e nematicidas mais eficientes tais sistema tende a ser novamente utilizado, com sensíveis vantagens para a área ambiental.

Quanto no manejo dos fertilizantes se refere a usar as exigências nutricionais para produzir a produtividade esperada, e proceder a dedução do estoque do solo. Atualmente com o advento do sistema canteirizado e o GPS o sistema de preparo do solo tem-se desenvolvido no sentido de reduzir a compactação.

8.5. NUTRIENTES MÓVEIS E IMÓVEIS NOS SOLOS

Quanto a sua capacidade de se movimentar no solo, independente se a textura for argilosa ou arenosa, os nutrientes podem ser agrupados em “móveis, “imóveis” e “demais nutrientes”

- **Nutrientes móveis:** são aqueles fracamente retidos pelo solo como os ânions não específicos, movendo-se quase que livremente através do perfil do solo, arrastados pelo movimento ascendente ou descendente da água. O nitrogênio (NO_3^-) e o cloro (Cl^-) são os principais representantes deste grupo. Os ânions ao se movimentarem no solo, são seguidos pelos cátions acompanhantes e que podem enriquecer a subsuperfície ou se perderem.

- **Nutrientes “imóveis”:** são aqueles que reagem com os coloides dos solos, e que podem permanecer como trocáveis. Alguns destes nutrientes podem reagir com o solo, formando compostos menos solúveis assim como o próprio fertilizante aplicado. Neste grupo destacam-se os ânions específicos tais como o fósforo (H_2PO_4^-), o sulfato (SO_4^{2-}), o manganês e o zinco contendo fixação semelhante ao fosforo.

- **Demais nutrientes:** os cátions como cálcio, magnésio e o potássio reagem com a superfície dos coloides e podem ser retidos com maior intensidade como Ca^{2+} e Mg^{2+} ou menor intensidade como o K^+ dependendo da distância da superfície de troca do solo. Por outro lado, dependendo da concentração de sulfatos na superfície ou ânions não específicos, tais cátions podem ser translocados em profundidade como cátions acompanhantes e enriquecer a subsuperfície ou se perderem por lixiviação.

8.6. MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGÊNIO EM SUCESSÃO CONTÍNUA EM CULTURAS ANUAIS EM PD E CONVENCIONAL

Muzilli em 1980 citado por Sample E.C et al 1980, trabalhando no Paraná com dois solos até a profundidade de 30 cm (divididos em 5 cm) resumiu os teores de matéria orgânica decomponível em solos cultivados com PD e convencional (PC) numa sucessão de culturas. As culturas foram: trigo em sucessão contínua com soja (S/T/S), trigo em sucessão contínua com milho (M/T/M) e trigo em sucessão alternada com soja e milho (S/T/M) após 4 e 3 anos. Verificou que os teores de M.O. do solo não diferem entre os dois sistemas testados nas sucessões de cultivos.

Tal autor trabalhando nos mesmos solos, porém com N nas folhas observou que na cultura do milho e numa safra mais seca, safra 77/78, a deficiência é notada pela maior quantidade de N na folha no PD. Nas demais safras observa-se que a demanda de N foi menor no PD que no PC. Essa menor demanda em N pela cultura no P.D. é explicada pelo fato de que, havendo mais umidade presente no solo, existe maior movimento descendente da água,

acarretando maior lixiviação de nitratos, além do que serem a velocidade e o grau de mineralização da matéria orgânica ser maior em PD. No caso do trigo as demandas de N são maiores no plantio convencional (PC). A prevalecer tais condições em relação ao N e em PD, a demanda de N pelas culturas em P.D. tende a aumentar com o decorrer do tempo, havendo indicações de aumento de 20 a 30% de N no P.D. para culturas como o trigo que é havido pelo nitrogênio.

8.6.1. Demanda de Fósforo em PD

Tal autor verificou que acumulações superficiais (0-10 cm) de P solúvel nas culturas estabelecidas no trabalho original de MO e N em cultivos anuais e sucessivos, se mostram sensivelmente mais altas, faixa de 50 a 70%, em P.D, sobretudo nos primeiros 10 cm da camada arável. A explicação neste caso estaria no maior contato do fertilizante com o solo no plantio convencional (PC). A maior disponibilidade do P solúvel em P.D. evidencia possibilidade de redução na quantidade de fertilizante uma vez atingido o limite crítico de P no solo. Há autores que dependendo do teor de P no solo recomendar redução em até 50% no fertilizante.

8.7. TEORES DE K, Ca e Mg E EFEITOS DA ACIDIFICAÇÃO

Tem-se verificado na literatura de maneira geral que no P.D. há maior concentração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ do que no sistema convencional (SC) na camada superficial, apesar de haver trabalhos indicando semelhança na distribuição destes nutrientes. No trabalho de Musilli, (1980) citados por Moreira S.J. em 2019 em cultivos anuais, verificou-se que o Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e nos valores médios até 30 cm de solo não há diferenças entre os tipos de plantio, a não ser na primeira camada de solos (0-5 cm) e no tipo de rotação de culturas. No caso destes nutrientes e nos solos do Paraná são ligeiramente mais elevados no PD na profundidade 0-30 cm, reduzindo os efeitos na acidificação.

CAPÍTULO 9: PROPRIEDADES QUÍMICAS RELEVANTES

9.1. PROPRIEDADES DA ÁGUA

As diversas reações relacionadas a água se devem a sua estrutura. Sua molécula é um composto simples, formado por um átomo de oxigênio e dois átomos de hidrogênio, alinhado em torno do oxigênio em forma de “V” com um ângulo de 105° gerando uma polaridade positiva e negativa. Ela possui diversas formas. Na forma sólida, com moléculas mais unidas, maior densidade, temperatura de 0°C ou menor; na forma líquido, com as moléculas menos unidas, temperatura faixa maior que 0°C a 100°C ; forma gasosa, moléculas de água separadas, temperatura maior que 100°C ; forma de plasma, temperaturas imensuráveis, dissociada com átomos de hidrogênio e oxigênio livremente.

No solo a água é atraída por forças eletrostáticas da superfície negativa (ou positiva) dos coloides. Na polimerização da água ou formação de uma rede de moléculas de água, um hidrogênio é atraído pelo oxigênio vizinho de outra molécula, fazendo com uma “ponte de hidrogênio”, de ligações de baixa energia, entre duas moléculas de água. Tal ligação explica duas forças básicas nos solos, tanto de atração como num coloide (adesão ou adsorção) assim como de movimentação da água (coesão), de acordo com a Figura 28.

Neste meio de água, tanto cátions como ânions, circulam como um verdadeiro enxame de abelhas. Cátions como H^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} se hidratam e se ligam por meio de sua atração pelo lado negativo da molécula de água e os ânions pelo lado positivo da água.

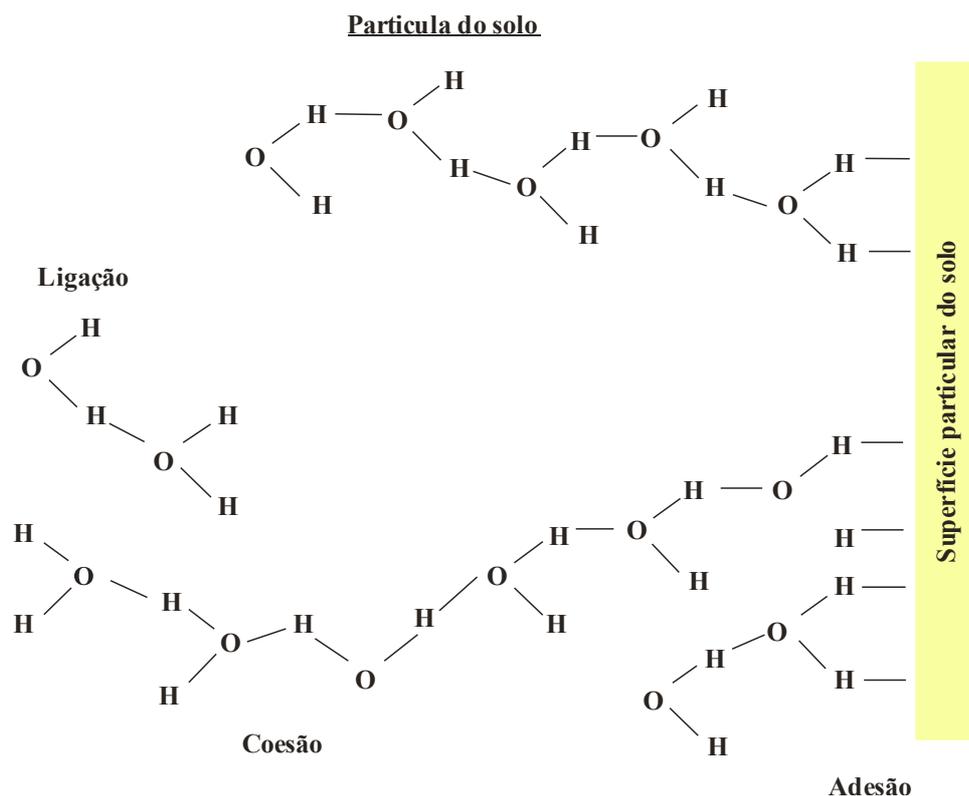


Figura 28 - Partícula carregada com cargas negativas do solo e ligações com moléculas de água com a polaridade indicando forças de coesão e adesão. **Fonte:** Brady, C. N. & Weil, R. R., 2013.

9.2. O pH DA SOLUÇÃO DO SOLO

Quimicamente os ácidos se dissociam em solução liberando prótons (H^+), em contraste com as bases que recebem tais prótons. Num solo o sistema é aquoso, portanto, o uso das atividades de hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-) são comuns. A dissociação de um ácido forte é total e ácidos fracos dissociam muito pouco. Adicionando $Ca(OH)_2$ numa solução em solo neutro haverá mais OH^- do que H^+ portanto o solo será alcalino. Da mesma maneira se for adicionado HCl a um solo neutro, o solo conterà mais H^+ do que OH^- , e o solo se tornara ácido. Nos solos domina a dissociação de ácidos fracos e ocorrem em concentrações muito baixa de íons hidrogênio e, portanto, seria inconveniente usar uma designação numérica para tal fato, seria utilizado o conceito numa escala logarítma.

Numa solução contendo $0,00001 \text{ mol/L}$ de H^+ teria na escala logarítmica um valor $-\log(H^+) = \log 1/(H^+) = \log 1/0,00005$

O inverso desta expressão seria o pH de 5,0.

Num pH de 7,0 tem-se uma concentração de 0,0000001 ou 10^{-7} gramas de hidrogênio/L de solução ou $\text{pH} = \log 1/0,000.0001 = \log 10.000.000 = 7$ ou $\text{pH} = 7,0$

Numa escala logaritma, no caso de solos, a cada redução de unidade de pH, o H^+ aumenta de 10 vezes em concentração. Portanto, num pH de 5,0 seria 10 vezes mais ácido do que um pH 6,0 e 100 vezes mais ácido do que um pH 7,0.

A escala da água varia de 0 a 14, com o qual valores abaixo de 7,0 corresponde acidez e acima deste valor indica alcalinidade. Nos solos a variação estaria entre 3,5 a 8,5 ou mais frequente de 4,0 a 8,0. Variações de pH inferiores a 3,5 ocorre em solos encharcados e superiores a 8,5 somente em regiões áridas e ricas em sais (Brady, C. N. & Weil, R. R., 2013).

A expressão de pH é também utilizada para a constante de equilíbrio. A dissociação da água seria a expressão seguinte:



9.3. A CONSTRUÇÃO DA FERTILIDADE DOS SOLOS

A construção da fertilidade do solo é iniciada pelo aumento do pH na faixa de valores de 6,0 a 6,5 e saturação de bases correspondendo estes valores de pH, complementando com os demais nutrientes e corretivos. Entretanto, o conhecimento da cultura é fator principal neste assunto (Malavolta E 1985). Neste aspecto há necessidade de se verificar o tipo de cultura e para a grande maioria, primeiro se recupera o solo através de fertilizantes, corretivos, matéria orgânica etc. e posteriormente a cultura. Para o eucalipto o solo seria um substrato, havendo a necessidade de se fertilizar a planta e não o solo. São pontos de vista diferentes que devem ser respeitados (Gonçalves J. L. M. et al., 2019).

9.4. DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E O pH

A disponibilidade de nutrientes é influenciada pelo pH do solo e foi desenvolvido em trabalho clássico por dois autores americanos (Arnon e Johnson) citados por Quaggio (2000), porque trabalharam com tomateiro, alface e grama bermudas. No trabalho original tais autores verificaram que a produção máxima foi observada com pH entre 6 e 7. Na literatura

internacional foi observado que a maioria das culturas apresentavam uma produtividade máxima na faixa de 6,0 a 6,5 de pH. Munido dos resultados Malavolta E (1985) divulgou as relações de pH e absorção de nutrientes, tornando o trabalho clássico

Em resumo, a forma como o pH possa influir na disponibilidade dos nutrientes está indicado na Figura 29.

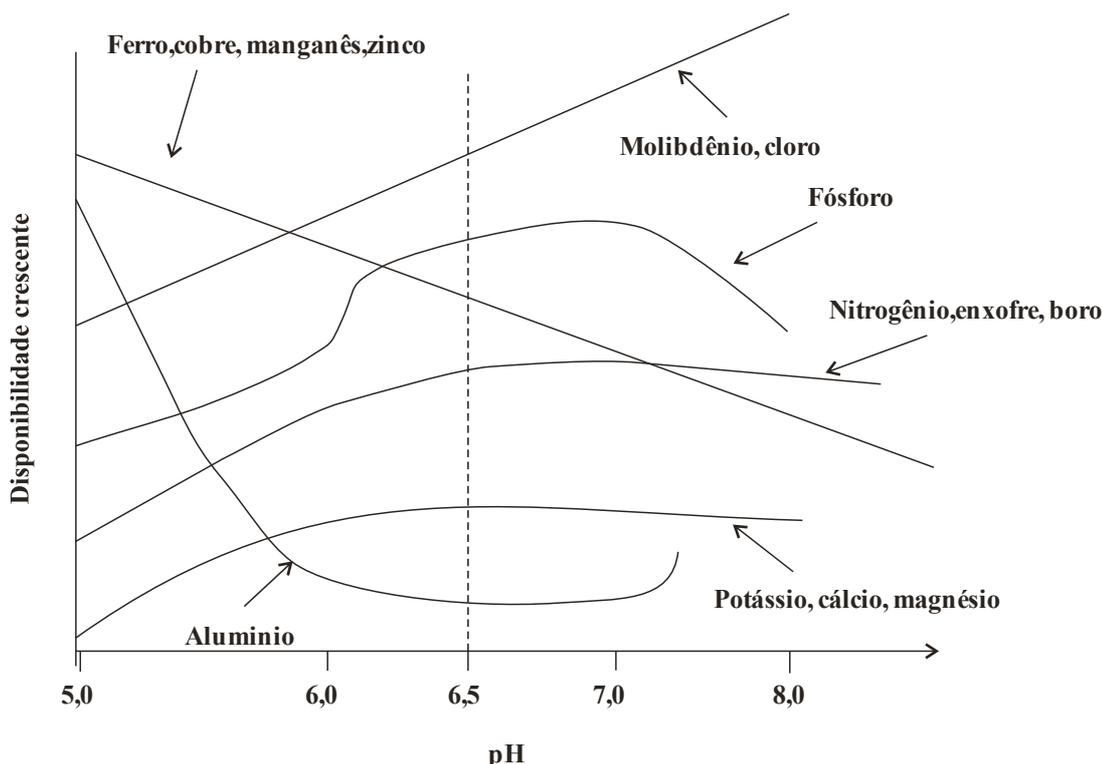


Figura 29 - Relação entre pH e a disponibilidade de nutrientes no solo. **Fonte:** Malavolta E., 1985

- **Nitrogênio:** a disponibilidade aumenta graças aos efeitos favoráveis da mineralização da matéria orgânica, com pH na faixa de 6,0 a 7,0. Por sua vez o enxofre na forma de SO_4^{2-} é adsorvido pelas formas de minerais de Fe e Al (oxihidróxidos) e liberados à medida que o pH se eleva. O Boro, micronutriente, tem sua base de absorção com as faixas máximas de pH entre 6,0 e 7,5.

- **Fósforo:** a disponibilidade deste nutriente aumenta com valor máximo entre 6,0 e 7,5 diminuindo logo em seguida num pH superior a 7,5 devido a redução da acidez e aumento de OH^- na solução do solo. A Figura 30 ilustra o percentual de eficiência do fósforo na faixa de pH de 4,5 a 9,0. Note que a eficiência aumenta de 23% a um pH de 4,5, sempre crescente até

a faixa de 95 a 100% nuns valores de pH de 6,5 a 7,0. Tal eficiência decresce a seguir com 70% a um pH de 7,5 para 30% a um pH de 8,0 culminando com uma eficiência de 5% num pH de 9,0.

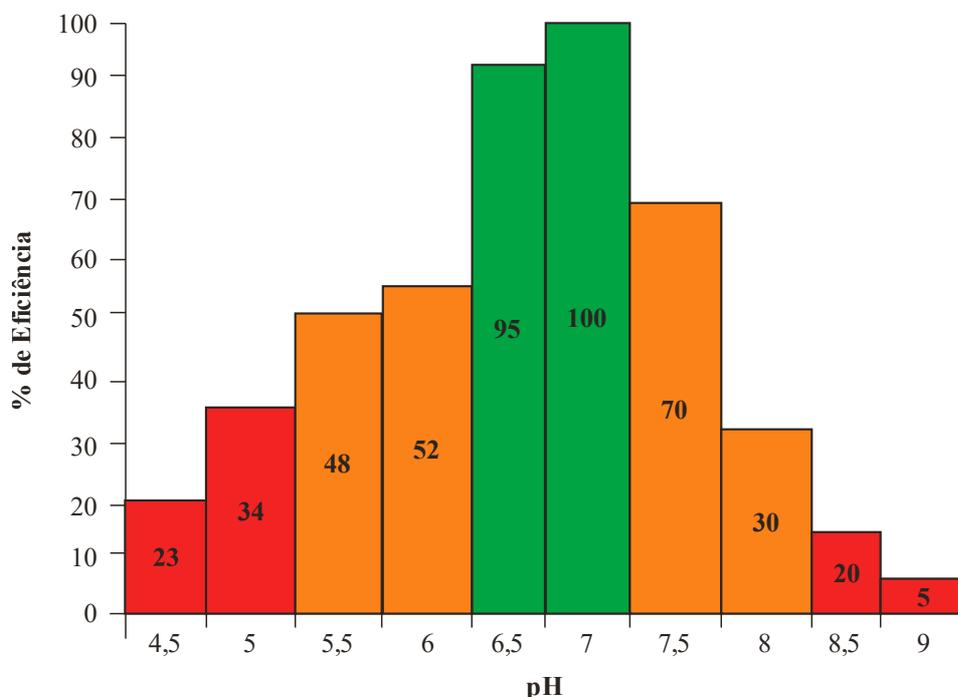


Figura 30 - Eficiência do fósforo em função do pH do solo.

- **Potássio, cálcio e magnésio:** a disponibilidade destes nutrientes aumenta até um pH de 5,5 e a partir daí os valores permanecem constante em relação ao eixo dos X até um valor máximo de pH 8,0 ou mais.

- **Ferro, manganês, cobre e zinco:** os micronutrientes positivos apresentam disponibilidade decrescentes à medida que aumenta o pH. Entretanto, observando-se o gráfico, nota-se que estes nutrientes apresentam disponibilidade na faixa de 60% num pH entorno de 6,5 suficiente para a grande parte das culturas.

- **Molibdênio e cloro:** o íon MoO_4^{2-} é fortemente adsorvido pelo oxihidróxido de Fe e Al, porém é deslocado pelo OH^- à medida que o pH sobe. A mesma tendência do cloro, se bem que este micronutriente é fracamente adsorvido nos oxihidróxido de ferro e alumínio.

No caso do íon alumínio, elemento nocivo para a maioria das culturas, este constituinte do solo é precipitado na faixa de pH entre 5,5 a 5,7. Assim é que as correções químicas dos

solos devem estar nesta faixa de pH para que haja uma maior eficiência de aproveitamento dos nutrientes pelas plantas.

Em relação ao silício (Si) ele é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, porém não é considerado um nutriente essencial as plantas. No solo ele é apresentado como ácido monossilícico, de formulação H_4SiO_4 , constituídos pelos minerais silicatados, compostas por formas amorfas, sílica biogênica oriunda da matéria orgânica do solo, silício adsorvido ou precipitado com óxidos de Fe, Al, Mn sendo função do pH do solo. As plantas absorvem silício da solução do solo e chegam ao sistema radicular por difusão e fluxo de massa.

Na planta ele é absorvido pela bomba de H^+ -ATPase (Fernandes, M.S. et al 2018). No interior da planta ele é conduzido pelas enzimas específicas até a parte aérea das folhas depositada na forma de sílica amorfa, opala principalmente nas folhas de cana-de-açúcar. E utilizado principalmente no controle de doenças, tornando a planta mais resistente aos ataques de fungos e bactérias, como no arroz.

Tem sido utilizado em diversas culturas, como silicatos, inclusive em cana-de-açúcar, devido ao fato de que eles apresentam componentes de alteração de pH, porém nas produções de cana planta e soqueiras o calcário teve o mesmo desempenho na produtividade. Apesar de solos arenosos contendo elevado teor de areia, no caso quartzo (SiO_2), é indecomponível quimicamente e, portanto, o silicato deve ser utilizado em solo arenoso.

Como visto o solo deve estar adequadamente corrigido em termos de pH tanto na superfície e se possível na subsuperfície. A correção do pH e conseqüentemente da saturação das bases é feita com o calcário, apesar da matéria orgânica (menos eficientes), silicatos, termofosfato terem também tais efeitos de correção do pH. Na subsuperfície dos solos muito intemperizados o gesso (Sousa, D.M.G et al,2005) é um produto utilizado para recuperação da fertilidade com efeitos positivos principalmente em culturas semi perenes e perenes e menos visíveis em culturas anuais. Em relação as culturas anuais o efeito do gesso é questionável justamente pelo fato de tais culturas apresentam um ciclo curto de 3 a 5 meses, porém há na literatura efeitos positivos do gesso nestas culturas.

9.5. SOLUÇÃO DO SOLO

Uma série de pesquisadores salienta que a fração coloidal do solo mais a fotossíntese seria a fonte de vida na Terra. Talvez eles tenham razão, quem sabe. Entretanto, a Fração

Coloidal do Solo apresenta umas inúmeras características que fica difícil não acreditar nestas afirmações. Assim, vejamos.

9.6. POROSIDADE DO SOLO

O solo pode ser definido com 50% de sólidos, incluindo a matéria orgânica e 50% de porosidade. A porosidade do solo pode estar suprida na sua totalidade com água ou com ar, e dependendo das condições de clima será dominado pela água, entretanto se o período for seco, o ar será dominante no solo (Figura 31).

Porém tal água não é pura pois apresenta uma solução contendo solutos importantes para a planta, como cátions e ânions, compostos orgânicos dissolvidos assim como elementos tóxicos e indesejáveis, fornecidos pelo próprio solo ou através do sistema de manejo (Brady, C.N. e Weil, R. R, 2013).

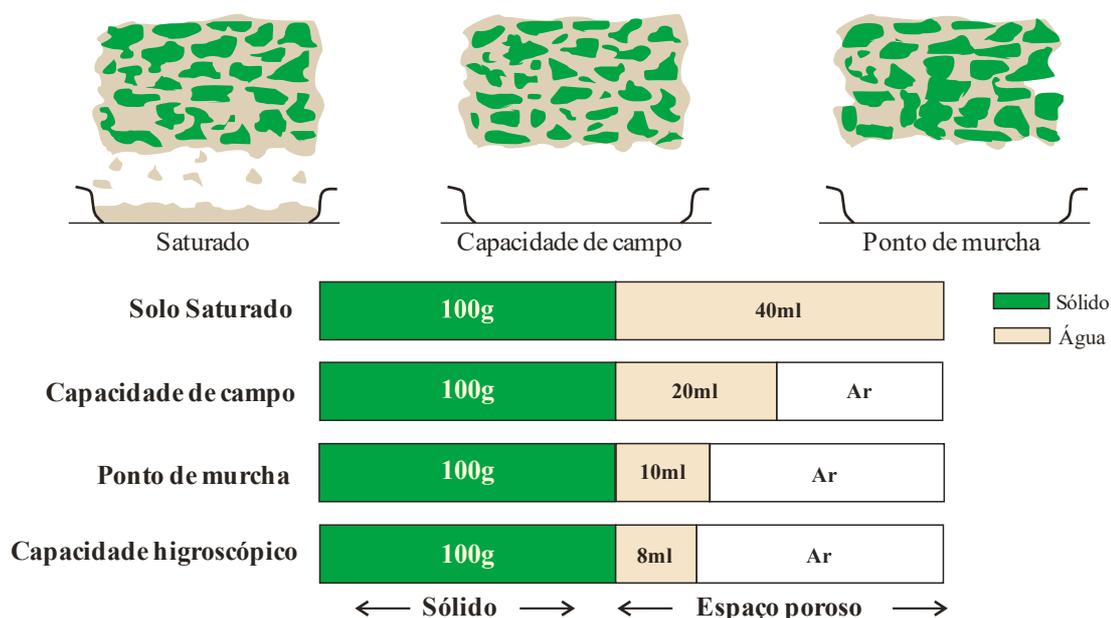


Figura 31 - Esquema ilustrando o solo com 50% da fração sólida e 50% da porosidade em água e ar de acordo com as condições climáticas. **Fonte:** Brady, C.N. e Weil, R. R (2013)

Porém, o sistema radicular das plantas absorve tanto um como outro. Os produtos na solução do solo são supridos pela superfície do coloide do solo (íons trocáveis) havendo um equilíbrio entre os íons trocáveis e íons em solução. A solução do solo constituído por íons e

água, é influenciada pelo teor de umidade do solo, e conseqüentemente, agindo sobre a própria solução.

9.7. DUPLA CAMADA DIFUSA (DCD)

Indica como cátions e ânions podem coexistir num solo. Os cátions bivalentes devido à proximidade com o centro de carga do solo apresentam maior quantidade comparada com os cátions monovalentes e ânions que ficam mais distantes do centro de carga (Figura 32). No caso de ânions a situação é diferente dos cátions onde eles estão mais distantes do centro de cargas (Novais, R.F., Mello, J.W.V. 2007).

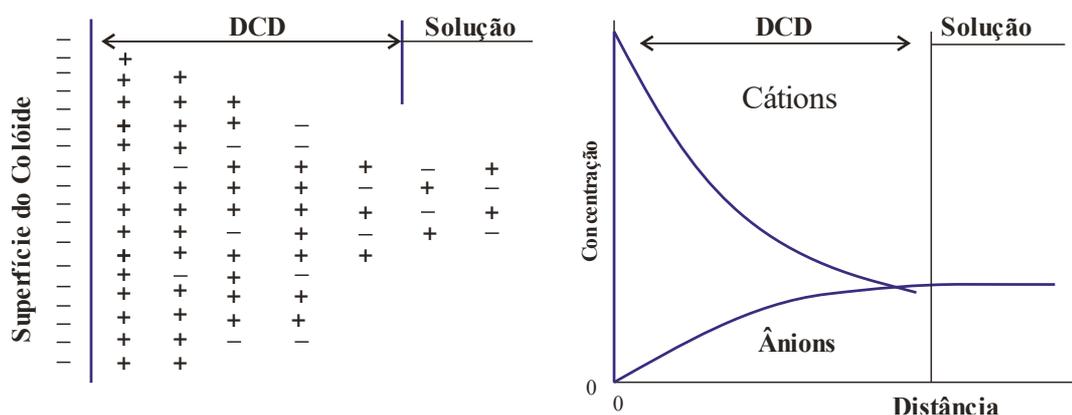


Figura 32 - Distribuição de íons a partir da superfície de colóide eletronegativo, de acordo com o conceito de dupla camada difusa. **Fonte:** Novais, R.F., Mello, J.W.V. 2007.

9.7.1. Espessura da Dupla Camada

Neste sistema a solução pode encolher ou pode esticar dependendo da quantidade de umidade do solo, alterando a relação de volumes do solo e da água. Na Tabela 44 a espessura da dupla camada de um colóide do solo, em Angstrom, indica que os íons bivalentes estão mais próximos na superfície de carga do colóide e os monovalentes mais distantes do colóide. A espessura da dupla camada decresce com a raiz quadrada da concentração salina e diretamente com o aumento da valência do cátion trocável (Bohn, H *et al.* 1979).

Tabela 41 - Espessura aproximada da Dupla Camada de um coloide do solo em função da concentração eletrolítica.

Concentração de cátions em solução verdadeira (normalidade)	Espessura da dupla camada, Angstrom.	
	Cátions monovalentes	Cátions bivalentes
10^{-5}	1000 A (1,0 mm)	500 A (0,5 mm)
10^{-3}	100 A (0,1 mm)	50 A (0,05 mm)
10^{-1}	10 A (0,01 mm)	5 A (0,005 mm)

Fonte: Soil Chemistry, 1979. Bohn, McNeal, O'Connor. Pg 144. Modificado.

9.8. SOLUÇÃO DO SOLO E A QUANTIDADE DE ÍONS

Na solução do solo a quantidade de íons é pequena, inferior a 10,00 mmol/L (Novais & Mello, 2007), em comparação com os íons trocáveis do solo, sendo, portanto, muito difícil para a sua determinação num laboratório de rotina.

Apesar desta situação Meurer E.J. Anghinoni, I (2000), trabalhando com solo do Rio Grande do Sul e num sistema para comparação de preparo direto (PD) e preparo convencional do solo (PC), obteve os seguintes valores na solução do solo indicados na Tabela 45. Verifique que em relação aos totais, o sistema de PD suplanta em muito o sistema de plantio convencional (PC), indicando que a matéria orgânica representada por carbono dissolvido tem sido bem maior no PD onde estaria aí a grande diferença nos sistemas de preparo do solo.

Tabela 42 - Valores de pH e composição da solução de uma amostra de LV distrófico típico do Estado do Rio Grande do Sul submetido ao plantio direto e convencional.

Sistema de cultivo	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Al ³⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Total	COD
		mmol/L									
Plantio direto	5,4	1	0,6	0,8	0,2	0,55	0,14	1,5	0,0039	10,194	4,4
Plantio convencional	5,5	0,5	0,3	0,4	0,17	0,16	0,1	0,45	0,0026	7,673	2

Fonte: Meurer e Anghinoni (2000).

Legenda:

LV= Latossolo Vermelho;

COD= carbono orgânico dissolvido.

Por outro lado, há necessidade de serem verificados os mais importantes íons na solução do solo que estão indicados na Tabela 46.

Em solos intemperizados, ácidos, na solução do solo predominam o Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e o Al³⁺. Num solo menos ácido, num clima semi-árido, com pH faixa de 8,0 a 8,5, há considerável sais em solução e o surgimento do ânion carbonato (HCO³⁻) além de teores elevados de Na⁺ SO₄²⁻ e Cl⁻ são comuns. O hidrogênio tem um comportamento atípico se destacando no papel

de acidez na reação do solo assim como em grandes números de compostos e reações. No caso do alumínio, constituindo com as ligações entre si, formando polímeros, é o mais importante em relação a toxidez do sistema radicular em solos ácidos de baixa CTC dependente do pH Meurer E.J.& Anghinoni, I (2000).

Tabela 43 - Principais elementos na solução do solo.

Elementos	Íons
Potássio	K^+
Cálcio	Ca^{2+}
Magnésio	Mg^{2+}
Enxofre na forma de sulfato	SO_4^{2-}
Hidrogênio	H^+
Cloro na forma de cloreto	Cl^-
Alumínio	Al^{3+}
Sódio	Na^+
Carbono	HCO_3^-
Nitrogênio (Nitrito, nitrato, amônio)	NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+
Fósforo (di hidrogênio fostato)	$H_2PO_4^-$
Fósforo (mono-hidrogênio fostato)	HPO_4^{2-}

Fonte: Meurer E.J.& Anghinoni, I (2000).

9.9. ADSORÇÃO IÔNICA E AS SÉRIES DE CÁTIONS E ÂNIONS

As plantas absorvem os íons da solução do solo. Os cátions trocáveis, bem como os ânions, movem-se livremente na solução, sendo impelidos apenas pela atração elétrica da superfície do mineral, mas sempre sujeitos a troca catiônica e podem ser absorvidos. Assim um cátion Ca^{2+} pode ser trocado por uma quantidade equivalente de qualquer cátion do mesmo sinal.

No caso da absorção pela raiz do K^+ que estava na solução do solo, outro potássio (ou outros cátions) que estava na forma trocável (próximo ao coloide) ocupa a posição do cátion que foi absorvido da solução. Ressalta-se a ocorrência de cátions e ânions na solução de ser mantido a eletronegatividade do sistema.

Do ponto de vista dinâmico os cátions trocáveis regulam a composição da solução do solo, apesar de estarem em equilíbrio. A maior parte encontra-se na forma trocável, e apenas uma pequena parte, na solução.

9.10. SÉRIE LIOTRÓFICA

A seletividade do cátion nos solos segue a seguinte norma: “quanto maior a carga do cátion e menor o raio hidratado, mais fortemente ele será adsorvido pelo coloide”. Neste aspecto há uma série de cátions (série Liotrónica), do mais retido ao menos retido pelo coloide a saber:



Nesta série, quanto mais próximo ao coloide mais fortemente os cátions vão ser retidos e quanto mais distantes ao centro de carga, menos os cátions serão retidos. Os cátions, como sódio, potássio localizados mais longe do centro de carga dos coloides podem ser lixiviados, pois estão menos retidos.

Esta série de cátions foi obtida através de determinação com montmorilonita, saturando o complexo de cargas com cátions e trocado paulatinamente através de uma solução de NH_4Cl ou KCl . Nesta reação foi determinada a quantidade dos íons liberados quando adicionado. O cloreto de amônia, onde surgiu a Série Liotrónica.

Na Tabela 47 (Bohn H.L. et al. 1979) observa-se que os monovalentes apresentam maiores raios do que os bivalentes e estes do que os trivalentes, sendo o Mg^{2+} com 32% o Ca^{2+} com 29% culminando com o Al^{3+} com 15%.

Tabela 44 - Relação de cátions, raio iônico desidratado e relação percentual de retenção iônica por cargas.

Íon	Raio (desidratado) em Å	% substituído por NH_4 ou K
Na^+	0,97	67
K^+	1,33	49
NH_4^+	1,43	50
Rb^+	1,47	37
Mg^{2+}	0,66	31
Ca^{2+}	1,99	29
Al^{3+}	0,51	15

Íon de menor raio desidratado tem maior densidade de carga de volume

Fonte: Soil Chemistry 1979. Bohn, Mc Neal, O'Connor. Resumido, pág. 150.

Portanto o Ca^{2+} domina o Mg^{2+} e este o potássio (K^+) no complexo de troca dos solos e sendo assim não se justifica as relações de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ como tem sido feito nos laboratórios de fertilidade que insistem nestas relações. O que deve ser acertado seria não em relação as relações, mas sim em função dos teores limitantes para as culturas.

9.11. ADSORÇÃO ESPECÍFICA

Nos ânions também ocorre através de adsorção específica sendo que o H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^- agem como carregadores de cátions para a subsuperfície do solo, ou lixiviado, mantendo o equilíbrio químico. Neste aspecto há também uma relação de adsorção específica em ordem decrescente através de troca de ligantes. No caso do cloreto e parcialmente do nitrato tem sido considerado como ânions não específicos.

Fosfatos > molibdato > fluoreto > sulfato > cloreto > nitrato.

Em solos inférteis com elevado teor de alumínio a translocação em profundidade com ânions específicos acompanhados por cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ pode enriquecer tais solos, sendo considerada uma alternativa segura para introduzir cátions em subsuperfície.

9.12. RELAÇÃO ENTRE CÁTIOS TROCÁVEIS E O pH

A representação esquemática envolvendo as diversas reações do solo pode ser observada com o esquema indicado na Figura 33 (Raij, B, van. 1981) onde apresenta as relações dos cátions trocáveis, o hidrogênio não dissociado e os valores de pH, em água e CaCl_2 . No fundo deste reservatório contém as bases trocáveis, acima destas o Al^{3+} e na parte superior o hidrogênio. Com a neutralização da acidez do solo ocorre o desaparecimento do alumínio num pH em água na faixa de 5,7 para a maioria dos resultados observados nos laboratórios de análises de solos, em seguida em pH mais elevado, o hidrogênio até o pH 7,0.

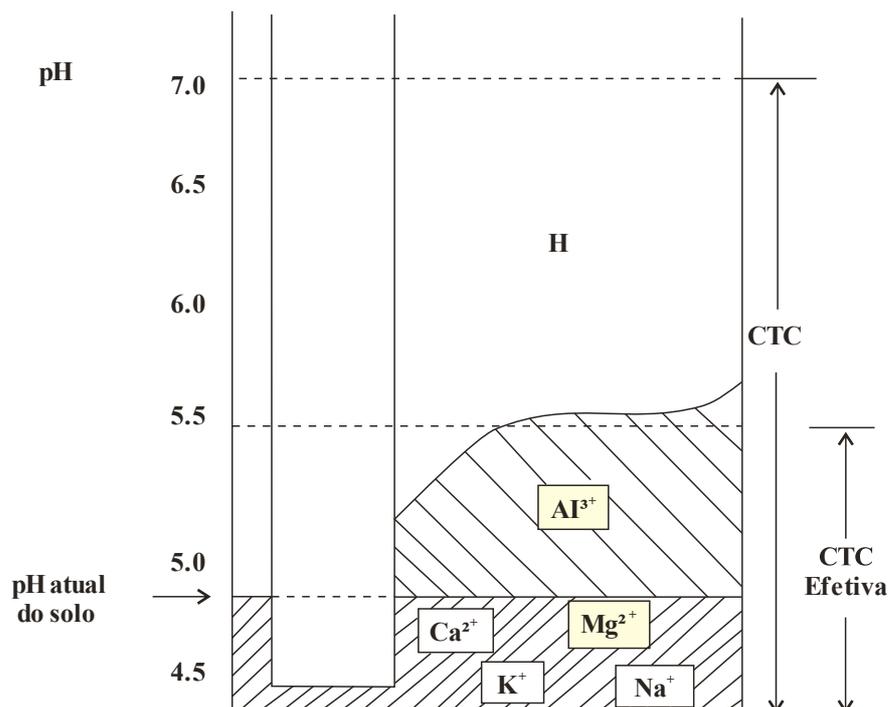


Figura 33 - A CTC pode ser visualizada como a capacidade de um reservatório, ligado à escala de pH, que indica o nível já atingido pelas bases do solo. Se a acidez do solo for neutralizada, o nível de bases sobe. Fonte: Rajj B van 1981.

9.13. VALORES UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE SOLOS

Nas análises de solos a CTC a pH 7,0 é representada pela letra T. A CTC efetiva pela letra t, a saturação por bases pela letra V e a saturação por alumínio pela letra m.

A CTC da fração argila: é calculada pela expressão $T \times 100/\%$ argila. Os solos de CTC elevada (Ta) com valores maiores de 27 cmol/kg de argila e solos de CTC baixa (Tb), ambos sem correção para carbono.

Os valores de delta pH são determinados pela relação de: $\text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$ e indica se há cargas positivas no solo. Se o valor for negativo há CTA, dominância de minerais muito intemperizados, tais como gibbsita e os coloides de solos que apresentam cargas positivas. Se o valor foi positivo há CTC e os coloides apresentam dominância de cargas negativas (Embrapa, 1999).

pH e saturação de bases (índice V%): Em trabalhos originais (Catani, R & Gallo, J.R 1955) verificaram que existe uma estreita relação entre a saturação de bases e pH (Figura 34), mostrando que pode ser usado ou um ou outro parâmetro para determinação da quantidade de calcário assim como índice de acidez do solo (saturação de alumínio).

Os autores determinaram os valores de Y e o X, de acordo com a expressão seguinte:

$$Y = 0,03126 X + 4,288 \text{ com } r = 0,9477.$$

A saturação de bases, em percentagem, seria a relação constituída pela soma de bases (SB) no numerador, dividida pela CTC a pH 7,0 vezes a percentagem de 100%.

$$V = SB / T \times 100$$

Com 5,5 de pH em água teria uma saturação em bases de 50%.

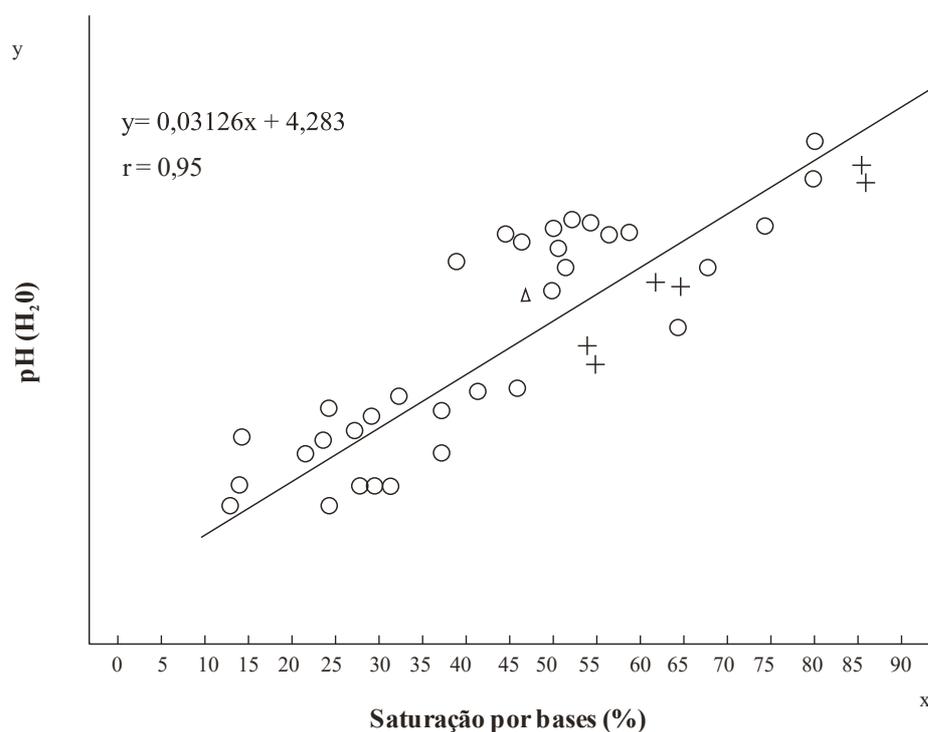


Figura 34 - Relação entre o pH e a saturação de bases. **Fonte:** Catani, R & Gallo, J.R. 1955

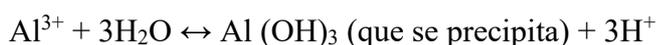
As determinações podem ser calculadas pelos cátions de acordo com as expressões a seguir (Caires, E.F 2010):

Soma de bases (SB): teores trocáveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e NH_4^+ são somados. Em regiões mais úmidas os teores de Na^+ e NH_4^+ são desprezíveis e não fazem parte da SB.

pH e saturação de alumínio: a correlação entre o pH com a saturação por alumínio (representada pela letra *m*) onde se verifica que os valores da saturação de bases (índice V%) se aproximam de 50% o teor de alumínio medido pela saturação, tende para zero. Tais relações se aplicam muito bem nas amostras superficiais de solos brasileiros onde a grande parte da CTC é representada pela matéria orgânica, faixa de 60 a 80%.

$$m = \text{Al} / \text{CTC específica} \times 100$$

Acidez trocável: representada pelo Al^{3+} e com menor participação por outros compostos que adicionado ao H^+ que faz parte da CTC efetiva. Este íon é de participação pequena em relação a acidez trocável (AL^{3+}) e, portanto, é também denominada de acidez de “alumínio trocável”. Os cátions ácidos geram acidez de acordo com reações simplificadas, a seguir:



Acidez potencial (H + Al) ou acidez dependente do pH: esta acidez inclui o H^+ trocável, H das ligações covalentes que se dissociam com a elevação do pH assim como da matéria orgânica, o Al^{3+} trocável assim como outras formas de Al parcialmente hidrolisáveis. A maior parte do H provém das cargas negativas dependentes de pH, sendo maior do que as formas trocáveis de Al.

9.14. O pH, A SATURAÇÃO DE BASES E SOLOS DE MINERALOGIA OXÍDICA

A correlação entre o pH e a saturação de bases tem sido muito utilizado no Brasil, principalmente nas diferentes culturas de grãos e semi-perenes ou perenes, entretanto tem havido solos muito intemperizados que esta relação seja pouco aplicável ou seja, não seguem a relação $\text{pH} \times V\%$, e, portanto, tem um sistema químico de manejo diferenciado.

O exemplo da Tabela 48 extraída do Radam do Brasil Central (Demattê JLI, 2016) indica dois solos, um com textura argilosa e outro de textura média-arenosa. Os solos são de perfis latossolos, profundos e bem drenados, com mineralogia oxídica.

Note que os valores de pH em água aumentam em profundidade, com valores de 5,7 e 5,6 para ambos os solos sendo que os teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ são extremamente baixos com valores inferiores a $0,4 \text{ mmol/dm}^3$ assim como o de potássio, com valores menores de $0,10 \text{ mmol/dm}^3$.

O delta pH é negativo de -1,0 na superfície decrescendo em profundidade atingindo valores de -0,1 para ambos os solos indicando uma mineralogia muito intemperizada. Os valores de V estão abaixo de 10% desde a superfície e na terra mista, também menor que 10% na superfície aumentando em profundidade com valores de 11 e 14%, apesar do decréscimo de bases. Os valores de alumínio tendem a zero na subsuperfície. Os valores de CTC decrescem em profundidade estando atrelados à matéria orgânica. Os valores de CTC decrescem de $10,0 \text{ mmol/dm}^3$ na superfície para 2,2 a 120 cm de profundidade enquanto no solo mais arenoso tem os valores de 4,4 a $1,2 \text{ mmol/dm}^3$ respectivamente na superfície e na subsuperfície.

O manejo destes solos seria a calagem somente para fornecer Ca e Mg, alterando pouco o pH. Quanto ao gesso seria como fonte de cálcio e como transportador de bases em profundidade através do íon específico do SO_4^{2-} . O uso de fosfatos magnesianos, principalmente termofosfatos, que apresenta o Mg e podem alterar sensivelmente o pH. O uso de adubos contendo Ca, Mg e K seria adequado etc.

Tabela 45 - Dados analítico de solos argilosos e arenosos da região do Brasil Central com pH acima de 5,0 e baixa saturação das bases e teores de cálcio e magnésio.

Profundidade (cm)	pH H ₂ O	Delta pH	Argila %	M.O. %	V	Ca+Mg mmol/dm ³	K mmol/dm ³	Al mmol/dm ³	CTC
Perfil 31 – Distrito Federal – LVE – álico, argiloso									
0 – 15	5,1	-1,0	88	2,5	5	0,4	0,10	1,0	10,0
15 – 35	5,3	-1,0	90	1,8	5	0,2	0,06	0,5	6,1
35 – 50	5,5	-0,7	90	1,2	5	0,2	0,02	0,0	4,1
50 – 120	5,7	-0,1	92	0,7	7	0,2	0,01	0,0	2,2
Perfil 33 – Distrito Federal – LVA – álico, textura média									
0 – 18	5,2	-1,0	19	0,9	7	0,2	0,04	0,9	4,4
18 – 35	5,4	-0,9	20	0,5	6	0,2	0,02	0,2	3,2
35 – 60	5,6	-0,6	23	0,3	11	0,2	0,02	0,0	1,8
60 – 105	5,6	-0,4	24	0,2	14	0,2	0,02	0,0	1,2

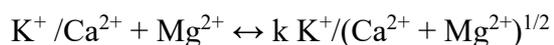
Fonte: RadamBrasil.

CAPÍTULO 10:

10.1. CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS (CTC)

A Capacidade de Troca de Cátions é expressa como o número de centimoles de carga positiva (cmol) que pode ser adsorvido por unidade de massa. Um solo pode ter uma CTC de 15 cmol/kg, indicando que 1,0 kg de solo podem conter 15 cmol de íons H^+ e pode trocar este número de cargas de H^+ pelo mesmo número de cargas de qualquer outro cátion, ou seja, **carga por carga** e não íon por íon (Novais, R.F. & Mello, J.W.V.2007).

As relações entre os cátions trocáveis e na solução do solo estão em equilíbrio e pode ser observado através da equação de Gapon (Raij B van 2011) onde tal expressão pode ser representada através dos cátions trocáveis K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} e os mesmos cátions em solução.



O k é a constante de Gapon que varia de acordo com as características do tipo de coloide, da densidade de carga e a saturação de cátions.

Nesta equação a relação de concentrações da solução do solo, $K^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+})^{1/2}$, passa a ser também constante (Schofield, R.K, 1947). A equação diz o seguinte:

“Para cátions em solução e que estão em equilíbrio com uma quantidade maior de cátions trocáveis, uma mudança na concentração da solução não perturbará o equilíbrio se as concentrações dos cátions monovalentes variarem em uma relação e as concentrações dos cátions divalentes variarem na raiz quadrada desta relação”

Num período seco a solução do solo será reduzida em volume, pela evaporação do solo ou pela adição de fertilizantes, sendo que parte dos cátions monovalentes da solução do solo trocará com cátions bivalentes do solo, a fim de manter constante a relação. Se ao contrário, a solução do solo for diluída pela irrigação ou chuvas, haverá necessidade de troca de cátions divalentes da solução com cátions monovalentes do solo para manter o equilíbrio.

Numa provável alteração da solução do solo esta equação permite descrever as condições em que se mantem o equilíbrio iônico do solo, entre os cátions em solução e os cátions trocáveis.

10.1.1. CTC Permanente e CTC Dependente de pH

A CTC permanente é devido a substituição isomórfica nos tetraedros de Si por Al, assim como nos octaedros de alumínio, sendo substituído por Mg. Tais cargas são permanentes em relação ao pH, e não se alteram.

No caso de CTC dependente de pH a ocorrência de tais cargas se deve a protonação com um íon de H⁺ (ambiente ácido) ou a desprotonação OH⁻ (ambiente básico) na superfície de um coloide de caulinita ou um óxido de Al ou de Fe, alterando o pH (Raj B van 2011).

A CTC dependente de pH para solos intemperizados no Brasil não deixa de ser um valor privilegiado em termos de manejo, pois ela pode ser alterada pelo calcário em função das culturas. A um pH 6,0 o alumínio estaria precipitado (pH 5,6) e não causaria inconvenientes a cultura, CTC dependente de pH da Matéria Orgânica.

A Tabela 49 indica em trabalho de Hara, T, 1974 com três tipos de solo muito intemperizados de diferentes teores de argila e de matéria orgânica. Num pH do solo, correspondente a CTC permanente (4,41 a 1,41 cmol/kg) e ao determinar os valores a pH 7,0 e pH 8,0 verificou que os valores são crescentes de CTC devido a matéria orgânica, indicando com isso que a matéria orgânica apresenta CTC dependente de pH. A matéria orgânica apresenta cargas negativas dependente de pH até a um pH de 3,0 e abaixo deste valor pode apresentar cargas positivas.

Tabela 46 - CTC de três solos (horizonte Ap) ter valores de pH da solução extratora e teor de matéria orgânica dos solos.

Solo	pH do solo	pH 7,0	pH 8,0	Matéria orgânica
	cmol/kg			g/kg
Argissolo V.A.	4,41	8,32	11,44	52,4
Latossolo V.E. textura média	1,58	3,14	4,22	13,9
Latossolo V.E. textura argilosa	1,41	5,62	8,96	35,3

Fonte: Hara, 1974.

Legenda:

VA: Vermelha Amarelo;

VE: Vermelho Escuro.

10.2. CAPACIDADE DE TROCA ANIÔNICA (CTA)

Ocorrem principalmente em solos muito intemperizados nos trópicos e os princípios básicos da CTA são semelhantes aos de CTC, exceto pelo fato de que as cargas dos colóides são positivas e a troca ocorre entre íons de carga negativa. A CTA assim como a CTC é dependente de pH podendo apresentar cargas positivas principalmente na subsuperfície. As cargas positivas nos octaedros, principalmente nos bordos da estrutura, podem ter ânions específicos como SO_4^{2-} e não específicos como o NO_3^- e Cl^- formando os pares iônicos com cátions (no caso de ânions não específico como dois Cl^- , arrastando um Ca^{2+}) e que podem ser translocados para a subsuperfície, melhorando tais solos quimicamente (Brady, C.N. e Weil, R. R, 2013).

10.3. CARGAS POSITIVAS E AS REAÇÕES COM FÓSFORO E ENXOFRE (SULFATO)

As reações indicadas nas Figuras 35 a 36, correspondem a uma simulação que foram feitas para um melhor acompanhamento das reações com o fósforo e o sulfato, mas não correspondem as ligações com ferro e alumínio (Costa, A.C. e Bigham. J.M, 2009).

Determinados ânions como H_2PO_4^- e SO_4^{2-} e em menor quantidade alguns cátions metálicos, tais como Zn, Cd, Cu, Pb, são adsorvidos e apresentam forte afinidade com a superfície positiva de óxidos de Fe e Al e da caulinita, reagindo com eles, através de ligações de covalência. No início da reação o óxido tinha balanço positivo. As reações do fósforo estão representadas na Figura 35. O balanço ficou 2(-), devido as duas cargas negativas do oxigênio do H_2PO_4^- não compensadas e o P pode estar na forma lábil, podendo ser absorvido (situação em A). Nestas reações seriam uma estimativa do que ocorre (Sampla E.C. et al 1980). Nesta reação há formação de uma nova superfície do mineral de argila.

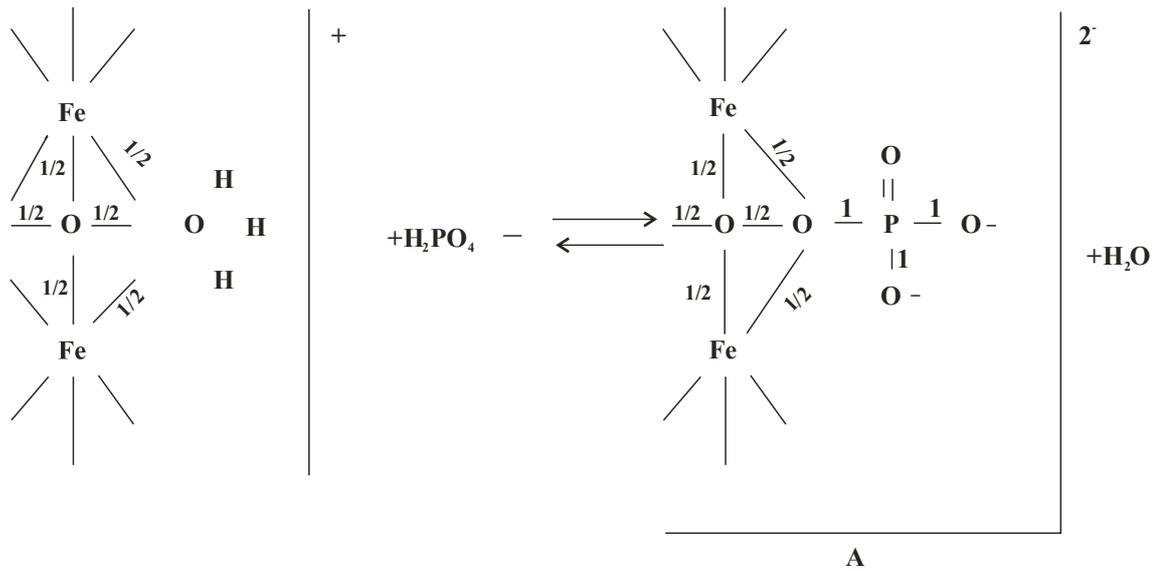


Figura 35 - Esquema representação de reação com superfície de um óxido de Fe com fósforo. **Fonte:** Sampla E.C. et al (1980)

Entretanto esta reação é tempo dependente, ou seja, as ligações podem ser mais fortes com a superfície do mineral, fazendo com que o ânion, no caso o H_2PO_4^- , esteja “fixado”, forma não lábil (Figura 36), não absorvido. Tal reação pode ainda continuar através do tempo e se completar com uma superfície de uma carga negativa do ânion (Sample et al. 1980).

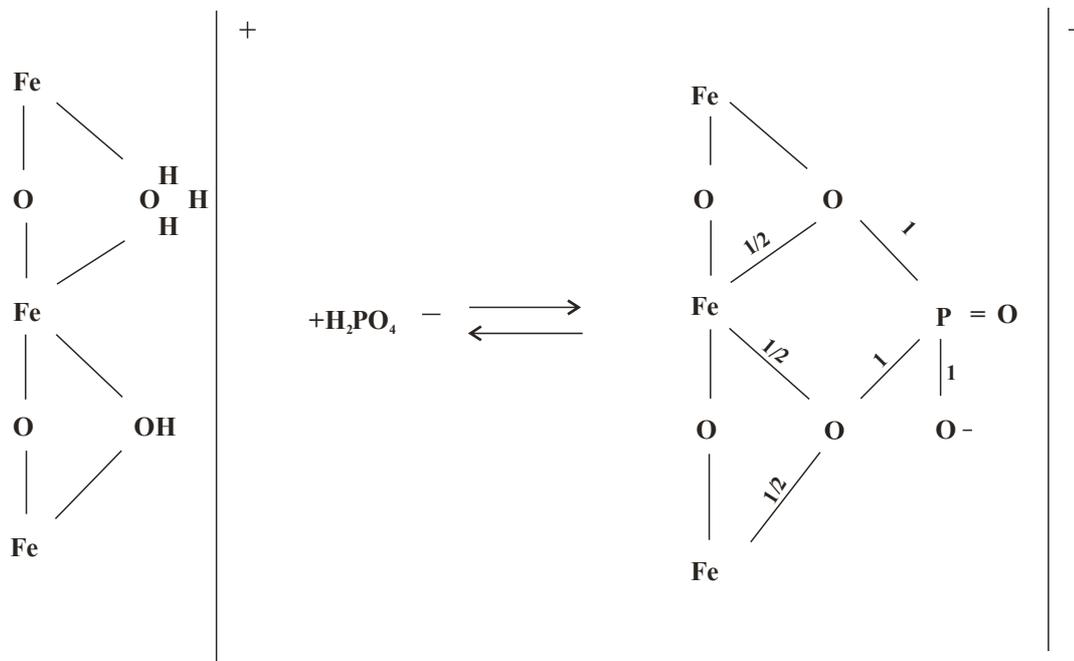


Figura 36 - Esquema representação esquemática da reação do ânion fosfato com a superfície do óxido. **Fonte:** Sample et al. (1980).

Nesta reação o fósforo tende a passar da forma lábil (forma absorvida pela planta) para a não lábil (forma fixada, não absorvida pela planta) em consequência há perda de eficiência da absorção do P pela planta.

Como evitar tal reação?

Diminuindo as cargas positivas na camada superficial através principalmente da calagem, ou usando matéria orgânica ou pela ação do ácido silícico.

Como se verifica a aplicação do H_2PO_4^- em solos oxídicos pode reduzir as cargas positivas e aumentar as negativas, num processo semelhante a calagem.

Os dados da Tabela 50, num solo classificado como Typic Gibbsihumox indicam que a não aplicação do fósforo, a CTC e CTA na camada superficial era de 7,5 e 0,2 cmol/dm^3 respectivamente e na camada de 10-20 cm de 4,2 e 0,5 cmol/dm^3 respectivamente. Após a aplicação de 880 kg/ha de P os valores de CTC e CTA para as duas camadas foram respectivamente 8,5 e 4,5 e 0,6 e 0,4 cmol/dm^3 .

Tabela 47 - Resultados de CTC e CTA em solos oxídicos com aplicação de fósforo.

Profundidade	Typic Gibbsibuosoz (P aplicado, kg/ha)			
	0		880	
	CTC	CTA	CTA	CTA
0 – 10	7,5	0,2	8,5	0,6
10 – 20	4,2	0,5	4,5	0,4

Fonte: Raij B.van 2011.

10.4. AÇÃO DO SO_4^{2-} NA SUBSUPERFÍCIE DE SOLOS MUITO INTEMPERIZADOS

A Tabela 51 indica os tipos de solos utilizados no experimento (Raij B van, 2011) na camada superficial e subsuperfície, teor de matéria orgânica assim como a mineralogia constituída por óxidos de ferro, gibbsita e caulinita assim como a ação da adsorção específica na forma de SO_4^{2-} . Note que o SO_4^{2-} apresenta melhores resultados na translocação de íons do que o Mg^{2+} em mmol/kg de solo inclusive em solos arenosos como o Latossolo amarelo. Quanto mais intemperizados os minerais da fração argila maior seria a ação do sulfato na translocação de bases nas camadas inferiores do solo. Nas camadas superficiais a ação da

matéria orgânica, com elevada CTC, bloqueando as cargas positivas, não permite a ação do sulfato.

Tem sido relatado, que o gesso, devido a dissolução de Ca^{2+} , ou seja, um efeito diluidor nos solos, pode diminuir o alumínio nos solos.

Tabela 48 - Tipos de solos argilosos, teor de matéria orgânica, tipos de minerais e adsorção de íons.

Solo	Matéria Orgânica	Minerais			Adsorção de íons	
		Fe_2O_3	Gibbsita	Caulinita	Mg^{2+}	SO_4^{3-}
		g/kg			mmol/kg de solo	
LA AP	32,9	40	30	250	38,1	1,2
LA B2	4,8	60	60	370	15,8	20,2
LR AP	42,3	190	370	90	33,4	3,8
LR B2	11,4	180	330	110	3,6	30,1
TE AP	40,3	160	80	330	94,3	2,9
TE B2	16,6	170	100	430	55,3	15,5

LA = Latossolo Vermelho Amarelo; LR = Latossolo Roxo; TE = Terra Roxa Estruturada.

Fonte: Raij, 2011.

O SO_4^- , sendo um ânion específico pode reagir com os coloides do solo de cargas positivas principalmente na subsuperfície (Figura 37). Nesta situação o sulfato ao se transloucar carrega junto os cátions de Ca, Mg, K e para manter o equilíbrio químico, enriquece a subsuperfície com cátions, deixando os solos mais férteis.

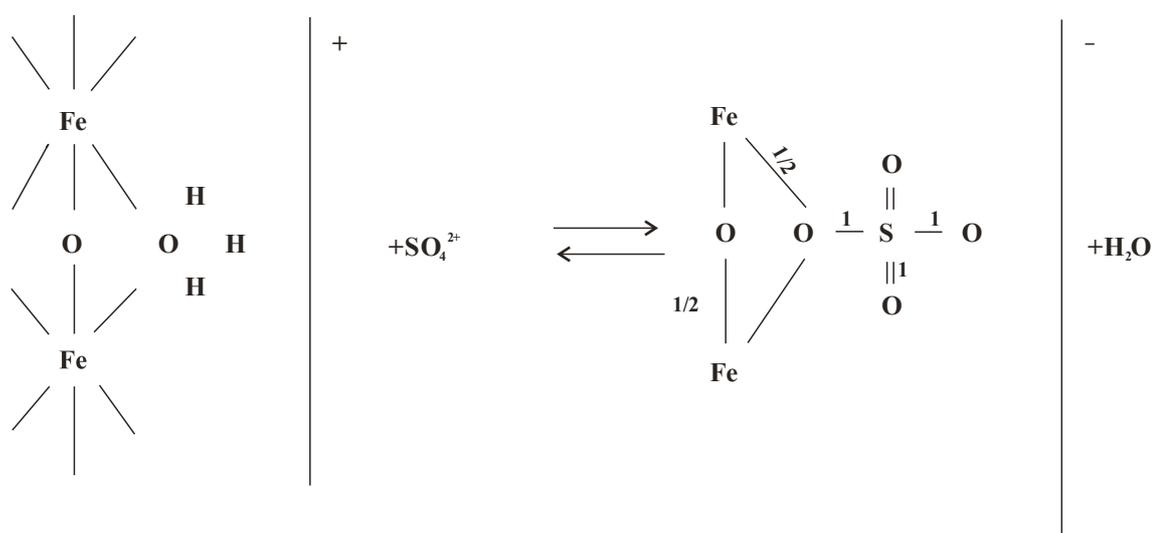


Figura 37 - Esquema representação esquemática da reação do SO_4^- com a superfície do óxido de cargas positivas.

10.5. AÇÃO DO ÂNION ESPECÍFICO NA MELHORIA DOS SOLOS NA SUBSUPERFÍCIE

A relação dos ânions específicos e não específicos (Fosfatos > sulfatos > cloretos > nitratos) podem auxiliar na colocação de cátions na subsuperfície dos solos inférteis tais como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ porém como cátions acompanhantes, na forma de sais (Raij B van 2011). Dentre estes ânions específicos o menos perigoso é os fosfatos e sulfatos, (já visto) este representado pelo gesso (SO_4^{2-}) ou outra molécula.

No caso do cloreto e nitrato, considerados ânions não específicos, podem carrear também bases como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ a maiores profundidades, porém há necessidade cuidados para não haver lixiviação (Figura 38).

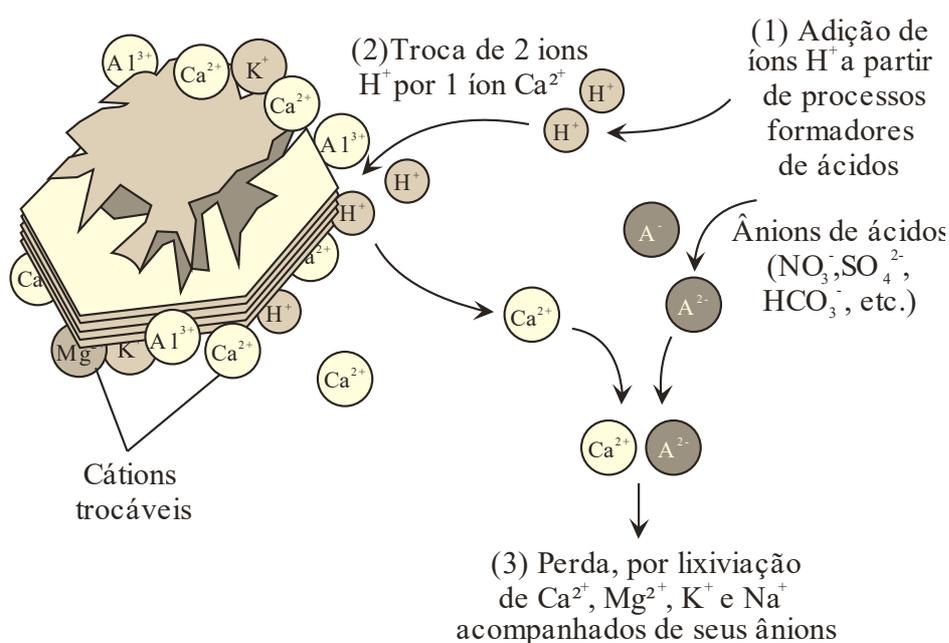


Figura 38 - Exemplos de lixiviação através de ânions não específico (item 3), como NO_3^- e Cl^- , carreando para a subsuperfície Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ou lixiviando mais profundamente. No caso do item (1) os dois prótons (H^+) são originados pelos processos de intemperismo e deslocam Ca^{2+} no complexo de troca do coloide (item 2), que são lixiviados pelos ânions ácidos. **Fonte:** Brady, C.N. E Weil, R. R (2013).

Note que na lixiviação seria sempre um sal, e não íon isolado (Raij B van, 2011). Numa simulação, solos argilosos e arenosos, considerando uma CTC a pH 6,0, os arenosos acidificariam mais rapidamente do que os argilosos, e devido a este motivo a frequência de

aplicação de corretivos nas terras arenosas são mais frequentes, porém com quantidades menores.

10.6. FORMAÇÃO DE CARGAS NOS COLOIDES DE SOLOS INTEMPERIZADOS

Num solo muito intemperizado há formação de cargas negativas e positivas na superfície do mineral dependendo do pH. As reações ocorrem em situações ácidas formando cargas positivas e as cargas negativas em situações básicas (Figura 39).

Situação em A - Dados do mineral do óxido de ferro: Número de Coordenação, NC. = 6; Valência = 3; eletrovalência = $3/6 = 1/2$

Superfície de um óxido de Fe, Al ou caulinita. O Fe distribui 6 eletrovalências de $1/2 = 6 \times 1/2 = 3$. Em relação ao Fe há $2 \text{ OH} \times 1/2 = 1$ valência positiva que é neutralizado pela valência negativa do OH^- . O balanço na superfície é igual a zero.

Situação em B - Ambiente ácido. Neste caso há uma protonação (introdução de 1 H^+) na superfície de troca do óxido. Balanço de carga = $2 \times 1/2 (\text{Fe}=1)$ valência positiva, neutralizado pelo OH. Como há 1 H^+ a mais na superfície, o balanço será positivo (CTA).

Situação em C - Num ambiente básico há desprotonação, com a saída de H_2O . Balanço de carga: $2 \times 1/2 (\text{Fe}) = 1 (+)$. Oxigênio: $2(-)$: balanço $1 (-)$

Cargas positivas não são de interesse e devem ser neutralizadas principalmente pela calagem, matéria orgânica ou silicatos.

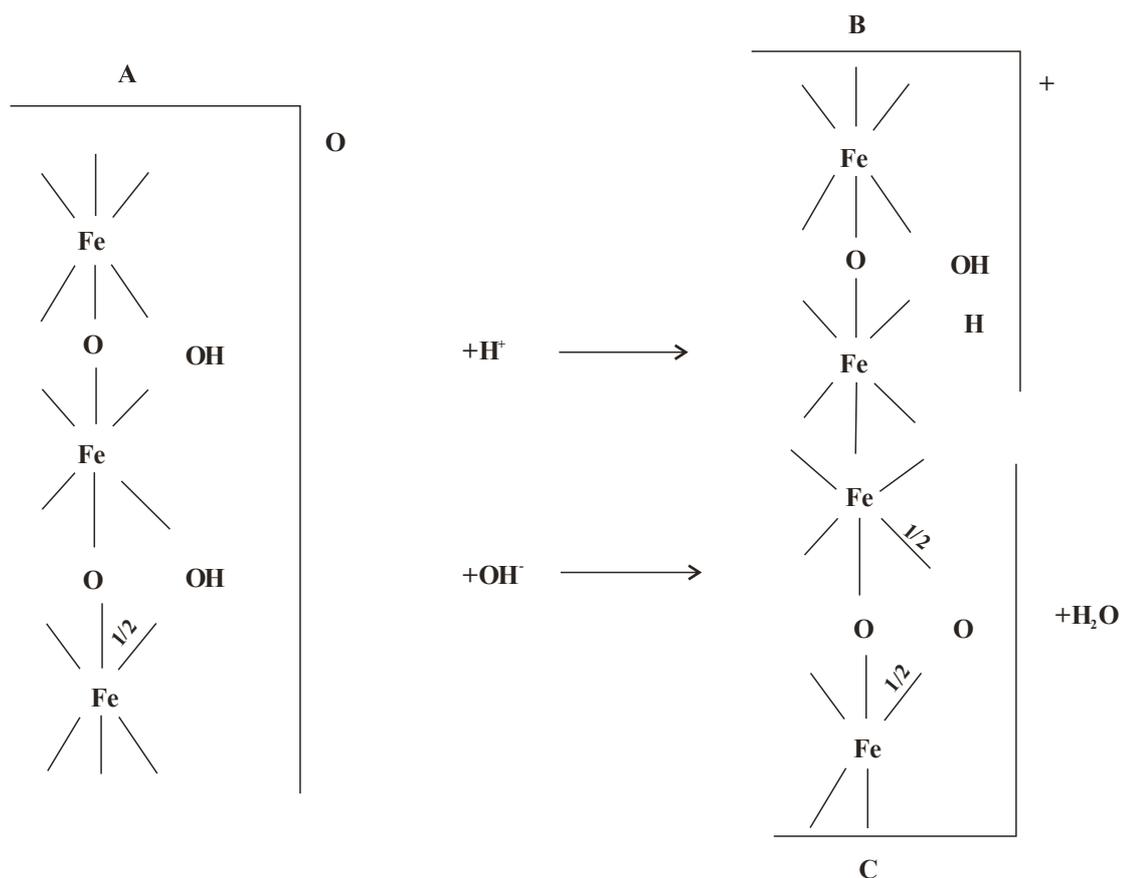


Figura 39 - Esquema de representação na superfície de óxido de Fe gerando cargas positivas (ambiente ácido) e cargas negativas (ambiente básico).

10.7. CARACTERÍSTICAS DE CARGAS DE MINERAIS DA FRAÇÃO ARGILA

Na Tabela 52 indica que os minerais de argila e dependendo das condições climáticas, podem apresentar cargas negativas (minerais 1:1) dependente de pH ou somente cargas permanentes como nos minerais 2:1.

Os óxidos de ferro e alumínio (gibbsita, goethita) apresentam 100% de cargas dependente de pH assim como húmus (moléculas orgânicas) com 90% de cargas dependentes de pH, seguido pela caulinita e posteriormente pelos minerais 2:1, estas com pequena contribuição de cargas positivas. No caso das alofanas, estas apresentam uma CTC maiores do que a caulinita, porém 90% são dependentes de pH (Novais, R.F. e Mello, J.V., 2007).

Tabela 49 - Características de carga de alguns minerais da fração argila separados de solo em e.mq/100 de argila.

Tipos de coloide do solo	Cargas negativas e positivas			
	Cargas negativas		Cargas positivas	
	Total	Constante	Dependente pH	
	cmol/kg	%	cmol/kg	
Orgânicos	200	10	90	0
Esmectitas	100	95	5	0
Vermiculitas	150	95	5	0
Micas	30	80	20	0
Cloritas	30	80	20	0
Caulinita	8	5	95	2
Gibbsita	4	0	100	3
Goethita	4	0	100	3
Alofana	30	10	90	15

Fonte: Novais, R.F. e Mello, J.V., 2028 e Brady e Weil, 2013.

10.8. EQUILÍBRIO QUÍMICO

Sobre este aspecto há necessidade do conhecimento que os íons trocáveis assim como na solução do solo e a superfície do mineral estão em constantes modificações como a absorção de nutrientes pelas plantas e, portanto, a manutenção do sistema químico é inevitável.

Para a manutenção desde equilíbrio há necessidade de que a soma de cátions da superfície do solo assim como os que estão em solução seria igual à soma dos ânions ou das cargas negativas. A Figura 40 indica tal fato onde o somatório de cargas positivas (as bases mais o alumínio e hidrogênio) é igual o somatório de cargas negativas (coloide do solo), a saber:

$$\sum (+); \sum (-) = 20$$

A CTC seria a soma dos cátions trocáveis, no caso igual a 12 (Raij, B van 1981).

Superfície Carga	Trocável	Solução	
	-K	Cl	Cl ⁻
	-2 Ca	K ⁺	NO ₃ ⁻
	-2Mg	Cl	Ca ²⁺
	-K	-SO ₄ ²⁻	K ⁺
	-K	Cl	NO ₃ ⁻
	-H	Ca ²⁺	Ca ²⁺
	-H		
	-3Al		

CTC = 12
 $\Sigma (-) = 20$
 $\Sigma (+) = 20$

Figura 40 - O somatório dos positivos é igual ao somatório do negativo, a saber: $\Sigma (+)20$; $\Sigma (-) = 20$, mantendo o equilíbrio químico. **Fonte:** Raij, B van (1981).

10.9. VALORES DE PCZ E O SISTEMA DE MANEJO

O pH do solo onde o balanço de cargas positivas e negativas é zero é designado de ponto de carga zero (PCZ) e tem importância principalmente nas camadas inferiores do solo intemperizado onde o teor de matéria orgânica é baixo. Os solos apresentam valores de PCZ os mais variados dependendo de sua mineralogia do teor de matéria orgânica e do grau de intemperismo. A seguir alguns valores do PCZ de minerais da fração argila e de solos mais comuns na camada superficial e subsuperficial.

Na Tabela 53 note que os minerais de argila apresentam valores de PCZ variando de 5,0 para a gibbsita a 6,7 para a goethita, sendo que a caulinita (mineral 1:1) assim como o húmus o PCZ seria abaixo de 4,0.

O manejo de solos óxidos principalmente com mineral goethita apresenta PCZ de 6,7 significa que acima deste pH o solo irá ter cargas negativas e abaixo cargas positivas, complicando ainda mais o manejo quais sejam, maior adsorção de fósforo (presença de cargas positivas); maior lixiviação de nutrientes; maior adsorção específica com outros ânions.

Nos solos indicados nota-se a importância da matéria orgânica (não indicada) que na camada superficial da maioria dos solos que apresentam valores de PCZ inferiores a um pH de 3,5 (devido a MO). Nas camadas inferiores, com teores de matéria orgânica menores, o PCZ varia de acordo com a mineralogia. Em solos arenosos como nos Latossolos, o PCZ está na faixa de 5,5, a 6,3.

Apenas para exemplificar (Raij B van, 2011) a ação da matéria orgânica com os dados do PCZ do Latossolo Roxo, com 3,5 na superfície e 6,0 na subsuperfície (mineralogia oxidica). Como o teor de argila deste solo não varia em profundidade assim como sua mineralogia (pois o Ki na superfície é semelhante ao da subsuperfície) o PCZ deveria também ter valores semelhantes nas duas profundidades. Tal fato, entretanto não ocorre, pois, a matéria orgânica da camada superficial é suficiente para alterar o PCZ para um pH mais ácido. Na subsuperfície o teor desta matéria orgânica é menor e, portanto, a mineralogia oxidica predominou com valores de 6,3. Sendo assim a perda da M.O. da superfície destes solos deve ser evitada com erosão e raspagens desnecessárias.

Tabela 50 - Valores de PCZ de alguns minerais e de solos nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Mineral	PCZ (pH)	Solo	pH dos horizontes	
			Superficial	Subsuperficial
Goethita	6,7	PV	1,6	4,0
Hematita	5,4	TE	1,9	2,7
Gibbsita	5,0	LVA	3,3	5,5
Caulinita	<4,0	LA	3,1	6,3
Húmus	<3,0	LR	3,5	6,0

Fonte: Raij, 2011.

Na Figura 41 (Kinjo T, 1983), indica que o ponto de PCZ está próximo a faixa de pH 4,0. O balanço de cargas na faixa indicada de 0 a -1 é constante ao longo do pH de 3,0 a 9,0, que corresponde aos minerais 2:1, devido ao pH permanente. Na outra faixa com valores próxima + 2,5 a aproximadamente - 4,0 representam minerais 1:1 e óxidos, correspondem às cargas variáveis negativas e positivas.

A um pH 5,0, no gráfico, o saldo é de +1,5 cmol de carga positiva, e ao passar para pH 6,0 o saldo aumenta para + 1,0 cmol.

Observe que ao se fazer a calagem (pH de 5,0 para 6,0) há decréscimo das cargas positivas e aumento das negativas, porém o ponto do PCZ não se altera. A única maneira de se alterar o PCZ do solo seria aplicar um produto que tenha somente cargas positivas ou negativas.

A matéria orgânica, com pH superior a 2,5, gera carga negativa e, portanto, ao se aplicar este produto no solo (Figura 41b) o PCZ se deslocou do ponto 1 para o ponto 2, aumentando assim sensivelmente o saldo de cargas negativas do solo. Portanto, a matéria orgânica deve ser preservada nestes tipos de solos principalmente nas terras arenosas.

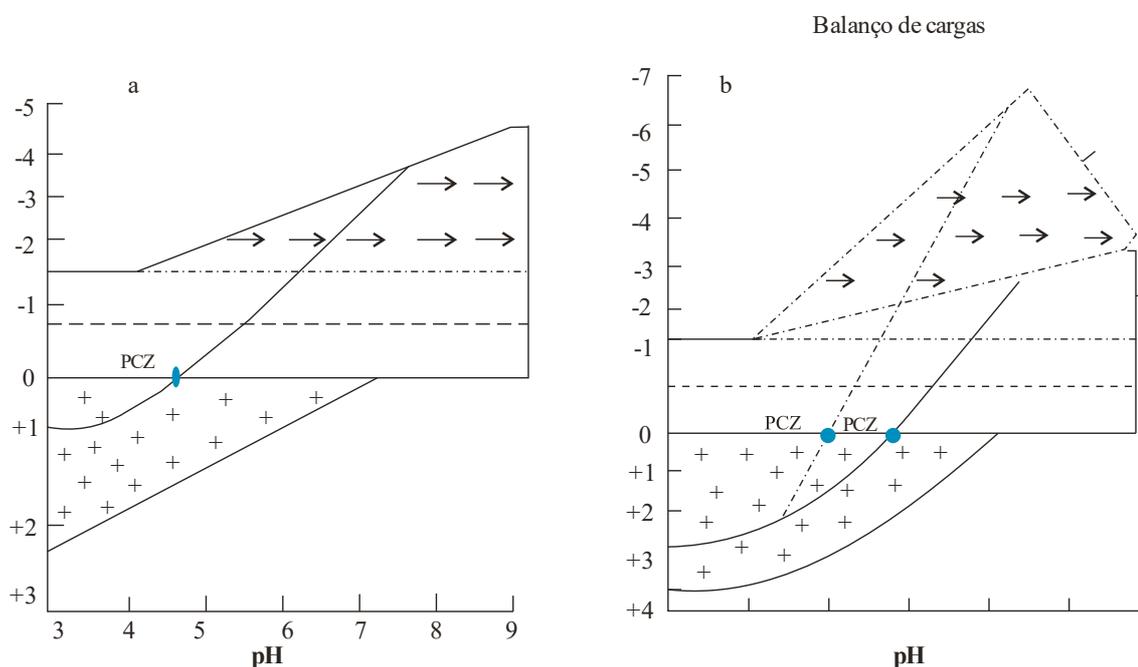


Figura 41 - (a) Cargas permanentes, dependentes e carga líquida em Oxissol. (b) Efeito da adição de matéria orgânica indicando deslocamento do PCZ do ponto PCZ (1) para PCZ (2).
Fonte: Kinjo T. (1983).

10.10. PODER TAMPÃO DOS SOLOS

Considere um mineral de argila carregado de Al (ácido fraco). O íon adsorvido de Al trocável estaria em equilíbrio com o Al da solução do solo. A hidrólise do alumínio tende a gerar H^+ na solução, acidificando-a.



Se o H^+ é neutralizado pela adição de uma pequena quantidade de bases e o alumínio for precipitado como $Al(OH)_3$ o equilíbrio do sistema, ou seja, o pH, tenderá a ser mantido pela translocação do Al adsorvido (trocável) para a solução do solo. Estes íons de Al através da hidrólise irão produzir íons de H^+ e o pH tenderá a se manter como no início da adição da base.

Se mais bases forem adicionadas ao sistema, entretanto a reação acima continuará sendo que o Al adsorvido continua a ser neutralizado sendo trocado no coloide do solo com o cátion da adição da base. Como resultado há um gradual aumento no pH do sistema, do que uma mudança abrupta do pH que é caracterizado em sistemas não tamponado.

Reversão do sistema: se um ácido é continuamente adicionado a um solo neutro, íons OH^- da solução do solo são neutralizados. Gradualmente à medida que OH^- são consumidos pela adição de íons ácidos H^+ , o $Al(OH)^{3+}$ se dissolverá na solução do solo e gradualmente irá trocar com cátions básicos do mineral de argila. A principal consequência seria o decréscimo gradativo do pH à medida que o Al^{3+} é trocado pelos adsorvidos cátions básicos.

Tal situação seria a resistência que o solo oferece em relação a mudança de pH, pela adição de ácido ou base. Trabalhando com solos sem a matéria orgânica, Sparks D.L (2003) verificou os mecanismos de tamponamento em função do pH e notou que solos variando o pH de 4,5 a 5,5 o alumínio seria o responsável assim como os silicatos em solos de pH variando de 5,5 a 7,3 e acima deste valor, os carbonatos.

Como se verifica o pH, ou a reação do solo, tem efeitos diretos ou indiretos sobre a maioria das reações do solo. Num solo argiloso de minerais 2:1 tem maior efeito tamponado do que um solo oxídico também argiloso.

Solos arenosos no Brasil apresentam mineralogia oxídica e caulinita, portanto menos tamponado.

CAPÍTULO 11:

11.1. DENSIDADE E COMPACTAÇÃO DO SOLO

Independentemente do sistema de manejo utilizado a compactação (redução da porosidade) dos solos é inerente ao sistema de cultivo. Fazer atividades na área agrícola, sem a compactação, é sinônimo de quem não conhece tais atividades.

Solos arenosos também compactam, pois, tais características são uma consequência do sistema agrícola, não o fator principal. Neste aspecto há necessidade do conhecimento do sistema de manejo dos solos para atenuar ou eliminar os problemas causados pela compactação.

11.2. DENSIDADE DE PARTÍCULA E DENSIDADE DO SOLO

No caso da densidade de partículas, g/cm^3 , corresponde a massa de partículas do solo em função de sua estrutura cristalina. Num solo pode ser representado como sendo 50% de sólidos (45%) e matéria orgânica (até 5%) sendo que outros 50% correspondendo espaço poroso, ocupados pela água e pelo ar.

A densidade da partícula está na faixa de $2,65 \text{ g/cm}^3$ ($2,75 \text{ g/cm}^3$ dependendo dos autores) para grande parte dos solos minerais e valores maiores de $3,0 \text{ g/cm}^3$ ou mais, correspondem a ter minerais primários na massa do solo. Tal sistema dificilmente ocorre em solo arenoso exceto em áreas margeando grandes rios e nas áreas encharcadas e com elevados teores de matéria orgânica em sistemas de baixo teor de oxigênio devido a compactação.

Num sistema está incluindo a densidade de partícula (50% do solo) e o volume poros nos demais 50% do solo, este dividido em macroporos (0,08 mm, ou maior) e microporos (menor que 0,08 a $< 0,0001 \text{ mm}$). A variação da densidade do solo em g/cm^3 , é função da textura do solo, argilosos (0,9 a 1,25); textura média (1,3 a 1,5), arenosos ($> 1,5$).

A porosidade pode ser alterada dependendo das condições se mais úmido ou secos, sendo que o espaço poroso pode ser determinado pela expressão a seguir:

$$\text{Porosidade total (\%)} = 100 - (D_s/D_p \times 100)$$

Onde: D_s = densidade do solo; D_p = densidade da partícula (ambos em g/cm^3).

Num solo arenoso onde $D_s=1,5 \text{ g/cm}^3$, a porosidade total é de 43,3% e num solo argiloso de $D_s=1,0 \text{ g/cm}^3$ a porosidade total é de 62,2%, indicando que solos argilosos apresentam maior porosidade que solos arenosos. Tal fato é devido que as terras argilosas apresentam maior quantidade de agregados, podendo ocorrer poros entre e dentro dos agregados, o que não ocorre com terras mais arenosas.

Nas terras arenosas não apresentam esta grande quantidade de agregados devido aos baixos teores de matéria orgânica e de argila, permitindo que os macroporos ocorrem entre os grânulos individuais de areia, para o ar e para a água. Sendo assim as terras arenosas apresentam maior quantidade de macroporos, e com isso permitem a movimentação livre do ar e da água assim como o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e os organismos.

11.3. ALTERAÇÃO DA MACRO E MICRO POROSIDADE DO SOLO

Qualquer alteração na porosidade do solo, reduzindo-a, afetaria uma série de características do solo, como capacidade de aeração (quantidade de oxigênio), infiltração de água, transferência de calor, absorção de nutrientes, calor específico, entre outros. Apesar dos efeitos benéficos do preparo do solo e as atividades de manejo, ao longo do tempo, o aumento da densidade do solo é um fator preponderante e devido a tal fato atenção deve ser prevista nos solos.

Na Tabela 54 (Brady & Weil, 2013) fez uma simulação com valores de compactação crescente constando de nível sem compactação até o nível severo de compactação, independentemente da textura do solo. Verificaram que os micros poros, tanto para o ar como para água, se alteram menos do que a macro porosidade para o ar quando a compactação aumenta de moderada para severa. Tal fato significa que a macro porosidade para o ar é mais afetada numa compactação do que a água. Num nível de compactação severa, não há ar no bloco correspondente, muitas vezes sendo dominado por reações anaeróbicas prevalecendo organismos maléficis na biologia do solo.

Tabela 51 - Nível de compactação em função da macro e micro porosidade.

Fatores solo	Nível de compactação			Diâmetro dos poros mm
	Sem	Moderada %	Severa	
Sólido	50	50	50	-
Água	25	15	7	-
Macro	12,50	5	2	0,08 – 5+
Micro	12,50	10	5	0,005 a 0,08
Ar	25	15	2	-
Macro	12,50	5	0	0,08 – 5.
Micro	12,50	10	2	0,005 a 0,08

Fonte: BRADY & WEIL, 2013.

11.4. COMPACTAÇÃO E A POROSIDADE AO AR

Na safra 2002/03 com cana-de-açúcar, em Lençóis Paulista, SP, em perfil latossólico com 22% de argila, foi determinado a porosidade com injeção de mercúrio nas profundidades de 10; 30; 60; 100 cm nos perfis P21 de mata; P22 de segundo corte e P23 de terceiro corte de cana-de-açúcar.

Note que a micro porosidade praticamente não se alterou com as terras sob mata e as terras cultivadas. Entretanto, quando se analisa o lado direito desta Figura 42, onde as dimensões são da macro porosidade ao ar, há um deslocamento dos gráficos dos perfis P22 e P23 para a direita, menor porosidade, mas não do perfil P21, em dimensão decrescente na porosidade, indicando que houve alteração da porosidade ao ar, mas não houve decréscimo do micro porosidade (Demattê JLI, 2020).

Entretanto, na profundidade dos perfis de 60 cm ou maior, há semelhança nas porosidades, macro e micro, entre o perfil na mata e os demais, indicando com isso que a compactação feita pelo tráfego ou sistema de preparo convencional do solo atinge somente até a profundidade estabelecida.

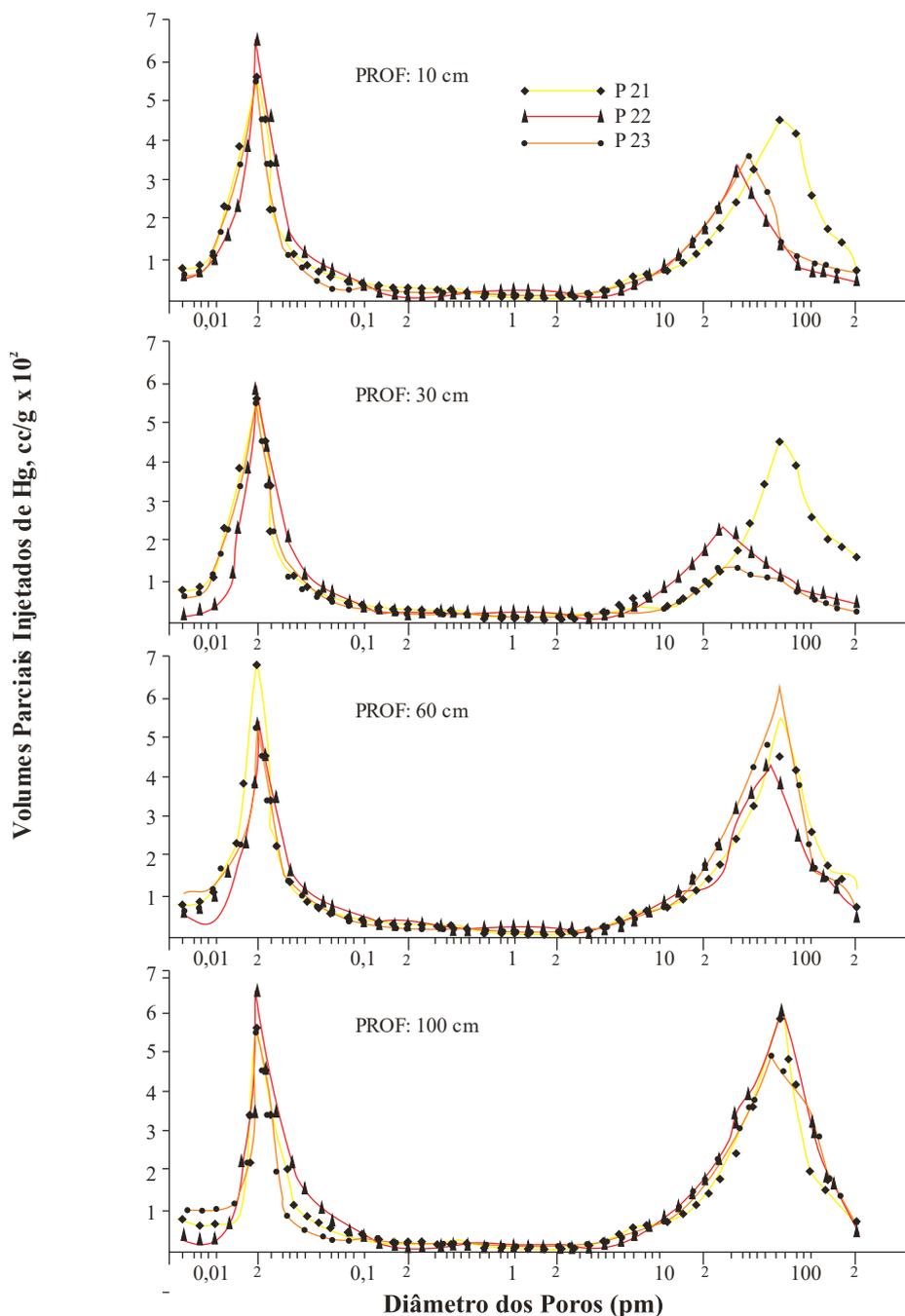


Figura 42 - Redução na porosidade devido ao ar. **Fonte:** Demattê JLI (2020)

11.5. DENSIDADE DE SOLOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM PROFUNDIDADE DE PERFIS LATOSSÓLICOS E ARGISSOLOS

Em profundidade há uma diferença entre os solos em relação aos níveis de compactação, onde há solos não compactados e solos que por um motivo ou outro apresentam aumento da

densidade ou parte dos poros preenchidos de argila vindo da superfície e, portanto, de redução da porosidade.

Nos perfis latossólicos 1 a 4 de Piracicaba o teor de argila aumenta em profundidade, se argiloso, (perfil 1), ou arenoso (perfil 4), enquanto a densidade decresce, situação correta, pois o teor de matéria orgânica decresce assim como nos demais perfis. No perfil 5, um argissolo, o teor de argila aumenta em profundidade inclusive a densidade, contrário aos perfis 1 e 4. No perfil 6, num perfil latossolo coeso do estado de Alagoas, de textura média-arenoso da Usina Caete, o teor de argila na camada subsuperfície aumenta assim como a densidade, ilustrando com isso que os perfis 1 a 4 apresentam boa aeração enquanto os perfis 5 e principalmente 6, são deficientes em oxigênio na subsuperfície e, portanto, com poucas raízes (Dematte, J.L.I., 2016).

As causas da pouca oxigenação dos perfis 5 e 6 se deve a translocação do material mais fino das camadas superficiais bloqueando os poros das camadas mais inferiores (aumento da densidade). No caso do Perfil 6, em Alagoas, se deve a própria Formação Geológica Barreiras que apresentam tais características além da presença de fragipã, duripã em profundidade variável, de densidade superior a 2,0 g/cm³ (Tabela 55).

Tabela 52 - Perfis 1 a 5 solos da Usina Sta. Helena, Piracicaba. Perfil 6 solo Usina Caeté, Alagoas.

Profundidade cm	Perfil	Argila %	MO g/kg	Densidade g/cm ³	Perfil	Argila %	MO g/kg	Densidade g/cm ³
0-25	1	72	22	1,2	2	26	18	1,45
25-50		73	14	1,2		30	9	1,43
50-100		70	14	1		34	9	1,4
100-120		78	11	1		34	11	1,35
0-25	3	14	12	1,54	4	10	1,0	1,65
25-50		14	12	1,52		12	10	1,62
50-100		20	7	1,51		16	7	1,53
100-120		23	7	1,51		14	7	1,51
0-25	5	12	10	1,58	6	18	1,2	1,43
25-50		28	10	1,58		23	0,9	1,65
50-100		28	7	1,60		25	0,8	1,68

Perfis latossolicos 1 a 4. Perfil 5 argissolo. Perfil 6 latossolo amarelo coeso NE.

Fonte: Levantamento de solos Usina Sta. Helena, Piracicaba 1993 e Usina Caete, Alagoas 1992.

11.6. PRODUTIVIDADE DO MILHO EM PLANTIO DIRETO DEVIDO A COMPACTAÇÃO

O sistema de cultivo associado a compactação influencia a produtividade do milho (Bergamin A.C, 2018). Tal autor induziu a compactação com passadas de trator de 5,0 t em solo de textura média e na cultura do milho em plantio direto. Ele observou que o sistema radicular do milho nas profundidades de 0-5; 5-10; 10-15 e 15-20 cm decrescia, na superfície e em profundidade, à medida que havia aumento das passadas com o trator (Tabela 56).

Analisando a camada 0 a 20 cm de profundidade foram observadas reduções de 55, 78, 82 e 86 no sistema com uma passada, duas, quatro e seis passadas respectivamente comparado ao PD sem passada. Em termos de produtividade do milho, os dados indicam que um sistema de compactação até duas passadas (comparado com sem passada) não seria tão maléfica, porém nos níveis 4 e 6 passadas de trator a produtividade foi maléfica.

Tabela 53 - Sistema radicular de milho em diversas profundidades em solo de textura média com simulação de compactação induzida e produtividade.

Tratamentos	Número de passadas	Profundidade do solo (cm)				Produção mg/ha
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	
		Comprimento radicular (m/m ²)				
PD	Zero	101,1 a	69,4 a	31,7 a	17,7 a	7,7 a
PD 1	1	55,4 b	24,9 b	11,7 b	6,9 b	7,6 a
PD 2	2	21,7 c	13,2 bc	8,4 bc	4,8 bc	7,62 a
PD 4	4	20,1 e	9,75 bc	6,1 bc	3,8 bc	7,11 ab
PD 6	6	16,4 c	7,8 c	4,6 c	2,8 c	6,95 b
CV (%)		37,4	45,8	37,7	38,4	5,51

Fonte: Bergamin, 2018. Modificado, Dourados – MS.

Em relação a anatomia das raízes, na razão do córtex/cilindro vascular (CO/CV), aumentam à medida que a compactação progride indicando com isso que a absorção de água e nutrientes acompanham o incremento da compactação.

11.7. TEOR DE OXIGÊNIO E ABSORÇÃO DE POTÁSSIO E FÓSFORO E O CRESCIMENTO RADICULAR

Na Tabela 57 (Marchener H., 1995), há uma simulação feita em laboratório num solo onde foi aplicado a pressão parcial de oxigênio decrescendo de 20% (teor normal no ar) a 0,5%,

verificou-se que a absorção de fósforo e potássio decresceu em função do decréscimo da pressão parcial de oxigênio. Ao mesmo tempo, em outro trabalho, nota-se que a aplicação de oxigênio crescente na superfície do solo, há aumento do crescimento do sistema radicular assim como da matéria seca, ilustrando com isso que há necessidade de se ter atenuação da compactação para haver absorção de nutrientes e de água, não mostrado.

Tabela 54 - Pressão parcial de oxigênio, absorção de P e K, e oxigênio aplicado na superfície do solo, crescimento de raízes e matéria seca.

Pressão parcial oxigênio	Absorção		Oxigênio	Raízes		Matéria seca
	Superfície do solo	K	P	Superfície do solo	Crescimento	
	%			cm/dia	%	g/planta
20	100	100	0	0,10 a	4,8	0,13 a
5	75	56	2,1	0,43 ab	20,7	0,13 a
0,5	37	30	3,4	1,15 bc	55,3	0,34 ab
			7,8	1,3 c	62,5	0,52 b
			14,6	1,63 cd	78,4	0,60 b
			ar	2,08 d	100	0,54 b

No exemplo de estatística, teste de Tukey 5%.

Fonte: Marchener H., Mineral Nutrition of Higher Plants, 1995.

As variações na absorção de macro e micronutrientes, independente da textura dos solos alguns exemplos devem ser relacionados como os trabalhos feitos na Usina da Barra, safra 2004. Nesta usina e devido ao tráfego na linha de cana-de-açúcar, provocando a deficiência de oxigênio, houve uma redução na absorção de macro e micronutrientes apesar do solo conter quantidades mais que adequadas inclusive para prover elevadas produtividades, o que não ocorreu. Por outro lado, com o tráfego na entre linha, preservando a linha para a cana-de-açúcar houve a absorção de nutrientes, apesar de o solo conter valores menores (Demattê JLI, 2020).

11.8. ESCARIFICAÇÃO COMO AUMENTO DA OXIGENAÇÃO DOS SOLOS

Sabe-se que o teor de oxigênio decresce à medida que o solo se aprofunda. Neste aspecto a escarificação, como medida de aumento da oxigenação, principalmente na superfície devido a respiração das raízes, seria uma medida eficaz. Entretanto num solo arenoso há necessidade de se avaliar seguramente se há ou não necessidade desta operação.

Por outro lado (Moreira S.G. 2019), em áreas compactadas, inclusive em terras arenosas, se adequadamente conduzida a escarificação pode melhorar as condições do solo como a drenagem e as perdas de água e nutrientes assim como aumentar a produtividade (Figura 43).



Figura 43 - Escarificação em solo média-arenosa, sul de Minas Gerais. Fonte: Moreira S.G. (2019)

Plantas de cobertura dissecada como na Figura 44 podem auxiliar evitando a compactação devido a grande quantidade de matéria seca adicionada no perfil de solo assim como na escarificação de solo arenoso (Zancaro L., 2014).



Figura 44 - Neosolo Quartzarênico subsolado. Fonte: Zancaro L. (2014).

11.9. AÇÃO DOS SISTEMAS DE PREPARO CONVENCIONAL E DOS PNEUS DOS EQUIPAMENTOS

Num sistema de preparo do solo convencional, utilizando arado ou grade pesada, pode haver o rompimento da camada compactada, ocasionado por sistemas de cultivo ao longo dos anos. Entretanto, a ação destes implementos pode haver aumento da densidade nos fundos de sulcos logo após a passagem, devido a ação dele no solo. Implementos com hastes subsoladoras podem ser utilizados para romper as camadas compactadas e permitir o desenvolvimento radicular (Brady e Well, 2013).

Em relação aos tipos de pneus sabe-se que apresentam profundidades diferentes de compactação, sendo pneus finos maior profundidade no solo contrariamente pneus grossos Figura 45.

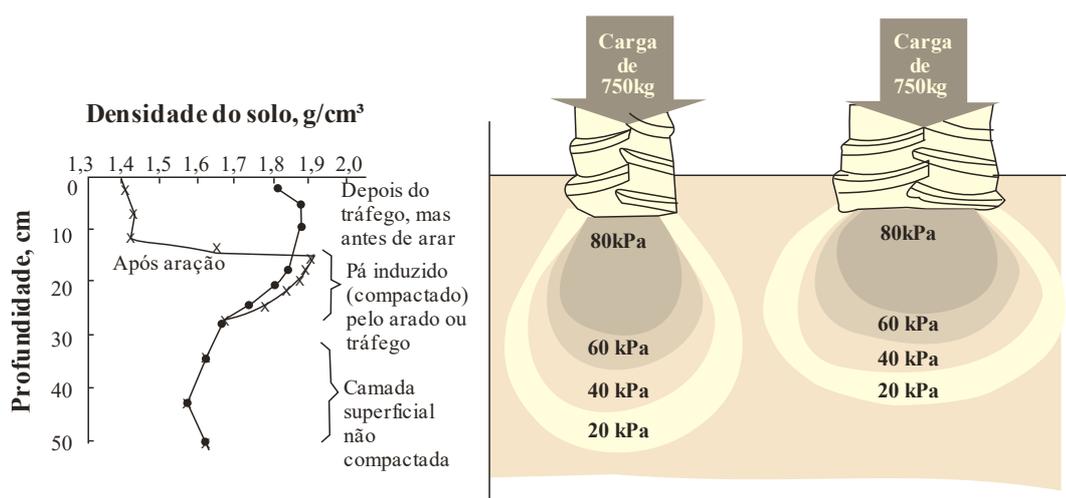


Figura 45 - Ação do arado (A) e (B) Pneus de veículo compactam o solo a profundidades consideráveis. Fonte: Brady e Well (2013).

Entretanto, na maioria trabalhos pesquisados para atenuar a compactação em culturas semi perenes e perenes seria direcionar o tráfego (tráfego controlado) na entre linha da cultura.

Em cana-de-açúcar, na Usina São João, de Araras, na safra de 2016/17, sem o RTK, até os décimos corte, a produtividade (Figura 46) tem indicado uma redução de 26 t/ha entre o primeiro e o segundo cortes e de 14 t/ha entre o segundo e o terceiro cortes num total de perdas de 40 t/ha, principalmente devido aos inconvenientes com a compactação.

No quinto corte em diante, produtividade média destas socas permanece na faixa de 55,8 t/ha com perdas bem menores na faixa de 4 a 6 t/ha, ficando claro que o sistema de compactação e as falhas se definiram e tenderam para uma situação inalterado de compactação (Dematte, J.L.I. 2020).

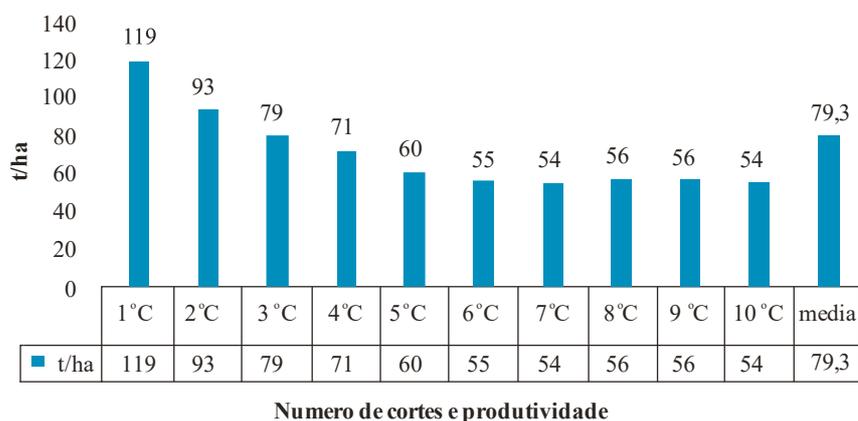
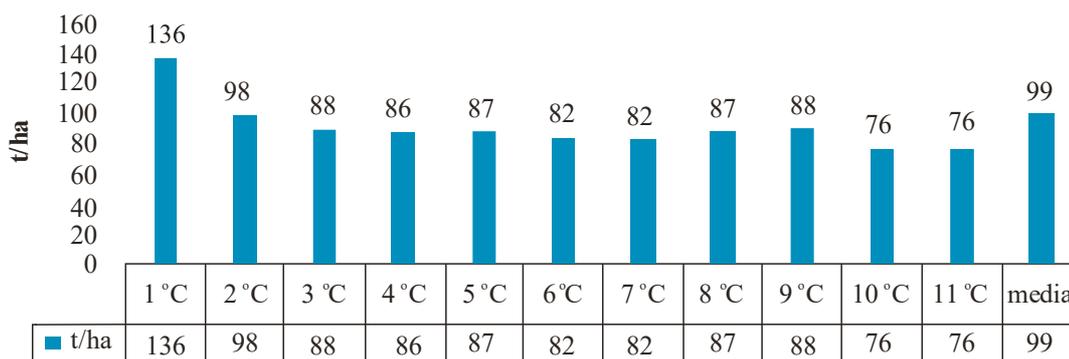


Figura 46 - Usina São João – SP, safra 2015/2016. **Fonte:** Demattê, J.L.I. (2020).

Entretanto, a queda de produtividade entre os cortes da cana-de-açúcar não pode ser levada em consideração quando a linha de cana é preservada pelos tratamentos químicos e os demais cuidados, ficando a entre linha unicamente para o tráfego dos equipamentos. Tal fato tem ocorrido como no fornecedor da Usina Guarani em SP, em solo de textura arenoso (Campanelli, V. C., 2012), como pode ser verificado pela Figura 47.

Observe que é possível manter a produtividade em relação aos cortes da cana-de-açúcar, numa situação completamente contrária as reduções entre os cortes observadas pelas usinas, órgãos de pesquisas e revistas especializadas. Note que neste sistema a média de produtividade tem sido na faixa de 99 t/ha, numa idade média superior a 4,0. A produtividade de 136 t/ha no primeiro corte contra 98 no segundo corte se deve a diferenciação na época de corte, com 16 meses no primeiro corte contra 12 meses no segundo e demais cortes.



Produtividade ao long dos cortes

Figura 47 - Produtividade em t/ha safra 2012, **Fonte:** Campanelli V.C. (2012)

11.10. USO “PENTA” EM SOLOS DE TEXTURA ARENOSA NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

O termo “Penta”, um implemento utilizado em cana-de-açúcar e que numa única passagem, permite romper a camada adensada, num sistema de preparo do solo, introduzir nutrientes químicos assim como o calcário e o gesso, material orgânico e o inseticida.

Num plantio em cana-de-açúcar em terra arenosa de relevo suave ondulado, designado “plantio em lençol” utilizando o “Penta” com profundidade de ação de 50 cm, com RTK, foi plantado a cultura na forma de meiose. Nas banquetas da meiose foi plantada culturas de cobertura em out/nov (Crotalaria juncea) e após o ciclo desta cultura foi plantado a cana-de-açúcar em março de 2014 como se observa na Figura 48, em Lençóis Paulista, praticamente sem erosão e terraços (Demattê, J.L.I., 2020).



Figura 48 - Sulcação em lençol preparo profundo com “Penta”, e plantio em meiose de cana-de-açúcar na Região de Lençóis Paulista em 2014. Foto: Dalben (2014) em Plantio Direto. (Demattê, J.L.I., 2020).

A Figura 49 (A) indica um solo de textura média, em Alagoas na região nordestina, apresentando uma formação especial designada de duripã na base do perfil assim como modelo do “Penta” (B) ele incorporando fertilizantes e compostos e num plantio direto (C, D). O “Penta” tem sido utilizado com a profundidade de trabalho de 0-70 cm ou mais, em relação a profundidade dos solos, indicando que tal efeito pode ser deletério em relação as culturas como tem sido observado. Foi visto que sistemas de compactação induzido pelos equipamentos não atingem tal profundidade (Demattê, J.L.I. 2020) e sendo assim em solos arenosos a profundidade atingida pelo penta é de 0-50 cm.



Figura 49 - (A) representa um solo de textura média no Nordeste com fragipã e duripã na base do perfil. (B) o equipamento do “Penta”. (C) “Penta” sulcando em plantio direto. (D) uso do “Penta” na incorporação de nutrientes. Fonte: (A) Solos da Usina Caete. (B.C.D) Plantio direto com Penta, Lençóis Paulista SP (Demattê, J.L.I. 2020)

11.11. AÇÃO DAS RAÍZES NUM SOLO ARENOSO COMPACTADO

O sistema radicular ao penetrar num solo onde a densidade é superior ao seu desenvolvimento, ele tenta, através do ápice da raiz ou coifa (Zonta *et al.* 2018), aumentar o espaço do diâmetro do poro do solo e se desenvolver. Ocorre muitas vezes que a raiz está num determinado espaço poroso e por uma razão qualquer há aumento da densidade ficando o diâmetro do poro com a raiz no seu interior menor, achatando-a, muito comum nas trincheiras, com pouca absorção de nutrientes, de oxigênio e água. No seu desenvolvimento a raiz é limitada devido a resistência a penetração oferecida pelo solo. Neste caso o ápice da raiz tenta encontrar um novo caminho normalmente numa fissura do solo ou numa raiz que está em decomposição, buscando espaço para se desenvolver e oxigênio solicitado pelo metabolismo da planta e dos organismos do solo.

A resistência a penetração oferecida pelo solo tende a aumentar com o aumento da densidade e diminuir com o teor de umidade. Assim o crescimento radicular é menor quando o

solo compactado é mais seco. Em igualdade de condições de densidade para solos argilosos e arenosos, e de alto teor de água, as raízes penetram mais facilmente num solo arenoso, pois tem menos agregados e maior porosidade ao ar.

Em subsuperfície, se o perfil é latossólico, não coeso, as raízes tendem ir a profundidades onde não há ação da compactação assim como há oxigênio suficiente para o seu metabolismo. Entretanto, o desenvolvimento em profundidade irá depender das características químicas do solo, se favorável ou não ao desenvolvimento. Entretanto, a produtividade da cultura tende a decrescer devido ao sistema de compactação na superfície, se o tráfego não for conduzido de maneira adequada, principalmente na linha de cultura.

A Tabela 58 foi desenvolvida para a cultura cana-de-açúcar, mas nada impede que seja utilizada por outras culturas, e foi baseada principalmente nas observações dos últimos tempos em todo Brasil canavieiro. Em consequência desta Tabela implica em ter valores para solos de variadas texturas, argilosas e arenosas, porém com valores de aumento da densidade tais que a produtividade não é alterada (Demattê, 2020).

Sendo assim há valores da densidade em função do teor de argila e o Volume Total de Poros (VTP). Em relação a textura foi considerado valores na faixa de 40 a 60% ou maiores para solos argilosos a muito argilosos; faixa de 25 a 40 % para solos de textura média-argilosa, faixa de maior que 15 a 25% textura média-arenosa e textura arenosa, igual e abaixo de 15%.

Observe que em solo argiloso há variação de densidade de 0,9 a 1,35 g/cm³ suficiente para o desenvolvimento radicular se desenvolver sem alterar a produtividade, graduação esta que decresce para solos mais arenosos.

A faixa para solos arenosos, sem queda na produtividade da cultura, estaria de 1,60 a 1,75 g/cm³, bem inferior a solos mais argilosos. Na diferença em percentagem pode-se verificar que solos arenosos com valores de 0,15% e 0,65% para os argilosos, sem perda de produtividade.

Tabela 55 - Relação entre densidade do solo, textura, produtividade normal e comprometida.

Densidade g/cm ³	VTP	Classe de textura em porcentagem			
		Argilosa a muito argilosa	Média argilosa	Média arenosa	Arenosa
0,90	66,0	>60, 40 a 60			
1,00	62,2				
1,20	54,7				
1,30	50,9				
1,35	50,0				
1,40	47,1		40 - 60		
1,45	45,3				
1,50	43,4			15 - 25	
1,55	41,5				
1,60	39,6				Até 15
1,65	37,7				
1,70	35,8				
1,75	33,9				
1,80	32,0				
1,90	28,3				
2,0	24,5				

VTP: Volume Total de Poros. Densidade partícula 2,65 g/cm³

Textura: argilosa e muito argilosa, = 60 e > 60. Média argilosa: 25 a 40%

Média arenosa: > 15 a 25. Arenosa 15% a <

Faixa de densidade de produtividade semelhante, sistema radicular normal.

Faixa de densidade menor de produtividade.

Faixa de densidade comprometida, com baixo oxigênio.



Fonte: Demattê (2020).

11.12. SISTEMA RADICULAR EM PROFUNDIDADE NUM SOLO ARENOSO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Os trabalhos foram feitos em solo arenoso e com cana-de-açúcar em 2012 em Lençóis Paulista no espaçamento alternado em cm (1,50/0,90). Na projeção do plantio o sistema radicular é bem desenvolvido, maior próximo a superfície e decrescendo em profundidade podendo atingir 1,5 m ou mais de 2,0 m, com raízes adventícias, raízes de sustentação, raízes de cordão e uma infinidade de pelos absorventes em profundidade, que irá depender da fertilidade do solo. Na entre linha compactada (espaçamento 1,50 cm) devido ao tráfego, na projeção do plantio, o sistema radicular tende, em profundidade, a se dirigir abaixo da entre linha compactada, encontrando com o sistema radicular do outro sulco. Ao mesmo tempo na superfície da entre linha com palha (tráfego), há uma proliferação de raízes absorventes avidas para água e nutrientes (Figura 50). Observe o sistema radicular abundante da subsuperfície

abaixo da camada compactada, na entre linha de 0,90 m e na entre linha de 1,50 m (Dematte, JLI 2020).



Figura 50 - Sistema radicular de uma soqueira de segundo corte em solo arenoso, ilustrando o sistema radicular da entre linha, abaixo da camada compactada. A régua marca intervalos de 10 cm. Fonte: Artioli, J. (2012).

11.13. EFEITOS BENÉFICOS DA COMPACTAÇÃO

Um efeito benéfico da compactação pode ser observado na entre linha de canal de área compactada e sem cultivo, e na entre linha de tráfego com cultivo e num período úmido. O desempenho do tráfego seria melhor na entre linha de tráfego sem cultivo. Em termos de erosão também seria melhor numa entre linha compactada e sem cultivo. Talvez esta seja os principais motivos benéficos de uma compactação na entre linha de tráfego (Demattê, 2020).

Por outro lado, trabalhos com um baixo nível de compactação, 10 ou 15% na linha da cultura, há uma série de efeitos benéficos encontrados na literatura, a saber: melhor ramificação de raízes; maior retenção de umidade a tensões mais elevadas; aumento do fluxo de calor; maior rapidez na germinação (devido a maior quantidade de água); pode reduzir as perdas por erosão; maior efeito dos herbicidas em condições mais secas.

Num experimento, Santos G.A et al (2005) simularam um acréscimo de compactação de 0 a 100%, adicionando 200 ppm de fósforo solúvel. Tais autores obtiveram máximo de absorção de fósforo e de produção de milho com 20% do nível de compactação (Figura 51).

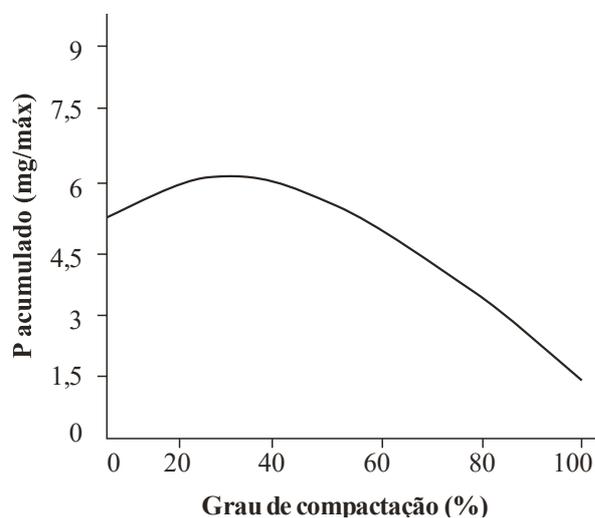


Figura 51 - Quantidade de P acumulado na matéria seca da parte aérea do milho com dose de 200 ppm de P em diferentes graus de compactação (Santos et. Al. 2005). **Fonte:** Santos G.A et al. (2005).

11.14. ALTERNATIVAS PARA ATENUAR O SISTEMA DE COMPACTAÇÃO

As possíveis alternativas feitas até agora tais como sistemas de preparo do solo, pressão e largura dos pneus dos equipamentos, rebaixamento do solo pelo tráfego, quantidade de transbordos na colheita, teor de umidade do solo (Bellinasso, I.F, 1997) são fatores devidamente conhecidos e estão sendo posto em prática.

Entretanto, é extremamente difícil ajustá-los durante uma determinada safra, pois são fatores de difícil mensuração na maioria dos casos, como as condições variáveis do clima e outros componentes. Entretanto, as culturas devem ter a entre linha preservada para o tráfego e a linha preservada para a cultura (Demattê, J.L.I. 2020).

Entretanto, há uma série de limitações em relação a este tema de compactação na linha da cultura numa sulcação em nível com GPS, podendo ocorrer tráfego na linha de cana-de-açúcar ou de culturas anuais em percentagem difícil de estimar, porém não sendo superior a 20 ou 25% dependendo do relevo. Numa sulcação em nível (designada em lençol) será dependente

da topografia do terreno, principalmente nas curvas, ou eventualmente falhas de sinal no GPS alterando a direção de sulcação e espaçamento ou dependendo do número de transbordos da colhedora que tendem a trafegar nas linhas da cultura etc.

Numa sulcação reta e com terraços passantes, há necessidade de se levar em conta a torção da máquina na passagem nos terraços, neste caso sempre haverá tráfego sobre a linha das culturas.

A maneira de se atenuar tais inconvenientes em termos de evolução dos equipamentos, seria o corte da cultura em maior número de linhas, reduzindo assim o nível de compactação devido aos pneus da máquina. Neste caso, nem toda a área agrícola seria adequada para tal sistema, mas cabe aos líderes indicarem as áreas mais favoráveis a este tipo de corte, com maiores números de linhas, ficando os demais talhões para o sistema convencional.

11.15. COMPACTAÇÃO DE SOLOS: UM PROBLEMA ANTIGO

O aumento da densidade, independentemente da textura do solo, ou seja, a compactação é extremamente importante na área agrícola, pois altera uma série de fatores relacionados à produtividade, mas principalmente com o crescente advento da mecanização e da palha. Tal atributo tem sido estudado pelo setor agrícola buscando alternativas para redução do impacto negativo do sistema. Devido a sua importância na área agrícola tem sido observado, em outros países, a mais de 60 anos, nas áreas experimentais, sendo asfaltado ou a colocação de trilhos na linha de tráfego dos equipamentos justamente para atenuar a compactação (Brady N.C. e Weil.R.R., 2013).

CAPÍTULO 12: A ÁGUA NO SOLO

12.1. ASCENSÃO CAPILAR

A capilaridade nada mais é do que as duas forças de coesão e adesão (adsorção), característica da água, subindo num capilar, numa relação entre o raio do capilar e a ascensão da água, quanto menor o capilar maior a ascensão. A altura de ascensão capilar (h) seria o inverso do raio do capilar (r) ambos em cm, a 20°C (Brady N.C. e Weil R.R., 2013).

Na ascensão do capilar há na interface capilar a formação de um menisco no capilar. A pressão menor sobre o menisco permite que a maior pressão sobre o líquido, que não está em contato com a parede lateral do capilar, empurre a água para cima até que seu peso equilibre a pressão diferencial da largura do menisco.

A ascensão capilar nos solos depende de uma série de fatores entre os quais o teor de argila (solos argilosos apresentam maior número de poros finos do que os arenosos), a formação de capilares de diâmetros compatíveis e a heterogeneidade dos poros nos solos (os poros não se interligam, independentemente da textura).

Nos solos arenosos são mais propensos a terem ascensão capilar maior comparado com solos argilosos, porém em termos de tempo, no caso de dias, os argilosos apresentam maior ascensão. O movimento capilar não é somente de ascensão, podendo ser em diversas direções.

12.2. POTENCIAL DA ÁGUA DO SOLO

Na “Água do Solo” elas se ligam através das forças de adesão da água no seu lado positivo com os coloides negativos. À medida que esta água se desloca do centro de carga do coloide (coesão) estaria perdendo sua força de atração estando sujeita a força gravitacional. Nesta relação há uma série de divisões designadas de Potenciais. Todos estes potenciais atuam simultaneamente no movimento da água no solo.

A definição de potencial da água seria a diferença entre um solo com água saturada e um solo seco, se deslocando da zona úmida para a zona seca. Num solo encharcado as moléculas de água estão se movimentando livremente, longe da superfície do coloide. Num solo seco a água do solo está num filme delgado, adsorvida as cargas do coloide do solo, com elevadas pressões.

- Potencial gravitacional (P_g): a força da gravidade atrai a água para o centro da terra, sendo o produto da força de gravidade e da altura do solo acima de um plano de referência. O plano de referência escolhido é sempre no perfil do solo, no seu limite inferior, garantindo que o potencial gravitacional acima deste ponto seja sempre positivo. Após fortes chuvas ou sistemas de irrigação, a força da gravidade desempenha um importante papel na remoção do excesso desta água.

- Potencial de pressão: responsável pela pressão hidrostática positiva decorrente do peso da água em solos saturados (pressão gravitacional) e pela pressão negativa decorrente das forças de atração entre a água e os sólidos ou matriz do solo.

- Potencial hidrostático: componente responsável somente pelas zonas saturadas com água abaixo do lençol freático.

- Potencial matricial: sempre negativa, pois seria a atração da água para a superfície sólida dos colóides do solo e dos poros. Promovem o movimento da água do solo de áreas mais úmidas (estado de alta energia) para áreas mais secas (estado de baixa energia) ou de poros grandes para poros menores.

- Potencial osmótico: atribuído tanto a presença de solutos inorgânicos como orgânicos na solução do solo, reduzindo assim o potencial da água. Quanto maior a concentração de solutos menor seria o potencial osmótico. Como sempre a água se direciona onde seu nível de energia é menor, para a zona de maior concentração de soluto (sais). Existindo uma membrana semipermeável à água, (osmose) ela permite a passagem da água, mas não do soluto. Tal sistema passa a ser importante numa área de raízes onde há membranas semipermeáveis, como na absorção radicular (Brady N.C. & Weil R.R. 2013). Em solos salinos o potencial osmótico da água do solo é baixo para fazer com que as plântulas pereçam a média que a água caminhe das células da planta para a zona de menor potencial osmótico.

12.3. EQUIVALÊNCIA ENTRE AS UNIDADES

As unidades representativas da água de solo estão indicadas na Tabela 59.

Tabela 56 - Equivalentes entre expressões de potencial de água do solo e o diâmetro equivalente de poros esvaziados de água.

De poros esvaziados de água			
Altura da coluna unitária da água	Potencial de água do solo	Potencial de água do solo	Diâmetro equivalente de poros esvaziados
cm	bars	kPa	um
0	0	0	
10,2	-0,01	-1	300
102	-0,1	-10	30
306	-0,3	-30	10
1020	-1	-100	3
15300	-15	-1500	0,2
31700	-31	-3100	0,97
102000	-100	-10000	0,03

kPa: quilo Pascal.

Fonte: Brandy e Weil (2013)

Solos arenosos apresentam menores quantidades de água do que solos argilosos. Tal fato não indica que tais terras seriam negligenciadas para a agricultura, pois sabendo de sua frágil constituição que apresenta baixo teor de argila e de matéria orgânica em consequência baixa agregação. Porém, os dados aqui apresentados sugerem que as terras arenosas são adequadas para os cultivos em igualdade de condições com solos mais argilosos.

12.4. SOLOS ARENOSOS E A COMPACTAÇÃO

Após uma chuva ou irrigação, terras arenosas apresentam maior disponibilidade de água do que solos argilosos em menor tempo (pois a saturação do solo é menor).

Por outro lado, tem-se observado que solos arenosos que apresentam maior quantidade de areia fina, teriam maior quantidade de umidade, do que solos arenosos com dominância de areia grossa. Neste aspecto uma compactação na camada superficial pode induzir que as partículas de areia se juntem e em consequência teria maior potencial de retenção de umidade. Chegou-se a observar que em um solo arenoso, sem compactação, teria 0,3 a 0,6 de volume de poros para ar (cm^3/cm^3), e com compactação severa o teor de ar foi reduzido em 76,6%,

indicando que uma compactação em solos arenosos pode aumentar a quantidade de água retida (Brandy e Weil, 2013).

12.5. FLUXO DE ÁGUA NO SOLO

Nos solos há diversos tipos de fluxos reconhecidos tais como, fluxo saturado ou percolação (quando os poros estão totalmente preenchidos por água); fluxo não saturado (os poros maiores estão preenchidos por ar) e movimento de vapor (quando diferenças de pressão de vapor ocorrem em solos secos).

12.5.1 Fluxo Saturado

No caso de um fluxo saturado a quantidade de água por unidade de tempo Q/t em cm^3/s ou a quantidade de água que flui para fora do sistema, pode ser expressa pela fórmula de Darcy,

$$Q/t = AK \cdot \Delta x^1 - x^2 / L$$

Onde:

A (área transversal da coluna, cm^2),

K (condutividade hidráulica saturada, em cm/s ou cm/h), e o gradiente do potencial da água ($x^1 - x^2 / L$) todos em centímetros (cm).

No caso do K (condutividade hidráulica saturada) ocorre também na horizontal. A Figura 52 ilustra o movimento do fluxo saturado, vertical e horizontal, em solo arenoso e em solo argiloso. No solo arenoso a profundidade do fluxo vertical é maior do que no argiloso, porém, o fluxo horizontal é maior do que no solo arenoso, ilustrando com isso que o espaçamento das culturas irrigadas seria menor em solo arenoso.

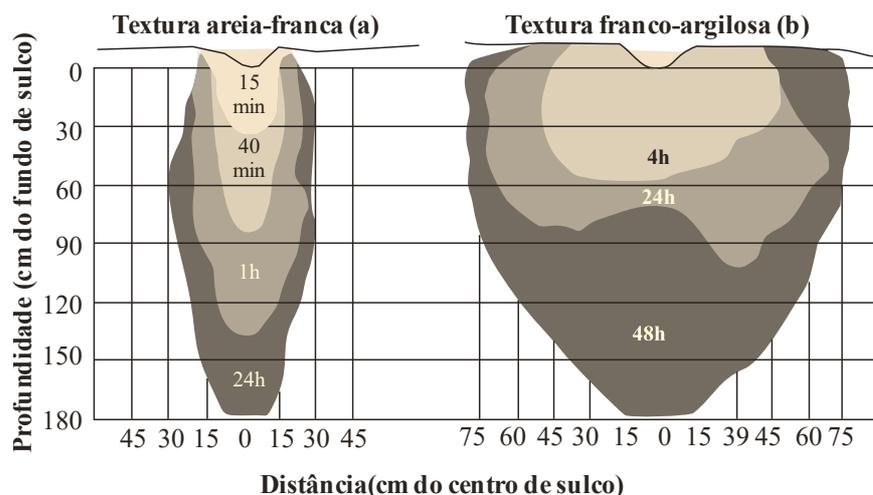


Figura 52 - Taxas comparativas de movimento da água de irrigação em dois solos: um de textura areia-franca e outro franco-argilosa. Note a taxa de movimento muito mais rápido na areia-franca, especialmente em sentido descendente. **Fonte:** Brandy e Weil (2013)

12.5.2. Fluxo em Solo Não Saturado

Neste fluxo é ligado ao gradiente devido ao potencial matricial, normalmente associado aos microporos, com a água se movendo da região úmida para a região seca do solo ou numa tensão de -1 kPa a -100 kPa. Porém em altos valores de potencial (solo muito úmido) a condutividade de fluxo não saturado é maior nos solos arenosos.

12.5.3. Fluxo de Movimento da Água em Forma de Vapor

No interior do solo a água na forma de vapor se move de um solo úmido (alta pressão de vapor) para uma região seca (menor pressão de vapor), ou então de uma região de baixo teor de sal (alta pressão de vapor) para uma área de elevado teor de sal como um fertilizante (baixa pressão de vapor). Neste caso o fertilizante reduz a pressão do vapor de água estimulando o movimento da água nos agregados circundantes. Tal movimento é em função da temperatura do solo. Num deserto a noite a temperatura é baixa e a pressão do vapor tende a subir no solo, da região mais quente, no interior do solo, para a mais fria, na superfície.

12.5.4. Fluxo Preferencial da Água

Neste caso há necessidade que o solo contenha grandes macroporos, devidos às galerias de macrofauna (minhocas, cupins, migdolos), raízes queimadas ou rachaduras do próprio solo,

bioporos. Nesta situação os solutos dissolvidos na superfície dos solos tais como produtos químicos, não de interesse para o vegetal, são rapidamente transportados para baixo, num movimento não uniforme de água conhecido como Fluxo Preferencial ou Fluxo Desviado (Brady e Weil, 2013), sendo que as maiores partes das águas que fluem através dos grandes macroporos não entram em contato com a matriz do solo. Neste sentido o K pode aumentar tanto em solo arenoso como em solos argilosos.

12.6. INFILTRAÇÃO E PERCOLAÇÃO

No caso da Infiltração ela pode ser no sentido horizontal e vertical.

Infiltração: é a passagem da água da superfície, através da irrigação ou chuvas, para o interior do solo, e a taxa na qual a água que nele penetra é denominado de infiltrabilidade ($i=Q/A+r$) onde Q quantidade de volume de água medida em m^3 , A (área em m^2) o tempo (em segundos) e o i (em m/s ou cm/h).

Após a água penetrar no solo ela se move no sentido vertical ou horizontal onde a matriz do solo e o K saturado e o potencial gravitacional dominam num processo designado de percolação e a taxa deste movimento está diretamente relacionada com a condutividade de solo. Nestes processos há diversas fases, como ilustrado na Figura 53.

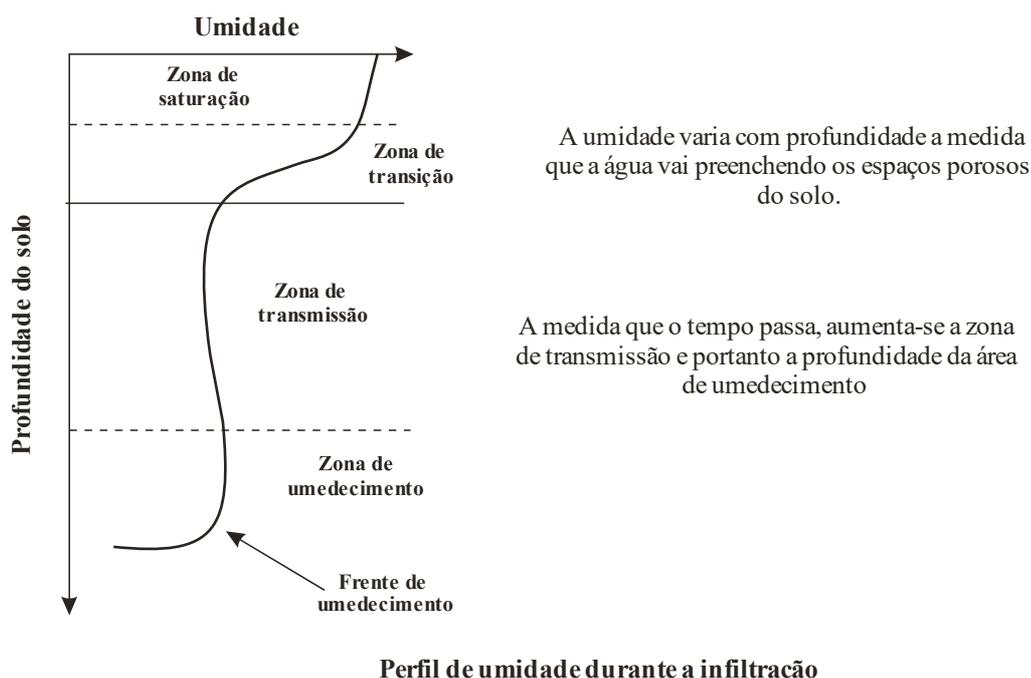


Figura 53 - Processo de Infiltração (Demattê, J.L.I. 2016).

- Zona de saturação: nesta primeira fase ocorre o K saturado, porosidade completada com água e profundidade do solo que irá depender das condições do sistema. Normalmente em solo seco a zona de saturação é maior em solo argiloso do que no arenoso, mas não vai além de milímetros ou poucos centímetros.

- Zona de Transição: logo em seguida, seria uma zona de acomodação da água, com uma queda rápida no teor de umidade do solo, tendendo para ajustes para a Zona de Transmissão.

- Zona de Transmissão: nesta zona apresenta um potencial de umidade constante superior a 0,02 bar, abaixo do teor de água de saturação e acima da capacidade de campo. Sua espessura aumenta com o tempo. Nesta zona normalmente, a maior do sistema de infiltração, irá tender para uma Zona de Umedecimento

- Zona de umedecimento: teores de água menor, porém ainda possível de ser absorvida pelas plantas.

Frente de Umedecimento ou de molhamento: no contato solo seco e úmido. Pode haver, dependendo da profundidade do solo, uma área ou horizonte sem umidade, seco.

12.7. MOVIMENTO DA ÁGUA EM SOLOS ESTRATIFICADOS

Em solo onde há uma camada intercalar de porosidade diferente, no caso de um fragipã ou duripã ou mesmo uma camada de cascalho ou de areia, pode interferir na percolação. Tal fato pode ser induzido inclusive pelos agricultores que através de aração incorpora resíduos de maior porosidade ao solo. Em tais casos a percolação é bloqueada pela camada diferente de porosidade (tanto camada com microporos como predominantemente de macroporos), resultando em teor de umidade maior na camada a jusante da estratificação, fazendo com que a frente de molhamento se espalhe pela camada horizontal. Tal fato pode ser explicado pelos macroporos, no caso da camada arenosa, exercendo menor atração pela água do que poros mais finos do material subjacente. Sendo assim a água que se move para baixo se acumulará sobre a camada de areia saturando os poros na interface solo-areia. Quando isso ocorre, a água tenderá a ser absorvida pela camada arenosa.

Num caso de ascensão de água a camada diferenciada de porosidade pode também interferir da mesma maneira que uma percolação.

12.8. PERIGOS DE RASPAGENS, QUEDA DE PRODUTIVIDADE

Nos argissolos arenosos e em cana-de-açúcar há procedimentos que não devem ser executados tais como raspagens desnecessárias quebrando o efeito da ascensão da água das camadas mais arenosas sobre camadas mais argilosas em relação a quantidade de água do solo. O caso ilustrado na Tabela 60 ocorreu num argissolo de textura arenosa da Usina Bonfim, SP. O solo tem 12% de argila na camada superficial (0-40 cm) e 27% no horizonte Bt, que apresenta restrição ao desenvolvimento, devido a menor porosidade na profundidade 40-100 cm e com água disponível de 67 mm e numa produtividade de 90 t/ha (Prado H., 2006).

No outro caso, (Tabela 60) seria o mesmo solo, raspado, removendo a camada arenosa da superfície. A profundidade de 0-100 cm com 24 e 28% de argila com água disponível de 86 mm sendo que este solo perdeu os 12% de argila da camada superficial devido a raspagem. Com isso apesar da água disponível ter sido aumentada, a produtividade foi de 50 t/ha.

Tal fato seria devido a questão da ascensão capilar da camada Bt para a camada superficial mais arenosa, que bloqueou a ascensão da água (devido a macroporosidade). Neste aspecto tais solos seriam considerados muito produtivos devido a camada arenosa na superfície que impede que a água da camada de subsuperfície se perca fazendo com que tais solos sejam mais produtivos do que os solos argilosos. Neste caso há também o efeito do sistema radicular na camada mais densa do solo (de maior densidade) que não consegue se desenvolver.

Tabela 57 - Teor de argila, água disponível e produtividade em argissolo arenoso.

Camadas cm	Argila %	Água disponível mm	Produtividade t/ha
0 – 40	12	15	
40 – 100	27	52	
	39	67	90
0 – 20	24	17	
21 – 40	28	17	
41 – 100	28	52	
	80	86	50

Fonte: H. Do Padro, modificado. Usina Bonfim.

12.9. FATORES QUE AFETAM A INFILTRAÇÃO

Diversos fatores alteram a infiltração dos solos (Brady e Weil, 2013).

- Tempo: a taxa de infiltração decresce com o tempo. Testes têm demonstrado que a velocidade de infiltração, em cm/hora, de zero a dez, nos primeiros 50 minutos num solo seco, a taxa de infiltração decresceu de 10 para 2,5, ficando com uma taxa bem mais lenta, praticamente paralela ao eixo dos X, de 50 a 300 minutos.

- Teor de umidade inicial: a taxa de infiltração decresce com aumento da umidade onde haverá menor diferença entre os potenciais de água nas zonas de saturação e de molhamento diminuindo a força provocada pelo gradiente de potencial.

- Tipo de vegetação: a vegetação natural ou cultura de cobertura viva ou morta nas terras utilizadas para cultivo, o processo erosivo assim como o sistema radicular tem grande influência na maior infiltração das águas.

- Condutibilidade hidráulica (CH): quanto maior for a CH maiores serão os valores da velocidade de infiltração. Camadas de reduzidas permeabilidades como compactação, argissolos, camada Bt, fazem decrescer a taxa de infiltração.

- Matéria orgânica do solo: adição de MO favorece a infiltração assim como o desenvolvimento radicular.

- Razão de aplicação de água: quanto maior for a razão de aplicação de água, mais profunda será a frente de molhamento.

- Textura e estrutura do solo: solos arenosos apresentam maior velocidade de infiltração do que os argilosos.

- Variabilidade espacial: num mesmo terreno pode haver diferenças na velocidade de infiltração devido às variações do sistema de manejo e da topografia.

- Solos estratificados: num caso de argissolo, de textura mais arenosa na superfície e mais argilosa na subsuperfície, terá uma taxa de infiltração comandada pela camada mais argilosa, portanto mais lenta. Num caso de camada argilosa e a seguir uma arenosa faz com que a infiltração seja bloqueada pela camada mais arenosa.

12.10. TEORES DE UMIDADE DO SOLO

A porosidade de um solo pode ser tomada por 100% de água numa situação de encharcamento. À medida que um solo encharcado vai secando, uma série de pressões ocorre em relação a esta água assim como na relação com as plantas e organismos que ali vivem. O processo de secamento atinge os micros poros fazendo com que a distância desta água em relação ao centro de cargas do coloide, tende a ficar cada vez menor, atingindo a forma de vapor, num filme delgado, tamanha é a tensão exercida pelo solo (Brady e Weil 2013).

Sendo assim esta água retida pelo solo há uma série de divisões relacionadas às diferentes tensões funcionando como um contínuo de umidade do solo e não deve ser interpretado supondo que esta água exista sob diferentes formas (Figura 54).

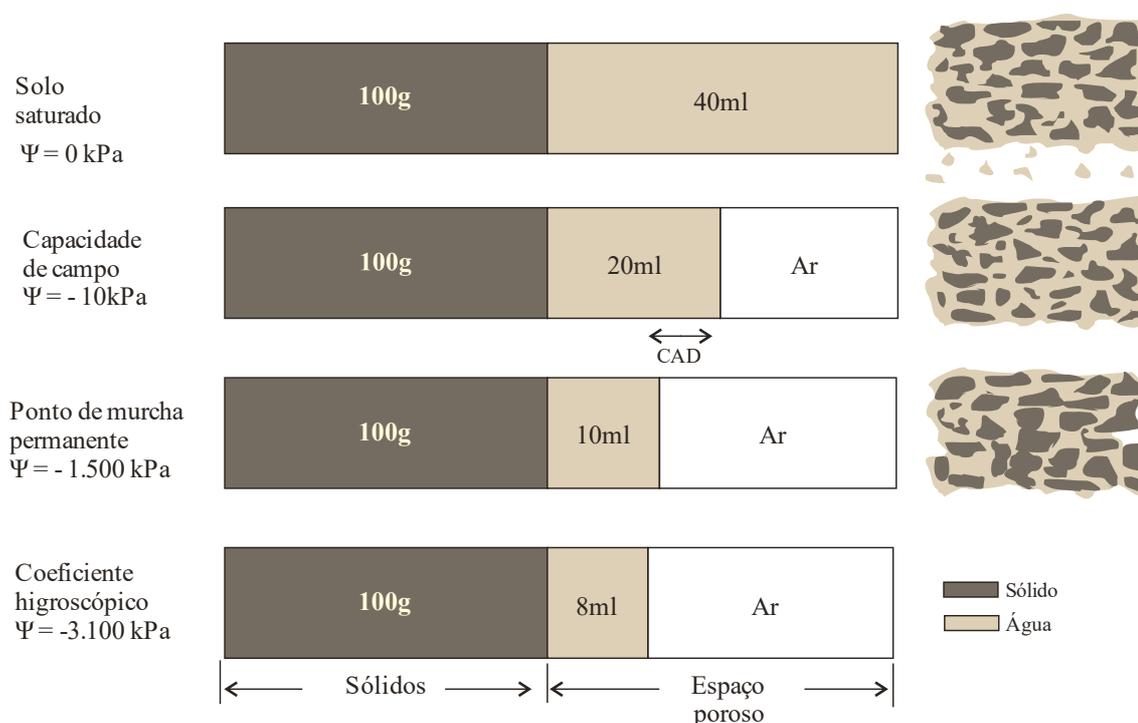


Figura 54 - Teores de umidade em função da quantidade de umidade do solo. **Fonte:** Brady e Weil 2013.

Capacidade máxima de retenção de água: quando todos os poros estão preenchidos com água e neste caso o potencial matricial está perto de zero, sendo que o teor volumétrico desta água corresponde a porosidade total do solo. A força de retenção desta água na superfície do coloide (com todos os poros cheios de água) a medida se distancia do centro de carga, a força da gravidade irá agir designado de Água Gravitacional.

Capacidade de campo (CC): depois que chuvas ou irrigação cessam, a água nos poros maiores irá drenar para baixo devido ao potencial gravitacional. De um a três dias após este rápido movimento descendente, que tende a diminuir para valores insignificantes, à medida que o potencial matricial exerce sua força ficando na faixa de -10 a -30 kPa. O espaço poroso permite ter ar em quantidade suficiente para o crescimento das plantas e atividades dos microrganismos aeróbicos. Nesta situação o movimento da água continuará a ocorrer, porém lentamente nos micros poros, pois as forças matriciais controlam esta água. Em poros ainda menores a água é designada de capilar. Convém salientar que água gravitacional corresponde a faixa de água que está entre a capacidade máxima de retenção e a capacidade de campo. Tal bloco de água é responsável por transportar parte dos produtos químicos aplicados na superfície e dissociados tais como íons, moléculas, contaminantes orgânicos e que podem poluir o lençol freático. A capacidade de campo corresponde a quantidade de água correspondente para as mobilizações do solo como aração, cultivo etc.

Ponto de murcha permanente (PMP) ou coeficiente de murcha: as plantas retiram água, gastando energia, através do sistema radicular nos poros maiores do solo (potencial de água é elevado) e a mediada que está seca, as raízes (com mais energia) extrai água dos micros poros com tensões cada vez maiores em relação ao centro de carga do coloide, fazendo com que as plantas têm uma maior resistência de extração desta água. Neste aspecto há necessidade de saber que há forças agindo tanto da molécula de água, em direção ao centro de carga do coloide, como do sistema radicular na absorção desta água. Tais extrações correspondem ao aumento da energia que o sistema radicular faz em relação a abstenção da água. Neste estado, onde a planta não consegue retirar mais água do solo é designado de Ponto de Murcha Permanente (PMP), e por convenção na faixa de 1.500 kPa. Porém o solo ainda pode ter água numa fina película não disponível as plantas.

Água disponível: A água disponível para as plantas seria o intervalo entre a capacidade de campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP) e o intervalo é designado de Capacidade de Água Disponível (CAD). Porém há necessidade de entender que desde a CC até o PMP o sistema radicular gasta energia crescente para extrair esta água assim como as moléculas de água são cada vez mais retidas pelas forças do centro de carga do coloide.

Coefficiente higroscópico: o solo contém ainda umidade, maior nos solos argilosos e menores nos arenosos, principalmente nos micros poros, porém a planta não consegue retirar tal umidade. Tal ponto é designado de coeficiente higroscópico, com uma retenção de água de -3.100 kPa. Neste estágio a película de água é de apenas 4 a 5 moléculas de espessura e está tão

firmemente retida que a maior parte dela não está na fase líquida, se movendo somente no estado de vapor. O solo ainda retém umidade até a faixa superior a -100.000 kPa (Brady E Weil 2013).

12.11. PROFUNDIDADE DO SOLO E QUANTIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL

O volume total de água disponível irá depender do volume total de solo explorado pelo sistema radicular das plantas. Em relação ao desenvolvimento radicular, a literatura mundial indica que a maioria das culturas de grãos, semi perenes e perenes estaria na faixa de 0-50 cm da superfície do solo. Entretanto, no Brasil a maioria de solos são de baixa fertilidade e com alumínio em profundidade, portanto a recuperação química desses solos proporciona maiores desenvolvimento radicular, como visto em Morelli, J. *et al.* (1992) em cana-de-açúcar assim como em outras culturas.

Em relação a este aspecto a quantidade, em percentagem de sistema radicular, tem sido observada em Rajj B van (2008) que apenas 4% sejam suficientes para bombear água nas camadas mais profundas dos solos.

Em climas tropicais úmidos tem sido encontrado quantidade de raízes na profundidade de 0-50 cm para culturas anuais, 0-100 cm para culturas semi-perenes e maiores deste patamar para culturas como pastagens. Em climas mais secos tal profundidade pode ser maior inclusive em irrigação de pivô e gotejo como nas regiões do Estado do Piauí em solos arenosos.

12.12. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO (CAD)

A CAD pode ser estimada em relação aos tipos de solos levando-se em consideração as camadas que os constituem. Assim, a CAD seria determinada no intervalo da capacidade de campo e ponto de murchamento permanente, em %, D_s : densidade do solo (g/cm^3): densidade da água, D_a (cm^3/g): h profundidade do solo em cm, de acordo com a equação a seguir:

$$CAD = (CC - PMP) \times D_s \times D_A \times h.$$

Em relação às unidades considerando a CC de 4,17 (%), PMP de 2,34 (%) a densidade de 1,5 g/cm³ e a profundidade de 20 cm. Substituindo na equação tem-se:

$$CAD = (4,17/100 - 2,34/100) \times 1,6 \text{ g/cm}^3 \times \text{cm}^3/1,0 \text{ g} \times 20 = 0,5312 \text{ cm de água disponível ou } 5,31 \text{ mm}$$

No caso da diferença entre a CC e o PMP as unidades se cancelam (g/100 g – g/100 g); as densidades do solo e da água se cancelam, portanto, a CAD estaria representada pela quantidade de água disponível do solo, símbolo h, na profundidade estabelecida.

A determinação do CAD para o solo na profundidade 0-100 cm seria em relação as suas camadas ou horizontes (Tabela 61). Foi determinada a quantidade de água disponível para solos de textura arenosa na faixa de 0-100 cm assim como solos de textura média-arenosa (Demattê, J.A.M., 2019).

Tabela 58 - Quantidade de água disponível em milímetros em função de solos arenosos.

Solo	Prof. cm	Textura %	Densidade g/cm ³	Umidade % graviétrica		AD %	h mm
				0,33 atm	15 atm		
AQ2-5	0-20	9	1,6	3,1	2,3	0,8	2,6
	21-60	12	1,6	3,3	2,1	1,2	5,2
	61-100	16	1,6	3,9	2,5	1,4	8,9
							16,7
AQ3-5	0-20	7	1,6	2,8	2,1	0,7	2,2
	21-60	12	1,6	3,6	2,5	1,1	7,0
	61-100	15	1,6	4,2	3,1	1,1	7,0
							16,2
AQ2-4	0-30	10	1,60	3,9	2,4	1,5	7,2
	31-60	14	1,59	3,2	2,1	1,1	5,2
	61-100	16	1,58	3,7	2,5	1,2	7,6
							20
LE3-5	0-20	14	1,5	5,4	3,6	1,8	5,5
	21-60	14	1,5	5,7	3,6	2,1	12,6
	61-100	18	1,5	5,9	3,6	2,3	13,8
							31,9
LE2-4	0-20	18	1,4	6,1	3,3	2,8	7,8
	21-60	22	1,4	6,1	3,3	2,8	15,6
	61-100	32	1,4	6,1	3,3	2,8	15,6
							39

Fonte: Levantamento pedológico das unidades da Raizen no Oeste de São Paulo e Lagoa da Prata – MG. LE2 latossolos médio argilosos, LE4 medio arenosos, AQ neossolos quartazenicos

Em relação a tais aspectos, solos arenosos apresentam diferenças em relação a quantidade de AD, variando de 16 mm (caso de Neossolos quartzarênicos) até 40 mm para os casos de perfis latossólicos ou argissolos como foi observado, porém arenosos.

Tem sido estabelecido que nestas regiões seja prudente levar em consideração o intervalo de água disponível maior. No caso de usar a tensão de -0,3 atm (ou -30 kPa) seria interessante utilizar -0,1 atm (ou -10kPa) como tem sido aventado.

12.13. RETENÇÃO DE ÁGUA ALÉM DO PMP

Em relação a dinâmica da água disponível no solo no intervalo da capacidade de campo (-30 kPa) e ponto de murchamento (-1.500 kPa) é considerado intervalo onde as plantas podem retirar água e nutrientes gastando energia, menor próximo a capacidade de campo e maior próximo a ponto de murchamento. Entretanto, além do PMP o solo ainda continua úmido, como no exemplo considerando a umidade a -3.100 kPa (Tabela 62), em função do potencial de retenção de umidade, com maior quantidade de água nos solos argilosos e menor nas terras arenosas (Demattê, J.A.M. 2019). Tal indicação poderia haver enganos dos líderes de campo argumentarem que as terras estão úmidas e, portanto, devem ser plantadas, quando na verdade o solo não pode absorver.

Tabela 59 - Teor de água em relação a tensões de retenção em kPa de solo saturado até -31000.

Solo	Prof. cm	Umidade com base em volume (cm ³ H ₂ O/cm ³ solo)						Densidade g/cm ³
		0	-10	-30	-100	-15000	-3100	
AQ2-4	0-30	43	23	19	16	12	10	1,65
	30-60	39	19	16	14	10	7	1,59
LA2-4-ah	0-30	52,82	31,27	27,03	25,18	21,61	17	1,3
	30-60	49,94	27,38	24,4	22,94	19,41	13	1,31
NV1-4-am-PL	0-30	54,16	43,8	42,44	41,15	37,96	32	1,41
	30-60	57,69	43,19	40,83	39,37	35,66	29	1,22

Unidades em kPa. Símbolos nos solos correspondem à textura e a saturação de bases.

Fonte: Demattê, Levantamento de solos da Usina Prata – MG.

12.14. FATORES QUE AFETAM A QUANTIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL (CAD) DO SOLO PARA AS PLANTAS

Textura do solo: solos argilosos apresentam maior quantidade de CAD do que solos mais arenosos. Em relação ao teor de argila e na profundidade de 0-100 cm, os solos podem ser classificados em função da Quantidade de Água Disponível (CAD) e da designação correspondente (Tabela 63), tais como ADA, significando Água Disponível Alta e assim por diante (Demattê, JLI e Demattê, JAM, 2009).

Plantas que crescem em solos arenosos são mais propensas aos veranicos e sofrem mais do que solos mais argilosos. Devido a tal fator seria interessante em termos de manejo de tais solos mais arenosos, reduzir a evapotranspiração escolhendo uma situação que eles não estejam sendo influenciados pelos veranicos, como práticas que retenham mais umidade nos solos como plantio direto e plantas de cobertura ou então aplicação aérea de produtos que reduzem a evapotranspiração ou use o sistema de irrigação.

Tabela 60 - Teor de argila, CAD e designação em solo de pH dependente.

Teor de argila (%)	Capacidade de água disponível (CAD)	
	mm/100 cm de solo	Designação
Sem gradiente textural		
>60	>100	MA
35 a 60	90 a 100	ADA
25 a 35	60 a 90	ADA/ADM
15 a 25	40 a 60	ADM
10 a 15	20 a 40	ADB
<10	<20	ADMB

MA: Água disponível muito alta; ADA: alta; ADM: média; ADB: baixa; ADMB: muito baixa.

Solos acricos: CAD 40 a 60 e Argissolo areia/média 40 a 90 mm/100 cm de solo.

Fonte: Demattê, JLI e Demattê, JAM. (2009)

12.15. ADIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA

O teor deste componente quando aplicado nos solos é ávido por água (Brady N.C.e Weil.R.R., 2013) e devido a tal fato apresenta uma faixa menor de água disponível, tanto nas baixas tensões, como na capacidade de campo (CC), como em altas tensões, como Ponto de Murcha Permanente (PMP).

Levando-se somente a MO retêm mais umidade do que um solo mineral nas mesmas condições. Por outro lado, há evidências que se for usado a adição de matéria orgânica em solo

seco, devido as suas características, pode atrair as poucas moléculas de água do solo, tornando-o mais seco.

Tal situação foi observado na Usina da Barra em 2015 (Demattê, J.L.I., 2015) no tratamento com torta de filtro, (TF, rico em matéria orgânica) e o plantio de muda pré-brotada (MPB). Com o TF localizado no sulco a MPB morreu, devido a avidez pela água da TF, enquanto ela espalhada no sulco de plantio a MPB não morreu.

Entretanto, há uma série de benefícios da TF e uma delas com uma quantidade apreciável de MO se aplicada em solo faz com que tenha uma melhor agregação das moléculas dos solos, aumentando a porosidade do solo, teria uma sensível melhoria na permeabilidade.

12.16. RELAÇÃO SOLO-PLANTA-ATMOSFERA (SPA)

A água se desloca de regiões mais úmidas do solo para as mais secas e neste aspecto há uma relação direta entre o solo, sistema radicular, planta e atmosfera. Tal sistema, desde o solo até a atmosfera, incluindo a planta, gasta energia. A relação em kPa seria que o solo dispense de -50 kPa para chegar ao sistema radicular da planta e o tal sistema dispense de -70 kPa para penetrar na planta. No caminho da água no interior da planta nos diversos sistemas inclusive no xilema e floema e na ascensão pelos caules (Fernandes, S. F et al. 2018) terá que dispende energia para suprir a ação do metabolismo e enzimas até a superfície das folhas de -500 kPa. Neste particular cerca de 1,0% de água absorvido pela planta é consumida em atividades metabólica, as demais se perdem na transpiração. Posteriormente, na passagem das folhas para a atmosfera a planta dispense, num total de -20.000 kPa de energia para a atmosfera. (BradyN.C. e Weil.R.R., 2013)

Do ponto de vista da produtividade agrícola, a evaporação do solo (E) e a transpiração da planta (T), seriam consideradas uma “perda de umidade”, designada como Evapotranspiração (ET). Em relação a água perdida pela planta através da transpiração (T), ela é essencial para o crescimento do vegetal, porque fornece a água que necessitam para o seu metabolismo.

12.17. EFEITO DA COMPACTAÇÃO NO POTENCIAL MATRICIAL, AERAÇÃO E CRESCIMENTO DAS RAÍZES

A compactação reduz a quantidade de água que as plantas podem absorver, fazendo com que a área sólida do solo tende a se aproximar uma das outras aumentando a resistência do solo para valores maiores de 2.000 kPa, nível considerado limitante para a penetração de raízes (Fernandes et al., 2018).

Por outro lado, a compactação diminui a porosidade total o que pode significar que menos água vai ser retida na capacidade de campo. Assim sendo a redução do tamanho e número de macroporos significa menor porosidade de aeração quando o solo estiver próximo a capacidade de campo e, portanto, o aumento da quantidade de microporos aumentara ao valor do ponto de murcha permanente diminuindo o teor de água disponível.

Em cana-de-açúcar e em solos arenosos (Morelli *et al.*, 1997) trabalhando com calcário e gesso indicou que, alterando os teores de bases assim como a saturação de bases em profundidade em solos de baixa fertilidade, houve um aumento do CAD alterando os teores de raízes fazendo com que o desenvolvimento do sistema radicular se modifica. Neste sentido a alteração de uma possível compactação na superfície do solo pode ser atenuada por um aumento em profundidade do sistema radicular como foi indicado (Tabela 64).

Tabela 61 - Em cana-de-açúcar quantidade de raízes e saturação de bases em solos arenosos Distribuição relativa de raízes no experimento em t/ha (4 de calcário + 2 de gesso).

Profundidade cm	Raízes em %		Saturação de bases (V%)	
	Testemunha	Tratamento 4+2	Testemunha	Tratamento
0-25	92	48	16	46
25-50	8	25	7	26
50-75	2	18	7	23
75-100	0	9	5	25

(Tratamento em t/ha: 4 de calcário e 2 de gesso)

Produtividade máxima em t/ha, média de 4 cortes, tratamento 4+2 (121 e Testemunha 99)

No quarto corte em t/ha, tratamento 4+2 (126 contra 88 na testemunha)

Fonte: Morelli et al. (1997)

12.18. RELAÇÃO ENTRE CAD, TEXTURA DO SOLO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Nas regiões do Brasil há diferenças na quantidade de chuvas e por consequência na Evapotranspiração (ET). No sistema de Ambientes de Produção (Prado H., 2006) para cana-de-açúcar foram selecionadas com evapotranspiração potencial, em mm/dia, correspondente a 3, 5 e 7, em função do teor de argila em perfis semelhantes assim como os dias que teria água disponível (Tabela 65).

Note que considerando uma classe como Água Disponível Alta (ADA) a quantidade de dias que o solo pode conter água disponível, numa Evapotranspiração de 3 mm/dia, seria de 20 a 25 ($20 \times 3 = 60$ e $25 \times 3 = 75$ mm, que o solo deve conter na profundidade de 0-100 cm). Numa ET de 7 mm/dia este mesmo solo argiloso teria uma designação rebaixada para ADM (Água Disponível Média).

No caso de solos mais arenosos, com Água Disponível Baixa (ADB) e com 7 mm/dia de ET, o potencial será rebaixado para Água Disponível Muito Baixa (ADMB). Neste aspecto se verifica que os solos de textura arenosa sempre estão aquém dos solos mais argilosos, porém, e dependendo da cultura, no caso da cana-de-açúcar, pode-se reduzir o déficit de água disponível com o manejo do clima do solo, antecipando o plantio. Em culturas anuais seria o caso de aumentar a profundidade do solo em recuperação química

Tabela 62 - Água disponível por dia em relação ao mês com ET Potencial de 3,5 e 7 mm/dia e teor de argila.

AD	Classe	Evapotranspiração Potencial			Argila
		3 mm/dia	5 mm/dia	7 mm/dia	
Dia/mês	AD	AD mm no período de dias			(sem gradiente)
Maio que 25	ADMA	Maior 75	Maior 125	Maior 175	Maior 60
20 a 25	ADA	60 a 75	100 a 125	140 a 175	35 a 60
15 a 20	ADA/ADM	45 a 60	75 a 100	105 a 140	25 a 35
10 a 15	ADM	30 a 45	50 a 75	70 a 105	15 a 25
5 a 10	ADB	15 a 30	25 a 50	35 a 70	10 a 15
Menor que 5	ADMB	Menor 15	Menor 25	Menor 35	Menor 10

Observação: 3 mm/dia x 20 dias = 60 mm água disponível

EVT de mm/dia: ADA será rebaixada para ADM e ADB será rebaixada para ADMB

Fonte: Demattê, J.A.M., 2019.

12.19. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA

Diversos sistemas de eficiência são utilizados tais como matéria seca produzida por unidade de água transpirada (T), ou rendimento de matéria seca por unidade de água perdida por evapotranspiração (ET). Todas estas eficiências seriam em kg de grãos ou toneladas de cana por m³ de água utilizada na ET. Nos sistemas de irrigação a eficiência deve ser medida também pelas perdas nos reservatórios.

As eficiências são influenciadas pelo clima, sendo que num ambiente semiárido as culturas podem usar de 1.000 a 5.000 kg de água para produzir um único quilo de grãos. Em regiões mais úmidas com ETP mais baixa devido as precipitações, a eficiência do sistema de irrigação é menor.

Em soja, sem irrigação, num ambiente tropical, a quantidade de água disponível para produzir 1,0 kg de grãos de soja será na faixa de 600 a 700 mm de água.

A quantidade de água necessária para produzir grãos, frutas, legumes e alimentar o gado para produzir alimento para uma pessoa adulta, num único dia, é substancial, onde há compêndios indicando na faixa de 70.000 litros (Brady N.C. e Weil.R.R.2013).

As perdas de água da superfície do solo através da transpiração são determinadas nas seguintes condições climáticas; cobertura do solo em relação ao Índice de Eficiência Foliar (IAF); eficiência do uso da água pelas plantas assim como pelos diferentes tipos de manejo; duração do período de chuvas e de crescimento da planta.

Num sistema de irrigação com pivô e gotejo em cana-de-açúcar na Usina Bevapi, em Brasilândia, Mg verificou-se que o gotejo produz mais cana-de-açúcar com eficiência maior do que o pivô (Tabela 66).

Tabela 63 - Irrigação com Gotejo e Pivô na Usina Bevap, MG.

Tipo	TCH	Idade	ton/mês	mm/aplicado	mm/ton
Gotejo	173,50	12,3	14,11	1.017	5,86
Pivô	139,44	13,9	10,03	566	4,06
Dif. (gotejo x pivô)	34,06	-1,60	4,07	451	1,80
Dif.	24,43%	-11,51%	40,61%	79,68%	0,44

Fonte: Usina Bevap, Mg.

Não esquecer que o uso da água em sistemas de irrigação pode alterar o sistema de uso da terra inclusive com solos arenosos, como visto na região de cana-de-açúcar.

12.20. CONTROLE DE PERDAS DE VAPOR DE ÁGUA (ETP)

Os principais sistemas utilizados na redução de perdas de vapor pelas plantas tanto no ambiente semiárido como no úmido, incluem sistemas de manejo das terras onde se limitam a quantidade de área foliar exposta (através dos espaçamentos), a radiação foliar reduzindo assim a transpiração. Um sistema de manejo estaria o “pousio de verão” (numa região semiárida, sem irrigação) onde parte da área é deixada em pousio e outra metade seria utilizada para produção. As coberturas com lonas plásticas biodegradável de diversas cores são utilizadas independente do clima. Neste sistema as plantas podem ser colocadas nos buracos das lonas, reduzindo assim as perdas de umidade. O plantio direto assim como as culturas de cobertura e a palhada são indicações que podem ser utilizadas nas perdas de vapor de água (Brandy e Weil, 2013).

12.21. PERDAS LÍQUIDAS DE ÁGUA DO SOLO

Após uma chuva ou sistemas de irrigação, as perdas de água na superfície dos solos são diversas, porém a percolação (drenagem subsuperficial) e a água de escoamento superficial, são as principais perdas.

No caso da percolação ela recarrega os lençóis subterrâneos. O escoamento superficial contribui para escoar o excesso de água após chuvas intensas e com o solo encharcado, dirigindo o excesso de água para cursos de água ou escoadouros. Entretanto, este excesso de água pode causar erosão se os solos não tiverem sistemas de contenção adequadas, tanto em culturas anuais, perenes ou semi perenes. Nos sedimentos arretados pelo deflúvio uma série de nutrientes ligados ou não aos colóides de solos, como o potássio, fósforo, cálcio e magnésio, são perdidos.

A sulcação reta, independente da declividade, seria uma cópia utilizada em clima temperado, porém em situação de clima tropical úmido os agricultores, técnicos e pesquisadores, querendo reduzir as perdas de erosão, estão sugerindo uma série de práticas introduzidas no sistema de sulcação reta tais como o plantio direto, as culturas de cobertura, a palha e o sistema de plantio canterizado. Tal sistema num solo arenoso erode. Seria preferível

em tais situações a sulcação em lençol (em nível) atenuando as perdas por erosão assim como reduzindo a eficiência dos equipamentos utilizados.

Numa sulcação reta em solo mais argiloso em declive pode-se aumentar a infiltração da água e em consequência reduzirá as perdas por erosão. Neste caso seria a intercepção do escoamento da água na sulcação, através de pequenos taludes, distanciados de 4 a 6 metros, ou através de sistemas de subsolagem intercaladas. Com isso haverá tempo suficiente para a água infiltrar no solo. Tal sistema tem sido utilizado em eucalipto e em argissolos e arenosos (Gonçalves J. L. M. et al. 2019).

12.22. SISTEMAS DE MANEJO PARA AERAÇÃO DO SOLO

Um nível de oxigênio e de temperatura no solo seria adequado para o crescimento das plantas inclusive no seu metabolismo assim como a necessidade dos organismos para sobreviverem. Neste aspecto a aeração do solo é tão importante como a água para a vida no solo e uma boa aeração permite uma adequada troca de gases com a atmosfera.

As quantidades de ar na atmosfera seriam na faixa de 21% de oxigênio, gás carbônico CO_2 (0,035%) e pouco mais de 78% de nitrogênio. No solo a quantidade de nitrogênio é semelhante, porém o oxigênio é ligeiramente maior, e menor de CO_2 . Na camada superficial do solo o teor de oxigênio estaria pouco abaixo em relação a atmosfera, decrescendo em profundidade podendo chegar a 5% em solos bem aerados. Em solos com deficiências de porosidade ele pode chegar a zero, como nos solos coesos da Formação Geológica Barreiras principalmente no Nordeste.

Num caso de excesso de umidade, com suprimento de oxigênio praticamente esgotado, o solo seria designado anaeróbico. Neste caso, auxiliado pela matéria orgânica, a formação de elementos tóxicos como metano (CH_4), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e etileno (C_2H_4) são caracterizados nestes tipos de solos.

Como o teor de nitrogênio é semelhante na atmosfera e nos solos, há uma regra que não pode ser desprezada em relação aos dois outros gases do solo, oxigênio e CO_2 , “quando um decresce outro aumenta”.

O acréscimo de CO_2 na faixa de 10% pode acarretar toxidez as plantas em solos encharcados ou com graves problemas de compactação, inclusive bloqueando as trocas gasosas

com atmosfera. Numa questão por enchimento de água na porosidade do solo pode reduzir sensivelmente a quantidade de aeração.

Neste particular levar em consideração que o fluxo (ou difusão) de oxigênio é na faixa de 10.000 vezes mais rápida numa porosidade preenchido com ar do que com água. O elevado conteúdo de água por muito tempo num solo pode bloquear a difusão do oxigênio e com isso causar malefícios ao sistema radicular. Tal fato ocorre com mais frequência em solos mais argilosos (Brandy e Weil, 2013).

12.22.1. Troca de Gases

As trocas de gases no solo com a atmosfera, saída de CO₂ e entrada de O₂, é fundamental que elas se realizem o mais rápido possível. Estas trocas são realizadas pelo fluxo de massa (de pouca importância) e por difusão. No caso da difusão de um gás, constituído por uma série de misturas, ele se desloca em função de sua pressão parcial. Se a pressão do ar é de 1,0 atm (-100 kPa) a pressão parcial do oxigênio (considerando que 21%) será aproximadamente de 21 kPa.

Por causa da difusão ao longo do gradiente de pressão parcial uma maior concentração de oxigênio na atmosfera resultara um movimento para o interior do solo. O CO₂ e o vapor de água movem-se em sentido contrário uma vez que a pressão parcial destes gases no ar do solo é maior do que na atmosfera.

No sistema de manejo, e devido também a tais motivos, uma escarificação nos solos seria adequada.

12.23. PROCESSOS AFETADOS PELA TEMPERATURA DO SOLO

No caso das plantas a temperatura do solo afeta mais sensivelmente a brotação e a fotossíntese do que o desenvolvimento radicular. Tem sido evidente que num clima mais frio, temperatura de 15 a 20°C, período seco, a brotação de gramíneas em pastagens é retardada, maior em solos argilosos do que em arenosos assim como a produtividade. Por outro lado, no período úmido faixa de 20 a 30°C em região úmida e quente, a germinação das culturas é considerada boa.

Em relação ao crescimento da muda, em cana-de-açúcar, é afetada pela temperatura. Em relação à conclusão de um experimento, foi verificado que a 20 cm de altura da cultura a

34°C contra 8 cm de altura a 18°C, uma diferença acentuada no crescimento devido a variação de temperatura. Numa cana-de-açúcar adulta a temperatura acima de 38°C cessa o crescimento assim como numa temperatura abaixo de 18°C (Humbert, R.P.1968).

Tem sido relatado que dependendo da temperatura do solo a absorção de nutrientes pode ser retardada pelo sistema radicular assim como pelos organismos. Neste aspecto a atividade de respiração pelo solo e organismos mais que dobra a cada aumento de 10°C.

As plantas em ambientes úmidos tropicais têm temperatura mínimas de sobrevivência, perecendo na faixa de 5°C ou abaixo, na maioria das áreas cultivadas. Um fogo natural em pastagens naturais, como nos cerrados brasileiros, é benéfico, pois ocorre em breves períodos sendo que parte das modificações do solo são mínimas e ocorrem na faixa de alguns centímetros do solo.

12.24. Formato dos grânulos de areia e retenção de água

Hoje, um solo classificado como arenoso, basicamente remete ao tamanho das partículas cujo tamanho recai nessa classificação. Entretanto, dentro dessa fração, os tamanhos e formas podem ser diversas. Será que as formas interferem na retenção de água? Raimo et al. (2022) estudaram detalhadamente a micromorfometria da fração areia (Figura 54 a). Concluíram que as formas e rugosidades são diferentes e, dependendo da forma tem comportamento diferenciado na retenção de água em solos arenosos. De fato, as frações com partículas mais rugosas apresentaram maior capacidade de retenção de água.

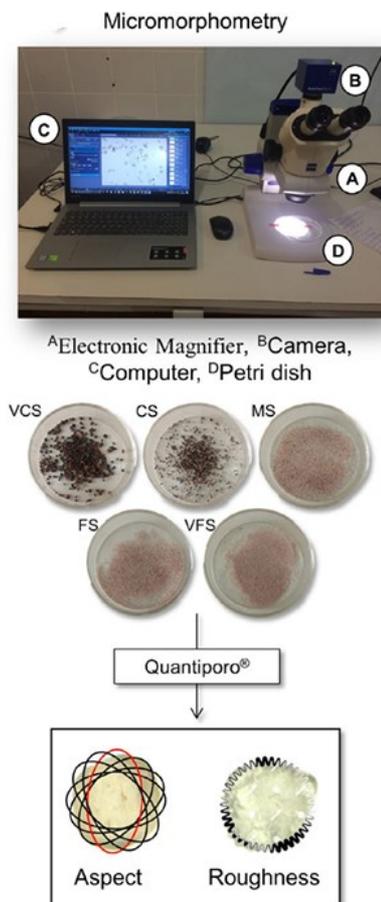


Figura 54 a. Ilustração da metodologia de análise da fração areia (Fonte: Raimo et al., 2022)

12.24.1. Transferência de Calor

Um solo seco é mais facilmente aquecido do que um solo úmido, pois a quantidade de energia necessária para erguer 1,0 grama de água em 1,0°C é maior do que esta mesma situação em 1,0 grama de solo. A relação desta água e do solo seria o calor específico do solo. O calor específico da água pura é cerca de 1,0 cal/g e do solo seco de 0,2 cal/g. Uma das consequências em relação ao calor específico seria que um solo úmido se aquece mais devagar do que um solo seco, assim como num solo arenoso seco a temperatura é mais elevada do que num solo argiloso seco.

A transferência de calor é maior na água do que no ar. Os fatores que agem na condutividade térmica do solo são diversos, porém o mais importante é o teor de água do solo e o grau de compactação. Quanto maior a compactação de um solo úmido, maior seria a transferência do calor. Portanto, um solo seco, com nível de compactação adequada, pode reduzir a transferência de calor. Se os espaços forem parcialmente ocupados pela água, a transferência de calor aumenta, independente da textura (Brandy e Weil, 2013).

CAPÍTULO 13: MANEJO DO FÓSFORO

13.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO FÓSFORO

Há citações que em termos de fósforo sendo que “o solo deve ser primeiramente adubado e posteriormente a cultura”. Tal situação pode-se inverter dependendo da cultura, como no eucalipto, tal afirmação não é empregada, “pois, aduba-se a planta e não o solo” (Gonsalves J. L. M. et al., 2019).

Para qualquer cultura o fósforo é o motor da planta, tanto na absorção de nutrientes e água pelo sistema radicular e folhas assim como na translocação do vegetal nas mais diversas partes. Em relação aos solos o fósforo apresenta uma série de produtos variáveis de solubilidade e reações de adsorção, fixação, assim como métodos para reduzir tais procedimentos como o uso do calcário, gesso, matéria orgânica e outros (Prochonow L.I et al., 2019).

O fósforo é um elemento de baixa mobilidade no solo, no qual se encontra como ortofosfatos, formas derivadas do ácido ortofosfórico, H_3PO_4 , entretanto na planta ele é extremamente móvel.

Na fase sólida encontra-se combinado com compostos de ferro (hematita, goethita) em solos muito intemperizados, de reações positivas fixando-o com forças de covalência. Neste aspecto estaria sujeito a influência da acidez do solo até a um pH 7,0 como $H_2PO_4^-$ e num pH acima de 7,0, na forma de HPO_4^{2-} .

Termos como “fósforo lábil”, forma disponível para as plantas, e “não lábil” forma indisponível tem sido encontrada. Os termos “lábil” foram devidos as formas utilizadas no estudo de isótopos.

Nas análises de fertilidade do solo ele é determinado em ppm de P (mg/dm^3) e na absorção pelas plantas, como $H_2PO_4^-$ através da solução do solo. Nas empresas, usuários e mercados usam-se na forma de óxido, em P_2O_5 ($2\text{ ppm} \times 2,29 = 5,80\text{ P}_2O_5$), porém as plantas não absorvem óxidos e sim o ânion.

Na Tabela 67 (Raij B van, 2011) observe a quantidade de fósforo obtido pela Resina Trocadora para diversas culturas, a ser aplicado no plantio, em ppm, assim como a produção relativa, independente da textura dos solos.

Ao se aplicar P no solo, independente da fonte, porém na forma mineralizável, ele segue os seguintes caminhos: absorção pela planta, adsorvido pelo solo (forma “lábil”), fixado (forma “não lábil”), perdido por erosão. O P orgânico estaria na forma indisponível e necessita ser disponibilizado através de reações de mineralização para ser absorvido.

Tabela 64 - Limites de interpretação de teores de fósforo no solo.

Teor	Produção relativa %	P resina ppm			
		Florestais	Perenes	Anuais	Hortaliças
Muito baixo	0-70	0-2	0-5	0-6	0-10
Baixo	71-90	3-5	6-12	7-15	11-25
Médio	91-100	6-8	13-30	16-40	26-60
Alto	>100	9-16	31-60	41-80	61-120
Muito alto	>100	>16	60	>80	120

Limites de interpretação de teores de fósforo no solo para cana de açúcar			
Teor	Produção relativa %	P resina ppm	P205 kg/ha
Muito baixo	0-70	0-6	0-27,4
Baixo	71-90	7-15	32-69
Médio	91-100	16-30	73-137
Alto	>100	31-60	142-274
Muito alto	>100	>60	>274

10 ppm de P, 46kg de P205 (0-20 cm, densidade 1,0 g/cm³)

Fonte: Raij, 2011.

13.2. REAÇÕES DO FÓSFORO (P)

As reações do P no solo são ilustradas na Figura 55 no ciclo do P, através de flechas, onde a parte central seria a “Solução do Solo”. As plantas absorvem o P desta solução onde este se encontra em baixíssimas concentrações. Decorre daí que a maneira de aplicação do P depende da “**extensão do sistema radicular**” quanto maior, melhor, sendo de fundamental importância na absorção do elemento.

Com a absorção do P ocorre uma redução de P da “Solução do Solo” em torno das raízes e para que a absorção continue, o P deve dissolver da fase sólida e movimentar-se no solo, por difusão, até a superfície das raízes. A exudação das raízes pode auxiliar a solubilização do P através dos exudatos orgânicos. O P no solo pode-se perder por lixiviação, em pequena quantidade, devido a reação de fixação, e por erosão.

Um adubo de P adicionado ao solo dissolve-se passando para a “Solução do Solo” e devido à baixa solubilidade dos compostos de P e a forte tendência de adsorção pelo solo (é

ânion específico), a maior parte do P passa para a fase sólida. Nesta fase ele está na forma “lábil” (forma absorvida) que gradativamente passa a forma “não lábil” (forma não absorvida) à medida que aumenta o tempo de contato entre o P e o solo.

Devido ao baixo teor do P em Solução do Solo as remoções pela água de percolação são negligíveis.

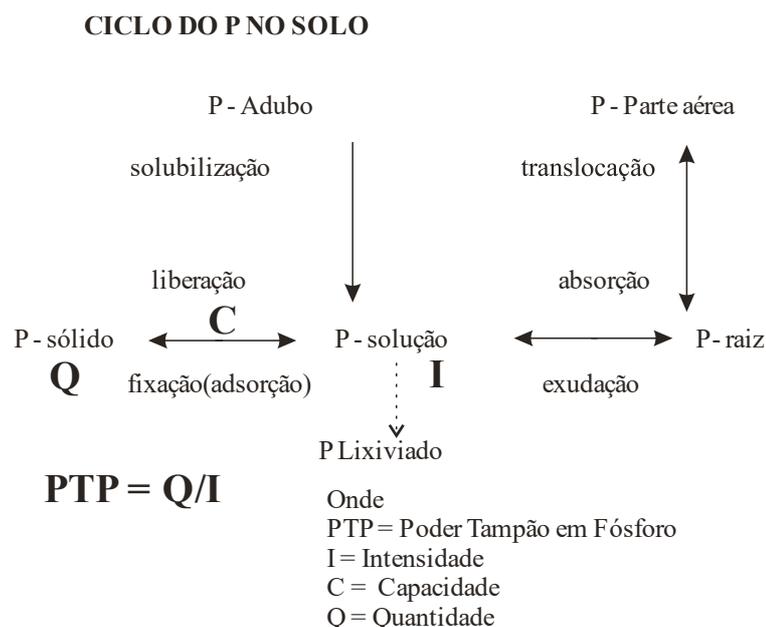


Figura 55 - Comportamento de fósforo em solo adubado, com relação aos aspectos que afetam a nutrição vegetal.

13.3. FATORES QUE DEFINEM A DISPONIBILIDADE DO FÓSFORO

Do ponto de vista conceitual podem ser conhecidos alguns fatores que definem a disponibilidade de P no solo: o Fator Intensidade corresponde à concentração do P na Solução do Solo e o Fator Quantidade ou P lábil, que pode alimentar a Solução do Solo e o Fator Capacidade ou Poder Tampão de P (Definido pelo fator Quantidade dividido pelo fator Intensidade), representado pela condição do solo e pode manter ou restabelecer o P em solução, através da dissolução do elemento da fase sólida.

Finalmente, o Fator Difusão, representado pelas características que permitem aos íons P migrar da superfície da fase sólida do solo, até a superfície das raízes.

Dentre estes fatores o mais importante é o Fator Quantidade (P Lábil).

13.4. DIFERENÇAS NA CONCENTRAÇÃO DE P

As plantas absorvem o P da Solução do Solo que é disponível, contudo, os teores são baixos. Numa concentração de P no solo de 0,1 ppm, num solo com 25% de água, a quantidade de P na camada arável será de 50g de P, muito pouco. Isto significa que deve haver uma constante reposição do P em solução, o que se dá através da dissolução do P “lábil”, que está em equilíbrio com o P Solução.

Em relação as diferenças nas concentrações, a Figura 56 ilustra bem o caso. Embora seja apenas uma ilustração ela tem muita relação com a realidade. A quantidade de P na “Solução do solo” é pequena se comparado com a Forma “Lábil” e está perde em quantidade para a forma “Não Lábil”. A seta interrompida da fração “Não Lábil” indica que dependendo das condições a forma “Não Lábil” pode passar para a forma disponível. Entretanto, a forma “não lábil” para passar para a forma “lábil” é extremamente difícil de ser estimada (Raij, B von 2011).

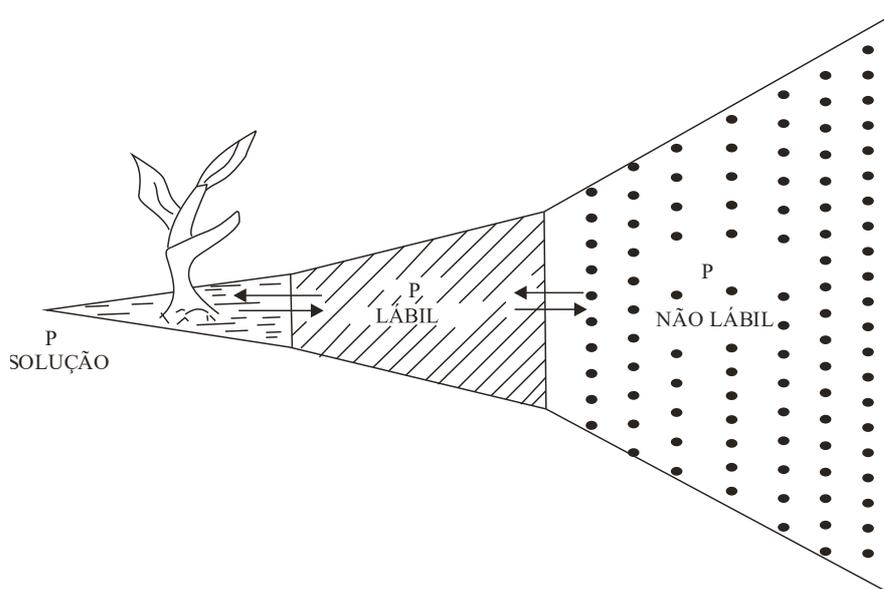


Figura 56 - Diagrama mostrando a relação entre as frações de fósforo não-lábil e lábil, e o fósforo na solução do solo. **Fonte:** Raij B van (2011)

13.5. DIFUSÃO DO FÓSFORO E ABSORÇÃO PELAS RAÍZES

A absorção do P da “Solução do Solo” pelas plantas é desenvolvida em duas etapas: movimento do nutriente na forma “lábil” até a superfície da raiz e a passagem para o interior

das raízes. A movimentação do P da Solução do Solo em direção a superfície das raízes se dá por difusão (aproximadamente 94%). O mecanismo de difusão pode ser descrito por:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{D \cdot A \cdot \theta (C_s - C_r)}{L}$$

$\frac{dq}{dt}$ = quantidade de P que se difunde até as raízes por unidade de tempo.

Onde:

D = coeficiente de difusão do P em água;

A = área da superfície absorvente das raízes;

θ = conteúdo de água volumétrica do solo;

C_s = concentração de P na solução do solo, a uma distância L da superfície da raiz;

C_r = concentração de P na solução do solo junto a superfície da raiz.

Portanto, a quantidade de P que chega à superfície das raízes por difusão é proporcional a concentração do P na Solução do Solo, a um sistema radicular amplo e ao conteúdo de água.

Prática de manejo: Qualquer prática que promova o crescimento de raízes deverá favorecer a eficiência da adubação fosfatada

No interior das células há um pH mais básico, na faixa de 7,2 e na face externa um pH mais ácido, faixa de 5,5. A diferença de potencial entre os pHs cria uma bomba de exclusão de prótons pelas plantas sendo considerado como o “mecanismo central de nutrição mineral de plantas”.

Será através desta bomba que o P é absorvido na forma iônica assim como os demais íons e moléculas. A partir daí este P é extremamente móvel, estaria fazendo parte das enzimas, aminoácidos, proteínas, sendo que tais compostos estariam desde as raízes até as folhas e vice-versa (Fernandes *et al.*, 2019).

13.6. FORMAS DE FÓSFORO

Os adubos fosfatados utilizados na agricultura brasileira são os fosfatos solúveis (superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfatos de amônio, MAP e DAP); os termofosfatos (Yoorim); fosfatos naturais reativos (FNR), fosfatos parcialmente acidulados, fosfatos de rochas (FR). Produtos de origem orgânica e subprodutos industriais tem sido fonte de grande valor na substituição total ou parcial do P.

A escolha da fonte irá depender de uma série de características tais como: eficiência para suprir o P para as plantas; o custo de P_2O_5 por unidade solúvel; a possibilidade de fornecer outros nutrientes, como o superfosfato simples, o Yoorim, o Fosmag; a possibilidade de correção do pH do solo como os termofosfatos e FNR ao longo do tempo; os tipos de solos e a acidez; a distância da fonte com a aplicação na lavoura etc.

Por outro lado, cada fonte requer condições próprias para manifestar melhor seu potencial, ou seja: modo de aplicação (no sulco ou área total); o nível de acidez do solo (solo ácido ou não ácido); o tipo de cultura (com ou sem pragas do solo como nematoides), o sistema de uso da terra.

O gráfico (Novais e Smyth, 1999) representa em função do tempo x matéria seca para as relações entre P solúvel, fosfatos reativos e os fosfatos não reativos (Figura 57).

Note que as fontes solúveis (FS) são superiores aos fosfatos reativos (FR) nos primeiros anos, após ele perde para as fontes de reativos que terão solubilização ao longo do tempo e, portanto, maior produtividade. Os não reativos (FNR) quanto ao seu uso seria interessante em relação ao preço de P_2O_5 , que irá depender de um solo ácido para solubilizar, o que não condiz com uma agricultura de manejo elevado que usa os corretivos.

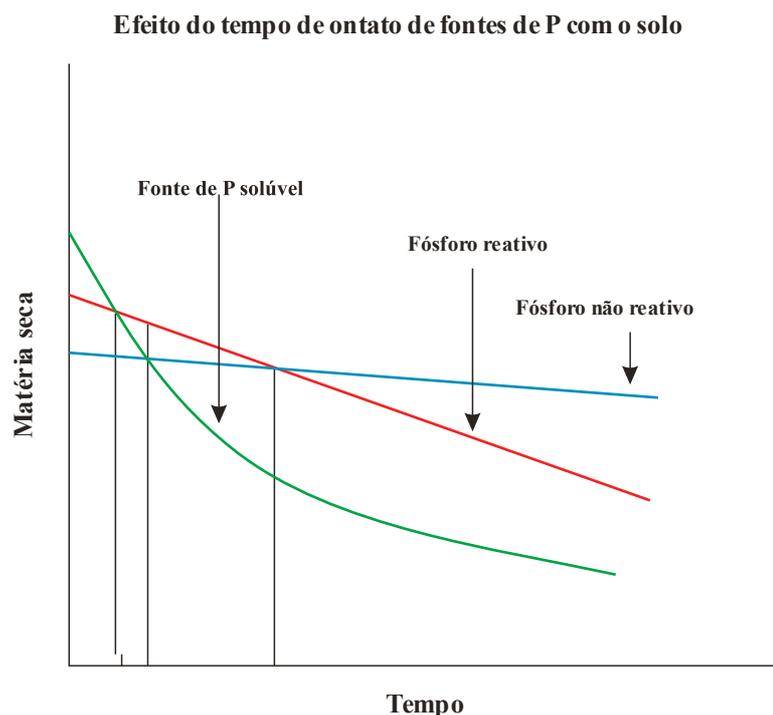
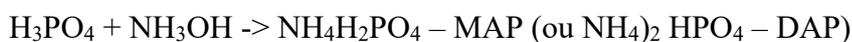
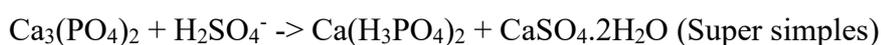
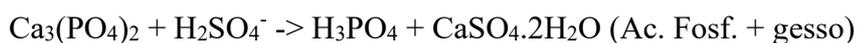


Figura 57 - Representação de uma relação tempo x matéria seca em função das fontes de P solúvel, fosfatos reativos e fosfatos não reativos. **Fonte:** Novais e Smyth (1999).

As reações para obtenção de P solúvel estão indicadas a seguir (Novais e Smyth, 1999):



13.7. FOSFATOS NATURAIS

No Brasil os fosfatos naturais (FN) são originados de rochas metamórficas, muito duras (aspecto mineralógicos), como a Apatita, sendo classificada como Fosfatos Naturais. Os fosfatos vindos do exterior como Gafsa, Arad, Bayovar são originados de rochas sedimentares mais facilmente desagregadas e são designados de Fosfatos Naturais Reativos (FNR). Tais fosfatos apresentam maior frequência de substituição isomórficas nas quais o PO_4^{2-} é substituído por CO_3^{2-} , F^- e o Ca^{2+} substituído por Mg^{2+} e Na^+ . Quanto mais rico em substituições

como essa, mais frouxa é a estrutura da rocha e mais facilmente disponível o fósforo se torna. Isso se dá pelo equilíbrio entre disponibilidade de fósforo a curto e a longo prazo (5, 6, 7 anos). (Heringer 2021).

Para serem classificados como um fosfato natural ele deve ter 30% ou mais de P_2O_5 total sendo solubilizado numa extração de solução de ácido cítrico a 2%. Quanto ao uso dos fosfatos reativos utilize o teor total de P_2O_5 e não o solúvel.

A caracterização química destes fosfatos pode ser feita com os teores totais de fósforo, os solúveis em ácido cítrico a 2%, solubilidade em água, citrato neutro de amônio e outros.

Normalmente são moídos em pó e as aplicações seriam em área total aproveitando a acidez do solo para solubilizar o fósforo.

Tais fosfatos sempre despertaram interesse para substituição total ou parcial dos fosfatos solúveis, entretanto seu uso é complexo e a eficiência agronômica muito variável. Os fosfatos reativos são mais eficientes do que os fosfatos naturais e não é indicado para substituir os solúveis SFT, SPS, MAP e outros no sulco de plantio (Raij B von 2011). As principais características de fosfatos são encontradas na Tabela 68.

Tabela 65 - Características dos principais fosfatos solúveis, reativos e naturais.

Fertilizante	Garantia mínima	Características
Fosfato natural	24% de P ₂ O ₅ 20% de cálcio	Teor de P ₂ O ₅ e mínimo de 4% Solúvel e AC a 2%
Fosfato parcialmente acidulado	20% de P ₂ O ₅ 16% de Ca	Total de P ₂ O ₅ e mínimo de 9% CNA + água Mínimo de % solúvel em água
Fosfato natural reativo	27% de P ₂ O ₅ 28% de Cálcio	Total de P ₂ O ₅ e mínimo de 30% do teor total Solúvel em AC a 2%
Fosfato diamônico DAP	17% N 45% P ₂ O ₅ solúvel	P ₂ O ₅ solúvel em citrato neutro de amônio + água Mínimo de 44% solúvel em água. N amoniacal.
Fosfato monoamônico MAP	9% N 48% de P ₂ O ₅	P ₂ O ₅ solúvel em citrato neutro de amônio + água Mínimo de 44% solúvel em água. N amoniacal.
Fosfato mono potássico KH ₂ PO ₄	51% P ₂ O ₅ ##% K ₂ O	P ₂ O ₅ solúvel em água K ₂ O solúvel em água
Super fosfato simples	18% P ₂ O ₅ 16% de cálcio	P ₂ O ₅ solúvel em água K ₂ O solúvel em água
Super fosfato triplo	41% P ₂ O ₅ 10% de cálcio	P ₂ O ₅ solúvel em citrato neutro de amônio + água Mínimo de 36% em água. Ca e S total.
Termofosfato magnésiano	17% P ₂ O ₅ ; 7% Mg + 16% de cálcio	P ₂ O ₅ total e mínimo de 11% em AC

AC: Ácido cítrico. CNA: citrato neutro de amônio.

Fonte: Raij, 2011.

13.7.1. Solubilização Fosfatos Naturais Reativos

Na solubilização o ácido cítrico a 2% responde à ação das plantas na rizosfera sendo que trabalhos demonstram que tal extrator solubiliza eficientemente os fosfatos bi cálcicos e em contrapartida possui baixíssima capacidade de solubilização em relação aos fosfatos de ferro e alumínio.

Em experimento de soja de longa duração realizado pela Embrapa, GO (Sousa D.M.G et al. 2021) (Tabela 69) no qual se avaliou o Índice de Eficiência Agronômica de diversas fontes de FNRs. Nota-se que o FNR da Carolina do Norte juntamente com o Gafsa foi o mais eficiente (107%) sendo seguido por perto pelo Marrocos 2 (105%) comparado com o Super Triplo de IEA de 100%. Nos três primeiros anos de cultivo da soja, o Gafsa apresentou maior eficiência que o Marrocos 2, pois apresenta maior teor de fósforo solúvel em ácido cítrico, em

contrapartida nos anos 4, 5 e 6 houve uma reversão, passando o Marrocos 2 a ser mais eficiente. Como se observa um efeito residual maior e um menor efeito de curto prazo.

Tabela 66 - Índice de eficiência agronômica (IEA) de fontes de fosforo, avaliados com a cultura da soja, em seis cultivos sucessivos e acumulados, na dose de 240 kg/ha de P₂O₅ aplicada a lanço antes do primeiro cultivo.

Fontes de P	IEA						Acumulado
	1	2	3	4	5	6	
	%						
Arad	82	91	94	128	130	143	98
Argélia	83	94	111	117	114	94	97
C. norte	86	107	126	146	115	99	107
Marrocos 1	65	82	111	160	129	118	94
Marrocos 2	86	93	97	156	149	151	105
Marrocos 3	80	78	98	137	130	132	95
Gafsa	86	114	118	145	107	97	107
ST	100						

$$\frac{P \text{ retirado do tratamento} - P \text{ da testemunha}}{P \text{ retirado do ST} - P \text{ da testemunha}} \times 100$$

Fonte: Sousa D.M.G et al. (2021).

13.7.2. Fosfatos Naturais (FN), solúveis e calcários

Num trabalho pioneiro com os fosfatos naturais Goedert W.J., et al. (1986) usando 1.880 kg/ha do FN (de Pato de Minas) comparando com 400 kg/ha na forma de super triplo e aplicação de calcário nas doses de 1,0 a 5,0 t/ha com pH de 4,8 a 5,9. Os resultados deste experimento observaram que a calagem houve sensível melhora da eficiência do Super fosfato triplo (ST) e redução da eficiência do FN. Mesmo em pH ácido a eficiência do ST é maior do que a do FN, porém os fósforos solúveis são mais caros.

A aplicação do FN somente é válida em condições específicas, a saber: aplicação a lanço, moída e incorporada (maior contato possível com o solo) e num solo ácido (Figura 58).

Porém um fim mais nobre dos FR do Brasil seria o de reagir com ácido sulfúrico para obtenção do superfosfato simples.

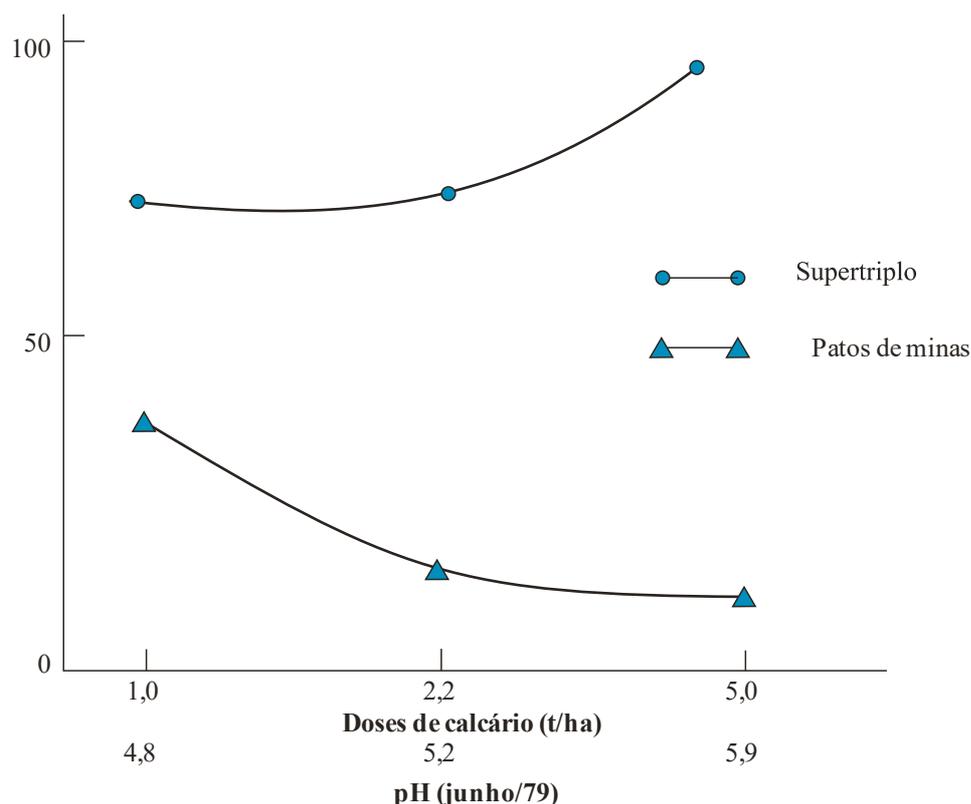


Figura 58 - Produção de soja (100% = 1.880 kg/ha) em resposta a nível de calagem, quando 400 kg de P_2O_5 total/ha foram aplicados na forma de superfosfato triplo e de fosfato natural de Patos de Minas. **Fonte:** Goedert, W.J., et al. (1986)

A associação de calcário e silicatos e o fósforo, no trabalho de Silva, S.A et al 2014, pode ser observado que tanto o calcário como os silicatos auxiliam o fósforo na disponibilidade.

13.8. APLICAÇÃO DE FOSFATOS REATIVOS (FNR) EM EUCALIPTO

No plantio de eucalipto Novais, R.F. e Smyth, T.J (1999), trabalhando com solos arenosos e baixíssimo teor de P (inferior a 3 ppm) verificaram-se que a aplicação do fósforo reativo seria na linha sulcada e não na cova como indicado na Figura 59A. Neste caso a aplicação no sulco de plantio o fosfato entra em contato com o solo sendo, portanto, mais eficiente em termos de reação de solubilização do que na cova. Por outro lado, se verifica que sem P e em solos com baixos teores, a cultura de eucalipto está bem aquém de desenvolvimento comparado com a cultura que recebeu (Figura 59B).

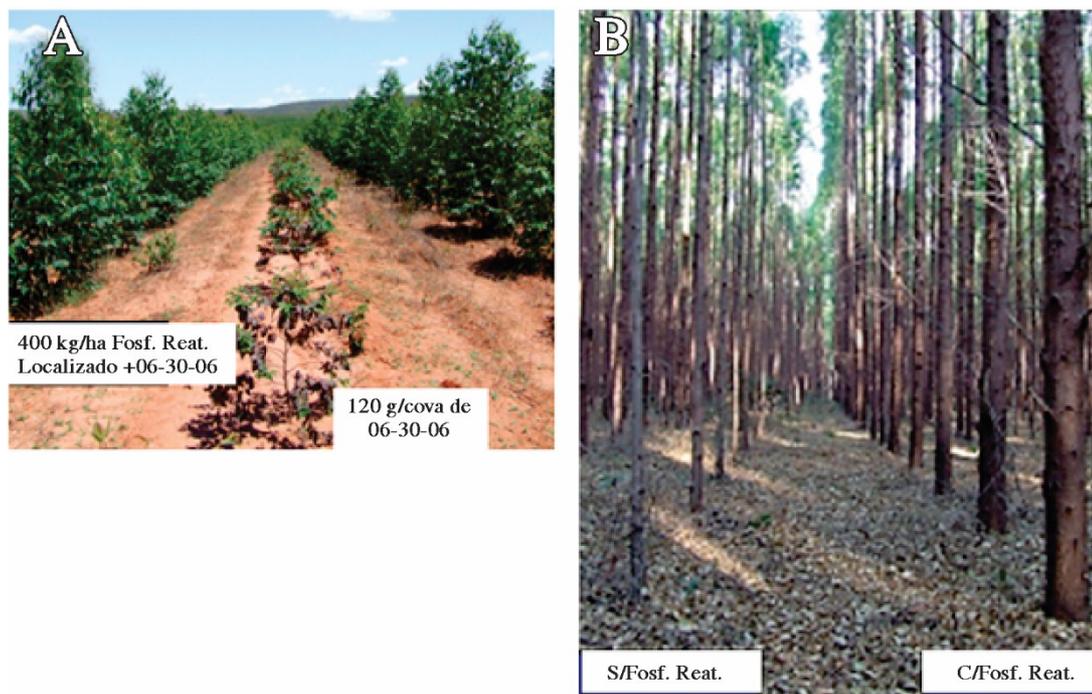


Figura 59 - A: Aplicação no sulco de fosfato reativo com a fórmula 06-30-06, (400 kg/ha) e aplicação de 120 g/cova da fórmula 06-30-06 em solo de textura média. B: Povoamento de eucalipto, em área sem P e com P. **Fonte:** Novais R.F. (2011)

13.9. EFICIÊNCIA AGRONÔMICA EM CULTURAS ANUAIS - FOSFATOS NATURAIS E SOLÚVEIS

Trabalhando com solos de textura média (Novaes & Mello 2007) em aplicação de 400 kg/ha de P_2O_5 em área total no início do experimento, com Super fosfato triplo, Yoorim e os FN, determinou a Eficiência Agronômica (EA) das colheitas. Neste trabalho com duas safras de milho, quatro safras de trigo e duas safras de soja, verificou que a EA depende do tipo de cultura. Assim é que para o trigo a EA dos FN estão abaixo de 50% e com soja e milho eles estão na faixa de 60 a 70% exceto o FN Catalão com as três culturas a ER está abaixo de 26%. Nos fosfatos solúveis, no caso do Super fosfato triplo, a produtividade foi alta nas três culturas perdendo para o Hiperfosfato com EA de 95, 111, 122 respectivamente para as três culturas (Tabela 70).

Em resumo, as aplicações do fosfato solúvel e o hiperfosfato têm sido mais eficientes que as fontes não solúveis.

Tabela 67 - Produtividade média de grãos e Eficiência Agronômica em resposta a aplicação de 400 kg/ha de P₂O₅ em área total na forma de diferentes fosfatos.

Fontes	Milho		Trigo		Soja	
	Grãos	EA	Grãos	EA	Grãos	EA
	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%
Testemunha	2.005	-	329	-	742	-
Supertriplo	5.012	-	814	-	1834	-
Hiperfosfato	4855	95	865	111	2074	122
Termofosfato	4024	67	790	95	1816	98
Araxa	3935	64	563	48	1513	71
Patos	3982	66	547	45	1460	66
Catalão	2794	26	350	4	1050	28

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (1984)

$$IEA = \frac{P \text{ retirado do tratamento} - P \text{ da testemunha}}{P \text{ retirado do ST} - P \text{ da testemunha}} \times 100$$

EqST = Relação percentual entre as doses de ST e da fonte testado, necessária para obter a mesma produção.

13.10. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA - CULTURAS ANUAIS E PASTAGENS - FOSFATOS REATIVOS E SOLÚVEIS

Foram utilizadas as doses de 88 e 350 kg/ha de P em culturas e pastagens, utilizando diversos fosfatos reativos assim como não reativos e determinando a Eficiência Agronômica comparado com o Yoorim (medido com o Equivalente ao Super Fosfato Triplo).

Os resultados indicam que o Yoorim apresentava eficiência superior a 100% nas doses de 88 kg/ha de P para pastagens. Os fosfatos naturais brasileiros, Patos, Araxá, Abaeté, Catalão, quando comparados com o Equivalente ao Super Fosfato Triplo apresentam eficiência relativa muito baixa, (Tabela 71), especialmente considerando-se apenas o P extraído pelas culturas anuais. Considerando-se o P extraído durante 8 anos de cultivo (5 anos de cultivo anuais e 3 anos de capim andropogon) o equivalente ao Super Fosfato Triplo destes fosfatos naturais é inferior a 50%, considerado muito baixo.

As baixas solubilizações destes FN foram estudadas no Brasil Central (Goedert, W.J.; et al., 1986), onde se verificou que 5 anos após a incorporação no solo dos FN, 20 a 25% de fósforo se encontravam na forma de apatita.

Tabela 68 - Índice de Eficiência Agronômica (IEA) e Equivalente Supertriplo (EqST) das fontes de fósforo testadas em solo LE.

Fontes	Doses		IEA (%) ¹		EqST (%) ²
	Kg de P/ha	Cultura anuais	Andropógon	Total	Total
Termo	88	92	142	113	103
magnesiano	350	110	119	114	>100
Gafsa	88	93	110	104	90
	350	106	106	106	>100
Pirocaua	88	76	97	87	70
(MA)	350	81	84	82	62
Termo – IPT	88	45	84	60	45
	350	88	98	92	76
Patos (MG)	88	45	81	50	45
	350	56	91	70	44
Araxá (MG)	88	27	69	41	33
	350	47	74	58	32
Abaeté (MG)	88	21	86	43	35
	350	47	71	56	31
Catalão (GO)	88	8	36	17	15
	350	26	43	33	15

Fonte: Goedert & Lobato (1983)

13.11. FATORES QUE AFETAM A FIXAÇÃO

13.11.1. Mineralogia

A intensidade de fixação do P aumenta de minerais 2:1 para mineral 1:1, e daí para os óxidos cristalinos e amorfos (Tabela 72), independentemente da textura dos solos (Sanches P., 1981). Note que a quantidade de P fixada em ppm (adsorção máxima), aumenta no sentido da montmorilonita (cargas independentes de pH) para os solos contendo caulinita, alofanas, material amorfo (cargas dependentes de pH). Tal fato vem a demonstrar que a mineralogia do solo influi na fixação do P.

Tabela 69 - Fixação do fósforo e quantidade adicionada necessária para ter uma concentração na solução de 0,1 e 0,2 ppm de P.

Solos	Argila dominante	Teor de argila	P fixado (ppm)		
			Adsorção máxima	0,1 ppm solução	0,2 ppm solução
Inceptissol	Mantmorilonita	27	106	65	83
Ultissol	Caulinita	38	408	285	360
Oxissol	Caulinita	36	531	310	395
Oxissol	Caulinita	78	-	720	900
Andept	Alofana	11	1050	500	670

Fonte: SANCHES, 1976.

13.11.2. Textura

O teor de argila atua no processo de fixação do P, ou seja, quanto mais argiloso for o solo maior a fixação (Figura 60) numa relação de P solução e P adsorvido. Nos trabalhos observados maioria dos solos são Latossolos, de mineralogia caulinitica e oxidica sendo que o mais arenoso é Areia Quartzosas, símbolo AQ.

Para um mesmo solo, o LV1, com 65% de argila, há necessidade de haver uma adsorção na faixa de 500 ppm de P para se ter 0,1 ppm de P na Solução do Solo e num solo arenoso a quantidade é bem menor, inferior 70 ppm. A relação entre a textura argilosa de solos intemperizados e Areias Quartzozas não é proporcional, porém depende da relação P-adsorvido e P-solução. De qualquer maneira e num mesmo pH, solos arenosos fixam bem menos de P do que solos argilosos, de 5% até 50% considerando os valores obtidos nas análises de solos em ppm. Se a fixação é menor em terras arenosas cabe ao agricultor as decisões sobre a quantidade a ser aplicada nas terras.

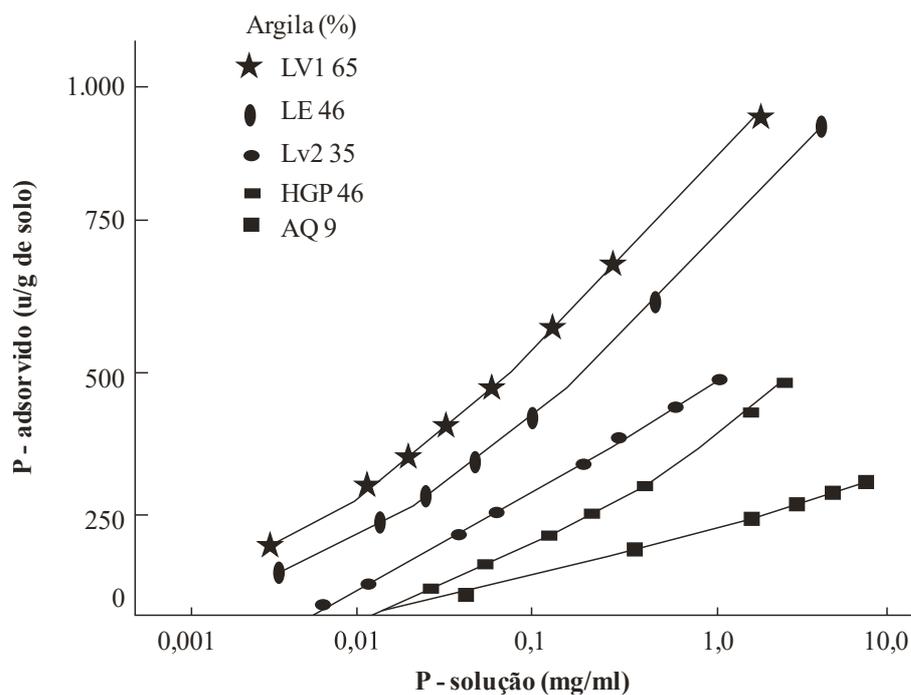


Figura 60 - Relação entre o P-adsorvido e o P-solução, em cinco solos de Cerrado, com diferentes teores de argila. **Fonte:** Sousa, D.M.G.; Lobato, E. (2003)

13.11.3. Cor do Solo

Apesar da cor do solo representar os diferentes minerais de ferro (hematita para cor vermelha e goethita para a amarela) aparentemente não há correlação entre a adsorção máxima de P com a cor do solo nos trabalhos de Lopes, A.S. & Fox, F.R. (1977). Como indica a Figura 61, obtido em latossolos da região de cerrados, observa-se que a adsorção é mais função do teor de argila do que da cor do solo.

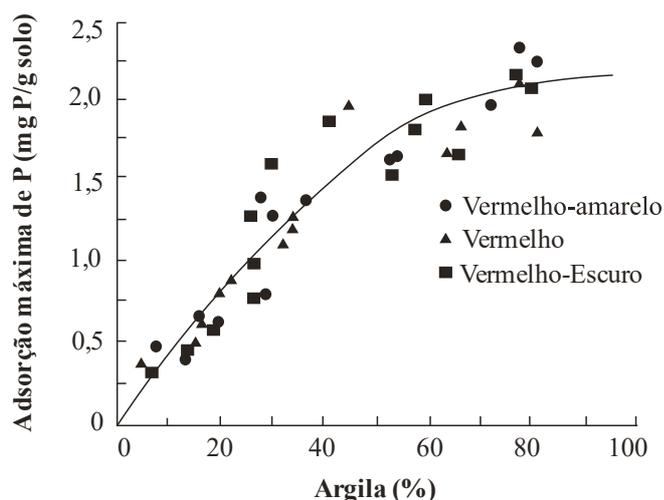


Figura 61 - Relação entre adsorção máxima de P e argila em amostras superficiais de solos sob “cerrado”. **Fonte:** Lopes, A.S. & Fox, F.R. (1977)

13.11.4. Práticas Para Redução das Cargas Positivas do Solo (pH e teor de P)

Cargas positivas não interessam em termos de manejo de solos e infelizmente nas terras muito intemperizadas, como o caso do Brasil, tem sido uma constante.

O aumento do pH do solo através de corretivos (calcários, silicatos, matéria orgânica ou até gesso), provoca aumento do número de cargas negativas nos minerais de argila e desse modo promove menor repulsão dos ânions de P pelas superfícies sólidas do solo, o que resulta em menor fixação. Além deste aspecto outro efeito do aumento do pH é a redução ou eliminação do Al-trocável, responsável também pela fixação do P.

O uso de silicatos e da matéria orgânica em solos ácidos tende a reduzir a cargas positivas e aumentar as negativas e com isso reduzir a fixação do P. O mesmo raciocínio se aplica ao íon sulfato do gesso. Há dados comprovando que nos cerrados o aumento de pH pelo calcário para a faixa de 5,5 propiciou uma sensível redução na fixação na faixa de 30%.

Como foi visto o pH do solo interfere numa gama muito grande de situações inclusive nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , saturação de bases, micronutrientes e CTC assim como em outras características do solo.

Verifica-se que as correções químicas, no caso do pH, tendem a reduzir a fixação do fósforo, como indica os dados da Tabela 73 onde o pH em CaCl_2 varia de 4,3 a 5,7 extraindo o fósforo de 22 a 37 g/dm^3 pelo método da resina medido também pelo P foliar do girassol respectivamente.

Tabela 70 - Efeito do pH no teor de fósforo extraído pela resina, Cultura do girassol.

pH (CaCl ₂)	P foliar g/kg	P resina mg/d ³
4,3	2,79	22
4,6	3,27	26
5,3	3,81	33
5,5	3,87	35
5,7	3,8	37

Fonte: Raij (2011)

Tal fato sobre a fixação de fósforo é de conhecimento de longa data, inclusive com solos de textura arenosa, média e argilosa conforme na Tabela 74, onde foi utilizado fontes de corretivos como o calcário e a Walastonita (Zancanaro, L. et al., 2017).

Observe que foi aplicado de 0 a 150 mg/dm³ de corretivos em solo arenoso até o mais argiloso sendo que nas terras arenosos a recuperação do fósforo foi maior do que nos solos argilosos, independente da fonte.

Tabela 71 – Teor de fósforo extraído pela resina após aplicação.

Quantidade	P resina		
	Sem correção	Calcário	Wollastonita
mg/dm ³			
Solo arenoso			
0	2,6	2,7	4,8
50	20,7	23,4	26,3
150	66,6	79,1	68,8
CV %	13,1		
Textura média			
0	2,8	3,3	3,5
50	19	26,5	20,4
150	59,7	68	65,8
CV %	3,55		
Solo argiloso			
0	4,8	5,7	6,7
50	22,6	24,2	26,5
150	54,4	77,2	64,6
CV %	5,92		

Fonte: RBCS 38: 1215 - 1222, 2014.

A Figura 62 (Souza D.M.G e Lobato E., 2003) ilustra o percentual de eficiência do fósforo na faixa de pH de 4,5 a 9,0. Note que a eficiência aumenta de 23% a um pH de 4,5, porém sempre crescente até a faixa de 95 a 100% nuns valores de pH de 6,5 a 7,0. Tal eficiência

decrece a seguir com 70% a um pH de 7,5 para 30% a um pH de 8,0 culminando com uma eficiência de 5% num pH de 9,0.

De acordo com os dados destes autores, o nível máximo de solubilização de P ocorre no pH 6 a 7 sendo que abaixo destes valores o equilíbrio do P resulta de suas reações com compostos de Fe e Al, e acima de pH com compostos ricos em cálcio, ambiente semiárido.

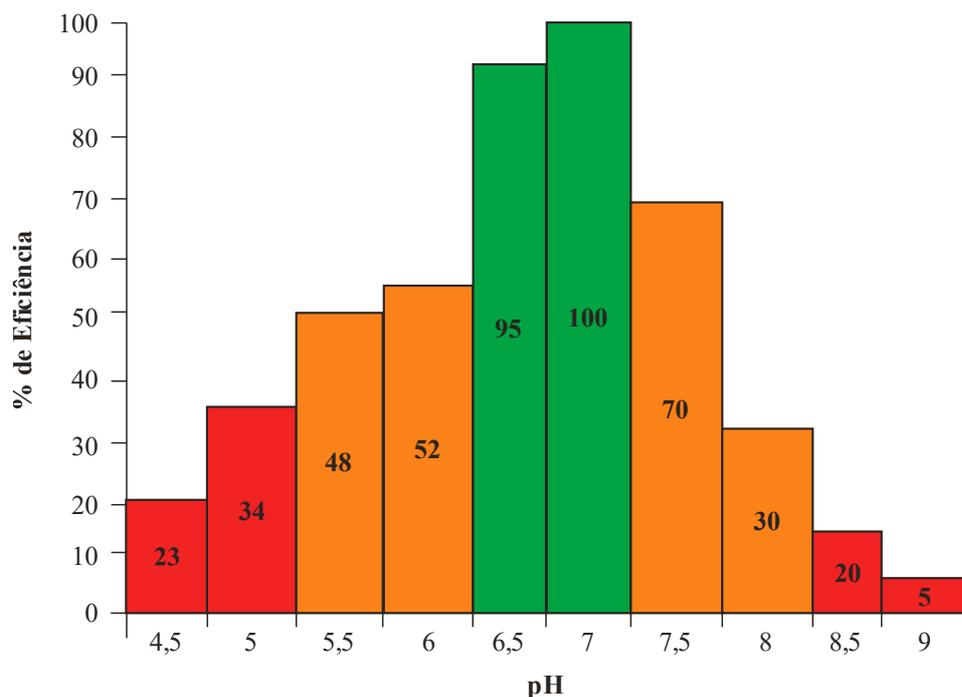


Figura 62 - Percentagem de fixação do fósforo em relação ao pH. **Fonte:** Souza D.M.G e Lobato E. (2003)

Na cultura de cana-de-açúcar, também há correlação entre teores de calcário e de fósforo ao longo de cortes. Os dados da Tabela 75 resume tais efeitos em podzólico vermelho amarelo, de textura entre A/B de 14/30 de percentual de argila com teores de P na faixa de 6 ppm na camada superficial. As doses de calcário foram de 0-4-8 t/ha e as de fósforo, na forma de Yoorin Super em kg/ha de P₂O₅, de 0-75-150.

No plantio tais dosagens foram aplicadas e nos efeitos residuais de produtividade nas soqueiras onde foi aplicado somente NK na faixa de 90-00-130 kg/ha. Observe que sem o calcário e com fósforo (150 kg/ha), a média de produtividade foi de 101,2 t/ha. Com 4 t/ha de corretivo a produtividade passou para 115,5 com 75 kg/ha de P₂O₅ superior a fração sem calcário com 150 kg de P₂O₅. Com 8,0 t/ha de calcário e com 75 kg de fósforo a média passou

para 122,2 t/ha de cana-de-açúcar. Entretanto, o corretivo reagiu até o quarto corte, com valores semelhantes a área sem calcário (Morelli J. et al., 1991).

Tabela 72 - Resultados de cana-de-açúcar em relação ao calcário e doses de fósforo.

Tratamentos		Cortes				Média
T calcário / ha	kg P ₂ O ₅ /ha	1º corte	2º corte	3º corte	4º corte	
		T cana / ha				
0	0	75	81	88	70	78,5
0	75	130	94	95	75	98,5
0	150	135	95	97	78	101,2
4	0	87	111	114	74	96,5
4	75	142	119	119	82	115,5
4	150	161	125	123	84	123,2
8	0	86	109	119	71	96,2
8	75	155	122	125	87	122,2
8	150	184	125	127	94	132,5

Solo podzolizado 14/30

Fonte de fósforo: Yoorin BZ. Teor de P na análise de solo: 6 ppm

Fonte: Usina Sta Helena, 2011 – Piracicaba, SP.

Matéria Orgânica

Tem sido verificado que radicais orgânicos (torta de filtro, cama de frango, matéria orgânica do solo, cobertura morta etc.) com suas cargas negativas em função do pH, irão bloquear o Al³⁺ do solo e as demais cargas positivas, favoráveis a fixação do P. Com isso tem-se maiores teores recuperados de fósforo. Um exemplo da Torta de Filtro (TF), em relação a seu peso seco, subproduto de usinas de açúcar, apresenta em média 1,9% de P₂O₅. Para solo argiloso, perfil latossólico, com menos de 5 ppm de fósforo na camada superficial indicado pela análise de fertilidade, se utiliza no plantio praticamente 8 t/ha de TF base seca. Em solo de textura média 6,5 t/ha e textura menor que 15% de argila de 5,2 t/ha com o respectivo aumento da produtividade (Usina da Barra, 2015).

13.12. PROFUNDIDADE DE APLICAÇÃO DO FÓSFORO NO SOLO

Os solos na região tropical apresentam cargas positivas em subsuperfície além do alumínio em solução e, portanto, a fixação de ânions é grande, inclusive do fósforo. Num trabalho em oxissol indicou que aplicação de 50 mg de P e após 15 dias de incubação, os dados

em relação a profundidade de incorporação de até 50 cm do solo indicam que à medida que se vai incorporando o teor recuperado de P decresce (Tabela 76).

As aplicações de 50 mg de P na profundidade de 0-5 cm a recuperação foi de 22 mg, e na profundidade de 5-10 cm a recuperação foi na faixa de 8 mg de P e acima de 30 cm a recuperação foi baixa, faixa de 3 mg.

Concluindo, a incorporação profunda do fósforo, a mais de 0-10 cm não seria indicado nestes solos inclusive nos arenosos. A aplicação em área total favorece a absorção do P.

Tabela 73 - Fósforo em profundidade, efeito de aplicação superficial de 50mg e P em oxissol no conteúdo total em diferentes camadas do solo após 15 dias de incubação.

Profundidade do solo (cm)	Total de P recuperado
0-5	22
5-10	8
10-15	7
15-20	5
20-25	4
25-30	3
30-35	3
35-40	3
40-45	3
45-50	3

13.13. TEMPO DE REAÇÃO ENTRE O FÓSFORO E O SOLO

Sabe-se que a fixação é dependente do teor de argila dos solos, do pH e do tempo de reação. A Figura 63 indica a fixação em oxissol argiloso do Brasil Central (Novais, 2011 e apresentado na Heringer em 2021) em função do tempo de reação. São 8 vasos contendo a mesma quantidade de terra argilosa e baixo teor de P. Os números indicados correspondem aos dias após a aplicação do P (no caso supersimples). O número 300 no vaso, indica que o P foi aplicado durante este período, e assim por diante até o número zero onde foi feito a semeadura do plantio para todos os vasos. Foi adicionado teores de água suficiente para manutenção do solo úmido. Observe que o desenvolvimento da cultura decresce do número zero para o número 300, mostrando que o P é tempo dependente para a fixação. De acordo com tais resultados indica que as aplicações de P devem ser feitas próximos ao plantio e ao longo do tempo, e com reaplicações de P, as análises de fertilidade apresentam níveis de P acumulados e que podem ser utilizadas nas culturas.

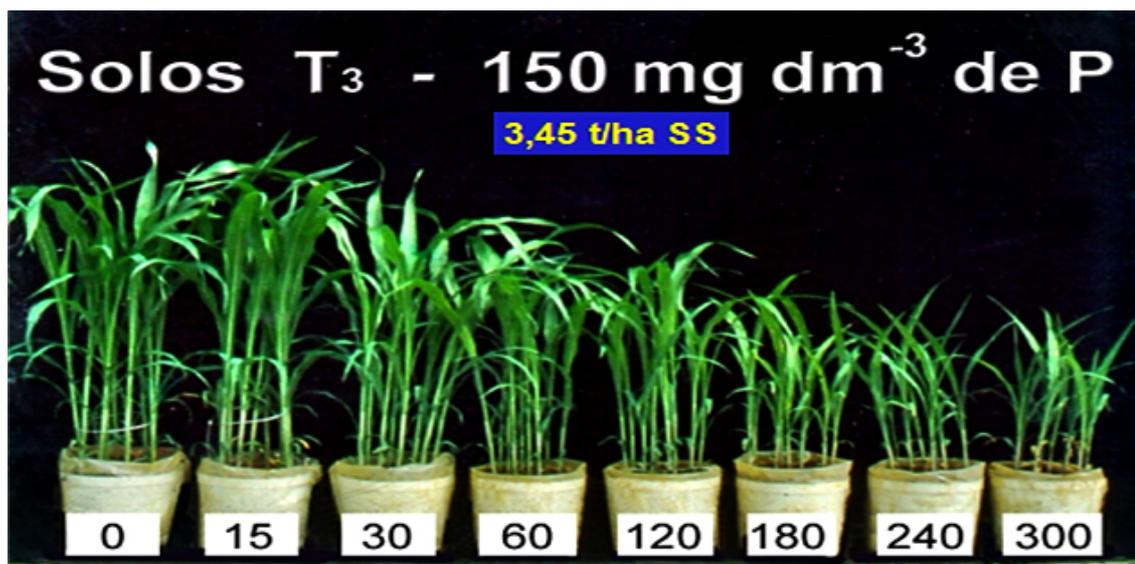


Figura 63 - Tempo de reação do P com solo. Fonte: Novais R. (2011)

13.14. COMBINAÇÃO DE DOSES E MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE P EM CULTURAS ANUAIS

Tem sido muito discutido em solos de cerrados aplicações de P solúveis em água a lanço e no sulco de plantio em culturas anuais, como no trabalho de Moreira, S.G. (2019). Foi observado que nestas culturas (Sousa, D.M.; Lobato, E. 2003) e em solo intemperizados de cerrados, os resultados comprovam que a aplicação a lanço a produtividade tem sido semelhante a aplicação no sulco de plantio. Como são culturas anuais com espaçamento entre fileiras de 40 a 60 cm, a aplicação no sulco, ao longo dos tempos, seria considerada uma aplicação em área total. De qualquer maneira as aplicações no sulco e a lanço produz a mesma quantidade de milho ou de soja (Tabelas 77 e 78).

Na aplicação em área total há vantagem inicial na aplicação, explicada pela promoção de um sistema radicular mais volumoso e conseqüentemente maior absorção de nutrientes de P e água. Em longo prazo a aplicação localizada, considerando o efeito cumulativo de vários cultivos anuais, tal diferença tende a desaparecer sendo o P a ser misturado com a camada arável, dando o mesmo efeito que a aplicação em área total.

Quando o sistema de produção planejado requer altos rendimentos e baixos riscos, há vantagens em combinar aplicações iniciais a lanço (fosfatagem) com adições anuais no sulco (Tabela 78). Em solo com teor de P abaixo de 5 ppm (método resina) é aconselhável fosfatagem

(aplicações em área total), seguido de adubação localizada no plantio. No sulco de plantio usar a quantidade recomendada pelas curvas de calibração.

Tabela 74 - Produção acumulada de dez colheitas de milho em um solo LE, em diferentes alternativas de aplicação do adubo fosfatado, a lanço e no sulco.

A lanço	Fósforo aplicado		Produção acumulada (t/ha)
	No sulco (kg de P ₂ O ₆ /ha)	Total	
320	0	320	27,85
0	80 (x4)	320	30,09
640	0	640	42,67
0	160 (x4)	640	44,05

Fonte: Sousa, D.M.; Lobato, E. 2003.

Tabela 75 - Produção acumulada de quatro colheitas de soja em um LV, em diferentes alternativas de aplicação do adubo fosfatado.

A lanço	Fósforo aplicado		Produção acumulada (t/ha)
	No sulco (kg de P ₂ O ₆ /ha)	Total	
0	100 (x4)	400	6,2
200	50 (x4)	400	6,9
400	0	400	6,8

Fonte: Sousa, D.M.; Lobato, E. 2003.

13.15. COMBINAÇÃO DE DOSES E MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE P EM CANA-DE-AÇÚCAR

Os dados da Tabela 79 resumem a produtividade de 2 cortes da cana-de-açúcar, em experimento montado em solo arenoso na região de Lençóis Paulista, SP com teor de 4 ppm na camada superficial pela análise de fertilidade. Note que a aplicação do P (fonte super triplo) foi mais eficiente quando feito em área total, 147,7 t/ha contra os mesmos 200 kg/ha no sulco, 104,2 t/ha no primeiro corte. Nas socas com as mesmas quantidades, efeito residual, a quantidade foi de 18,8 t/ha a favor da aplicação em área total.

Melhorou ainda mais a produtividade quando houve a combinação de aplicação em área total de P com aplicação no sulco, (200/200 kg de P₂O₅) com 171,8 e 100,2 t/ha respectivamente no plantio e soqueira (Morelli J et al. 1992).

Tabela 76 - Produções de colmos de cana-de-açúcar obtidos no experimento.

P ₂ O ₅ aplicado a lanço kg/ha	P ₂ O ₅ aplicado dentro do sulco (kg/ha)				Média
	0	100	200	300	
	Cana-planta				
0	67,8	100,9	104,2	127,5	100,3b
200	147,7	169,1	171,8	171,3	165,0a
400	158,1	168,7	172,5	173,1	168,1a
Média	124,8b ⁽¹⁾	146,2a	149,5a	157,3a	-
	1ª Soca				
0	44,7	63,6	72,9	77,1	64,6c
200	91,7	97,3	100,2	100,8	97,3b
400	104,7	106,3	109,3	112,3	108,2a
Média	80,2b	89,1ab	94,1a	96,7a	-

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%

Fonte: Morelli et al. 1992.

13.16. ASSOCIAÇÃO DO P COM MICORRIZA

A associação simbiótica de fungos micorrízicos com raízes de certas plantas é um fenômeno conhecido desde longa data, permitindo um maior volume de solo a ser explorado pelo sistema radicular, composto de raiz adicionado as hifas. Estas hifas são constituídas por filamentos microscópios muitas vezes retocidas formado micélios. Os fungos estão associados com o sistema radicular de algumas plantas (simbiose) chamado de Micorrizas num termo que significa ‘raiz fúngica’. Na natureza muitas plantas dependem desta associação.

O Fosfato Natural e as Rocha Fosfática, pode ser solubilizado pelas Micorrizas através de processos químicos e biológicos auxiliado na absorção do P tornando-o mais solúvel.

Em condições de campo no Brasil Central, (Modificado por Nahas, E, 1999), em solo argiloso oxidico, contendo 2 ppm de P-extraível pelo método Mehlich, sem esterilização do solo, a produção de soja e sorgo foi aumentada pela inoculação com fungos dos gêneros *Glomus* e *Gigaspora*. Em comparação com a testemunha de produtividade de 0,4 t/ha no caso de sorgo, o inoculante *Glomus macrocarpus* produziu 0,9 t/ha e na soja de 1,0 t/ha na testemunha foi para 1,4 t/ha com este mesmo inoculante. O inoculante *Gigaspora margarita* praticamente não houve diferença com a testemunha no caso da soja (Figura 64).

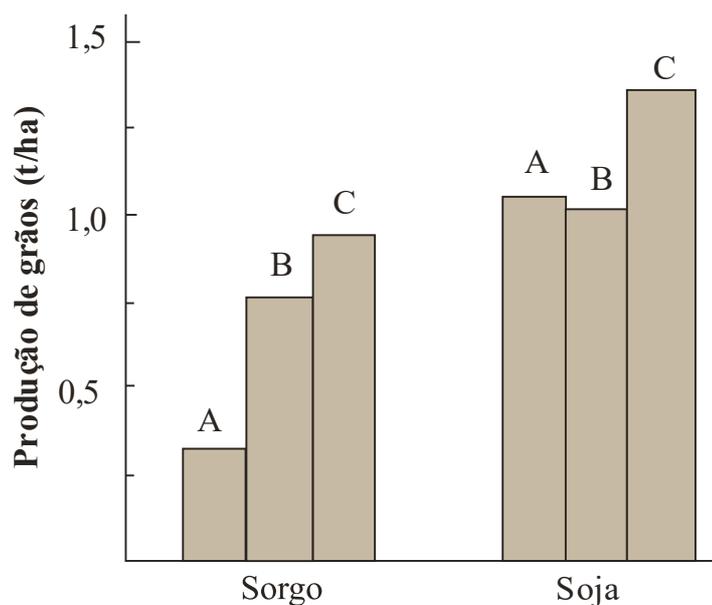


Figura 64 - Resposta de duas culturas à inoculação com micorriza em solo LE, contendo 2 ppm de P-extraível pelo método Mehlich. A - Sem inoculação. B - *Gigaspora margarita* e C - *Glomus macrocarpus*. **Fonte:** Modificado por Nahas E. (1999)

De qualquer modo da direção em relação a este tópico seria uma atribuição de melhoria do sistema radicular através de fungos para a captação não somente do P, mas também de água e nutrientes. Entretanto, tem sido verificado que ocorrem diversos obstáculos ainda que precisam ser elucidados, como o nível de sobrevivência de espécies exóticas de micorrizas em condições de solo e clima assim como o tipo da micorriza e a quantidade em relação aos tipos de culturas. Tem sido observado que em trabalhos de campo os inóculo não resistem as intempéries causadas pelo clima e solo, não somente a esta questão, mas também sobre o inóculo de sistemas para aumentar o teor de nitrogênio. Por outro lado, há necessidade de contornar os obstáculos tais como na produção de grandes quantidades de inoculantes, como realizar a inoculação em larga escala e uma relação custo/benefício (Raízen, 2012).

13.16. INTERAÇÕES DO FÓSFORO COM OUTRAS PRÁTICAS

A adubação fosfatada, e, também as demais, não pode ser considerada isoladamente, pois é apenas componente de um sistema de manejo do solo. Um determinado nível de produção pode ser obtido com diferentes combinações de calagens e teores adicionados de adição de fósforo como foi observado.

Sua eficiência de P pode ser influenciada por outras práticas, entre as quais a de maior peso é a calagem. Na Figura 65 e na cultura de feijões teores de calcário de 0,5, 1,5 e 4,0 t/ha e os teores de fósforo de 160, 778 e 1.374 kg/ha de P_2O_5 sendo que à medida que aumenta a correção do solo com o P, há aumento da quantidade de feijão. O mesmo pode ser observado pelo milho. No caso do trigo a quantidade de calagem foi de 0,5, 2,75 e 5,0 em t/ha e os teores de fósforo foram em relação ao P_2O_5 de 60 kg/ha a 1.080 kg/ha. Observe que 5,0 t/ha de calcário e 400 kg/ha de P_2O_5 foram teoricamente a melhor relação deste ensaio.

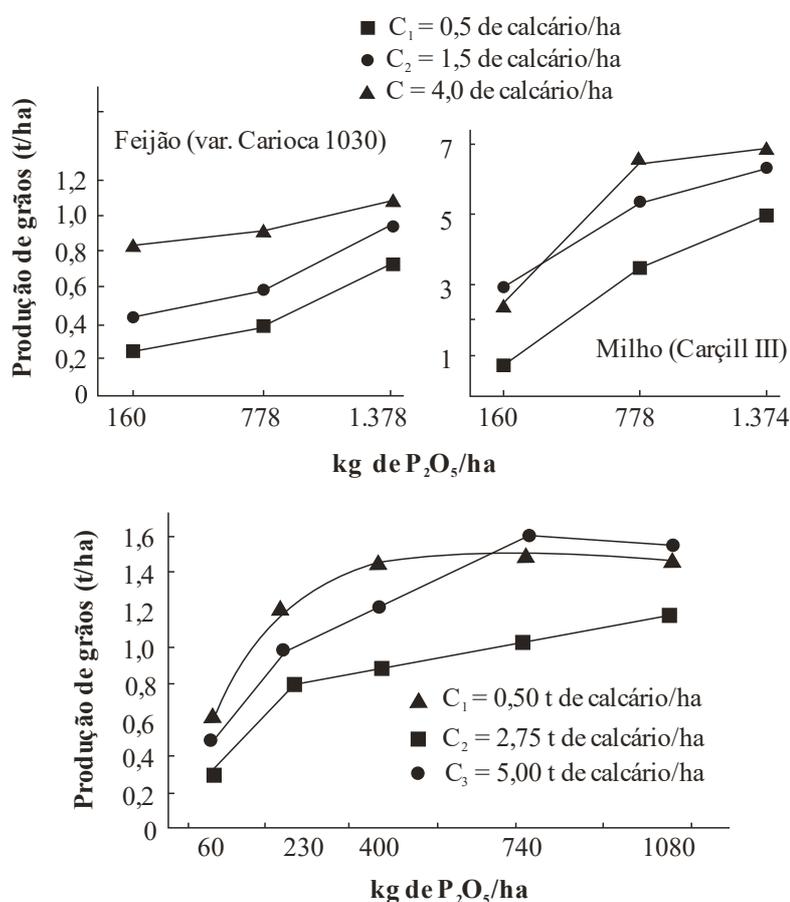


Figura 65 - Produção de feijão, milho e trigo em função de níveis de fósforo e de calcário, aplicados em solo argiloso oxidico. **Fonte:** Souza D.M.G.e Lobato, E. (2003)

Em relação à produção de trigo irrigado em solo argiloso do Brasil Central com baixo teor de fósforo, foi testada a correlação entre a eficiência de doses de N que pode ser também melhorada na combinação de fósforo com a calagem e níveis de K_2O . O fósforo foi aplicado na forma de Fosfato Reativo variando de 0-120-240-360-400-600 kg/ha de P_2O_5 , calagem níveis de 0-8 t/ha e teores de K_2O de 0 e 200 kg/ha. Os teores de nitrogênio foram de 0-40-160 em

kg/ha. Observe na Figura 66 que sem a calagem a produtividade foi baixa apesar dos teores de nitrogênio e de potássio serem adequados. Com calcário a produtividade foi maior.

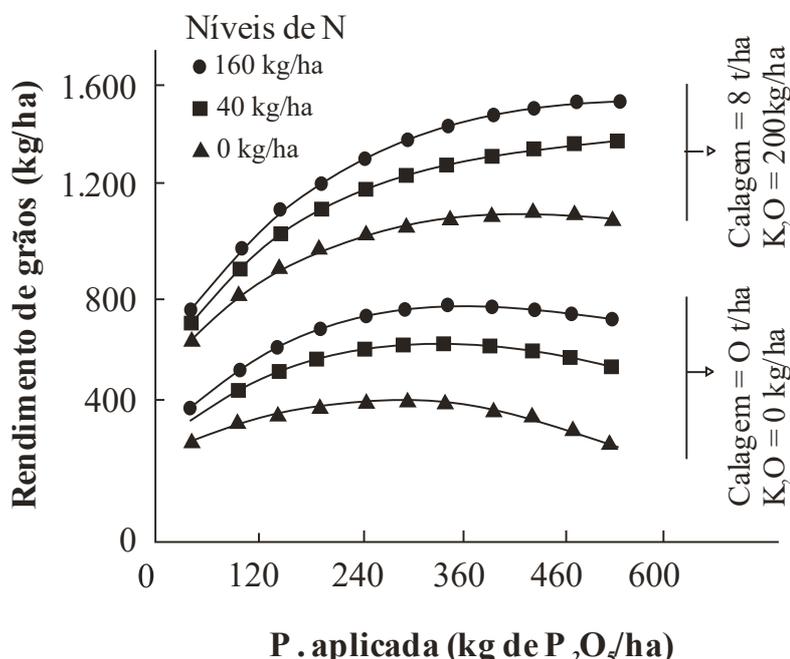


Figura 66 - Produção de trigo sob irrigação, em resposta a doses de fósforo, em diferentes níveis de adubação nitrogenada, e dois de adição de calcário e potássio, em solo LE. **Fonte:** Souza e Lobato (2003)

13.17. FATORES QUE AFETAM AS RELAÇÕES ENTRE O P DO ADUBO E O DA SOLUÇÃO DO SOLO

Nas aplicações localizadas do P solúvel no sulco de plantio vai haver a redução do contato do fertilizante com o solo, menor fixação, porém tal aplicação limita o desenvolvimento radicular com diversos efeitos negativos tais como na redução de absorção de água e nutrientes básicos para a cultura, assim como os efeitos negativos na resistência dos cultivos a períodos secos tendo uma maior possibilidade de ataque de pragas de raiz. Numa aplicação em área total, tem-se maior relação adubo/fósforo com todos os seus benefícios já preconizados.

Sendo assim as relações entre o P do adubo e o P solúvel da solução do solo, se no sulco ou aplicação em área total ou na combinação sulco-área total, depende do sistema empregado de manejo e da cultura.

13.18. EXPORTAÇÃO MÉDIA DE P e K EM CULTURAS ANUAIS

Na Tabela 80 indica a exportação de P e K nas culturas de soja, trigo, milho e girassol com número de observações tanto para P como K, de 1.008 observações para soja, 458 para trigo, 679 para milho e 451 para girassol. As exportações estariam na faixa em kg/t de P₂O₅ de 7,3; 5,8; 6,2 e 13,2 para soja, trigo, milho e girassol e 21,6; 3,9; 3,8 e 7,1 em termos de kg/t de K₂O.

No caso do girassol apresentou a maior absorção de fósforo enquanto na soja apresentou a maior absorção de potássio. O trigo apresentou a menor absorção de fósforo e de potássio entre as culturas testadas (Embrapa, Laboratório de Londrina - PR). Portanto, as exportações de P e K são dependentes do tipo de cultura.

Tabela 77 - Exportação média de fósforo e potássio pelos grãos das culturas de soja, trigo, milho e girassol utilizados nos cálculos do balanço de nutrientes.

Estrutura descritiva	Soja	Trigo	Milho	Girassol	
					Fósforo
Mínimo (g/kg)	1,1	1,4	0,9	3,1	
Máximo	8,7	4,1	5,4	8,5	
Média	3,2	2,5	2,7	5,7	
Desvio padrão	1,1	0,4	0,7	0,9	
Número de observação	1008	457	679	451	
Exportação média kg/t P ₂ O ₅	7,3	5,8	6,2	13,2	
-	Potássio				
Mínimo (g/kg)	3,6	1,8	0,5	3,4	
Máximo	35,6	5,4	16,1	9,7	
Média	17,9	3,2	3,2	5,9	
Desvio padrão	3,4	0,7	1,5	1,5	
Número de observação	1008	457	679	451	
Exportação média kg/t K ₂ O	21,6	3,9	3,8	7,1	

Fonte: Laboratório de solos e tecidos vegetais – Embrapa, soja Londrina/PR.

13.19. FOSFATAGEM

As aplicações de fontes de P em área total (solúvel em água ou não), em solos com baixos teores, significa “fosfatagem”. Dependendo da cultura, se grãos ou perenes, e dos

métodos de aplicação do P assim como da textura dos solos e ação das pragas de solos, a aplicação do P pode ser em área total ou combinado em área total e sulco de plantio.

Quanto à incorporação do P irá depender da topografia, (se plana ou inclinada), com grade de pré-plantio no caso de uma topografia inclinada, ou na superfície se as áreas forem planas.

Numa cultura anual, de espaçamento reduzido, as aplicações de fósforo no sulco de plantio, ao longo do tempo, seria teoricamente uma fosfatagem, como foi visto. O mesmo raciocínio se aplica em cana-de-açúcar se nas socas for aplicada a torta de filtro na faixa de 15 t/ha úmida (com teor de fósforo de 1,2%) e após cinco cortes, a quantidade de P_2O_5 não foi totalmente absorvida pela cultura sendo que a quantidade que sobra seria suficiente para fosfatagem, no novo ciclo de plantio da cultura.

13.19.1. Quantidade a Ser Aplicado de Fósforo na Fosfatagem

Em termos de quantidade a ser aplicado em área total não se tem ainda um critério, porém sabe-se que em solo de baixo teor de P, inferior a 3,0 ppm (método da resina) usa-se a fosfatagem. A quantidade de P a ser utilizada será determinada pelo gráfico através dos dados obtidos pela análise de fertilidade do solo no aplicado na camada superficial.

Se a análise indicar $5,0 \text{ g/dm}^3$ de P (ppm) as quantidades seriam em kg de P_2O_5 /ha na profundidade de 0-20 cm em função da textura do solo de 60, 90, 140 e 180 kg de P_2O_5 respectivamente para textura arenosa até a textura muito argilosa. Para facilidade de manejo use as relações de valores de 90, 120 e 140 kg/ha de P_2O_5 para solo arenoso, médio e argiloso respectivamente (Figura 67).

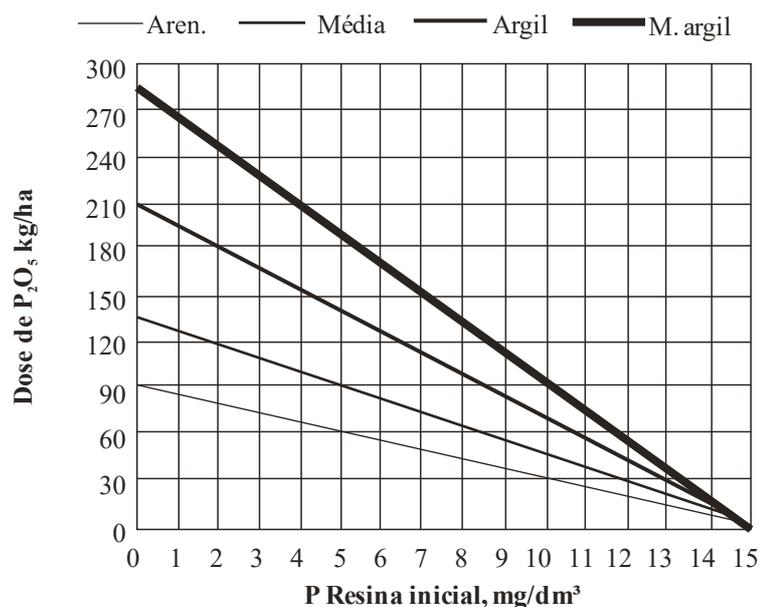


Figura 67 - Calibração para fosfatagem em relação a textura e teores de fósforo na análise e dose aplicada. **Fonte:** Goedert, W.J. et al. (1986)

Porém em relação aos teores de fósforo a quantidade de P a ser aplicada irá depender do tipo de cultura. Em cana-de-açúcar e em pastagem valores abaixo de 15 mg/dm^3 na análise de solos aplica-se a fosfatagem, podendo ser com FRN moídos sendo com aplicações entorno de 90 kg/ha de P_2O_5 total ou P solúvel em água de 60 kg/ha de P_2O_5 (Raij, B van, 2011).

13.19.2. Vantagens do Sistema

A aplicação do P em área total tende a aumentar a produtividade dependendo da cultura com os dados a saber; em área com nematoide a aplicação no sulco produz menos do que a produção em área total; menor aproveitamento do P do fertilizante no plantio se aplicado no sulco havendo uma maior concentração excessiva e menor aproveitamento do fertilizante de cobertura; menor ação da acidez do solo em fosfatos reativos se aplicado no sulco; menor absorção de água se for utilizado apenas no sulco de plantio.

A aplicação em plantio de P seria em área total e no sulco, após calagem e gessagem, podendo ser incorporado com grade de pré-plantio ou não dependendo do sistema adotado. Em relação a cobertura com palha, a aplicação pode ser sobre a palha ou sobre a cultura de cobertura, e não incorporado (Moreira, S.G 2019). Em soqueira de pastagens, cana-de-açúcar, eucalipto, aplicação seria em área total.

13.19.3. Fonte de P a Ser Utilizada na Fosfatagem

São indicadas as seguintes fontes: solúveis como os Super fosfato simples ou triplo, MAP, Yoorim Mg, Fosmag; fosfatos reativos tais como Arad, Gafsa, Bayover. No caso de produtos organomineral ou somente orgânicos, como torta de filtro, cama de frango, utilize as análises destes produtos em relação aos teores de P. No caso do uso de fosfatos reativos utilize os teores totais, e no plantio, se possível, fosfatos solúveis.

Na cultura de cana-de-açúcar e as fontes de P aplicadas no sulco de plantio, nota-se que o termofosfato e o supersimples são mais eficientes do que os teores de P menos solúveis indicando que no sulco de plantio as aplicações devem ser em fontes solúveis.

Na Figura 68 indica que Termofosfatos magnesianos e as fontes solúveis em água a produtividade em percentagem em t/ha nas doses de 50, 100 e 160 de P_2O_5 foi o mais eficiente com doses de 100 kg/t. O fosfato do Alvorada também com doses iguais, ocupa um lugar intermediário e o Araxá apesar de ter o seu desempenho ao longo dos 160 kg de fósforo continua solubilizando, porém com teores bem abaixo do Termofosfato.

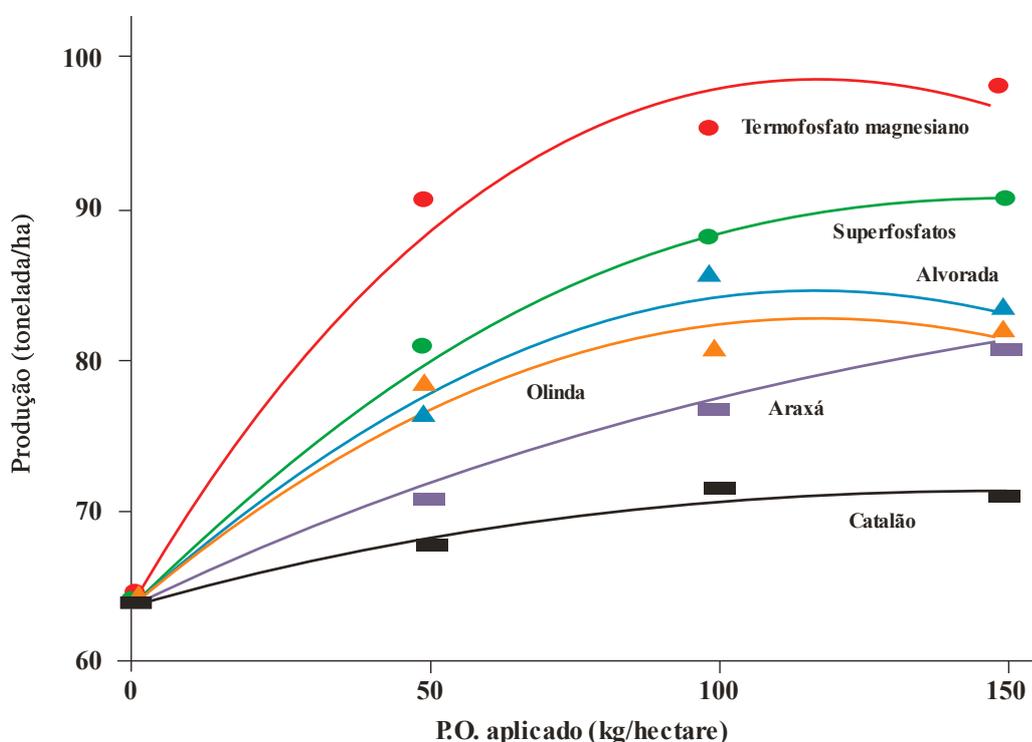


Figura 68 - Respostas da cana-de-açúcar a fosfatos aplicados no sulco em cinco ensaios.

Num experimento Tabela 81, em soqueira de quatro cortes em cana-de-açúcar em solo ácido na Usina Jales em Goiás em 2017, foi aplicado uma fosfatagem. Foram utilizados diversas fontes de fósforo solúveis e fosfatos reativos, aplicado em área total. Observe que os fosfatos reativos no início do ciclo até o segundo corte apresentaram baixa produtividade comparado com as fontes solúveis. No quarto corte a produtividade destas fontes tem sido superior aos fosfatos solúveis, ilustrando com isso que os fosfatos reativos se aplicam perfeitamente em área total, sendo superior aos solúveis ao longo do tempo.

Entretanto, na média do teor de P_2O_5 em ppm no caldo de cana, as fontes solúveis, no caso do MAP, têm sido superiores as fontes reativas.

Tabela 78 - Experimento em diferentes fontes de fósforo aplicado em área total.

Fonte fertilizante	Quantidade de produto kg/ha	Número de corte		Média 4° C	Caldo P205 ppm
		2° C	4° C		
MAP	200	77	106	88	
Super fosfato triplo	300	81	110	93	
Yoorin BZ	300	81	110	93	260
Arad	300	73	118	92	280
Itafos	300	74	118	92	236
Testemunha	0	65	96	78	217
Colheita 1° C outubro 2007, 2° C maio 2008, 3° C maio 2009, 4° C maio 2010.					

Fonte: Usina Jales – GO.

13.19.4. Decisões a Respeito da Fonte em Área de Fosfatagem em Pastagens

A Tabela 82 envolve a produção total de matéria seca de Braquiária decumbens, em latossolo, cultivado por cinco anos (10 cortes) em resposta a aplicação de doses crescentes de P_2O_5 e fontes de fósforo. As quantidades testadas em kg/ha de P_2O_5 foram de 86, 345 e 1.380 assim como as fontes FN Araxá, Gafsa (hiperfosfato), Yoorim, Superfosfato simples, este com 100% de Índice de Eficiência Agronômica.

As elevadas IEA dos superfosfatos e do termofosfatos (Yoorim), sugere que a decisão de escolha entre tais fontes é mais função do preço da unidade de P_2O_5 . Visto apenas por este ângulo fica favorecida a fonte de maior concentração de P, no caso o Super fosfato simples. Porém, ao se examinar as condições do solo de baixa fertilidade e de pH ácido e a quantidade a ser aplicada de P, a escolha pode recair no termofosfato (Yoorin), pois ele apresenta outros nutrientes como o cálcio e magnésio, atuando inclusive como calcário.

Observe que o fosfato natural de Araxá com as doses crescentes teve inclusive aumento do IEA, porém com valores abaixo de 83%, infelizmente não é adequada. O fosfato natural reativo de Gafsa foi mais eficiente com valores de 345 kg/ha de P₂O₅ com um IEA de 104%. Numa decisão, em relação às pastagens, seria escolhido o fosfato natural reativo de Gafsa.

Tabela 79 - Produção total de matéria seca de Braquiária decumbens L. cultivada durante cinco anos (10 cortes), em resposta a doses e fontes de fósforo aplicadas em solo argiloso.

Fonte de P	Kg de P ₂ O ₅	Produção		IEA ² (%)
		(t/ha)	(%) ¹	
Testemunha	0	23,5	17	-
F. N. Araxá	86	25,0	18	06
	345	76,2	55	61
	1380	118,1	86	83
F. N. Gafsa (Hiperfosfato)	86	44,8	33	79
	345	113,3	65	104
	1380	132,3	96	95
Termofosfato (Yoorim)	86	48,9	36	94
	345	112,9	82	103
	1380	144,4	105	106
Superfosfato simples	86	50,5	37	100
	345	110,0	81	100
	1380	137,8	100	100

⁽¹⁾ Produção em relação à obtida com aplicação de 1380kg de P₂O₅/ha, na forma de superfosfato simples.

⁽¹⁾ Índice de Eficiência Agronômica

Fonte: EMBRAPA (1978)

Neste aspecto Novais, R.F. e Smyth, T.J. (1999) apresentam uma tabela geral com os FN. Os tratamentos (tempo de contato solo (é maior); o teor de argila (maior seria melhor); acidez: (maior) e aração e gradagens, (melhor), e a Solubilização. Planta, P absorção. Estes dados permitem ter um geral do FN sendo que na Absorção do P, independente dos tratamentos, são menores.

13.20. APLICAÇÃO DE P EM SOQUEIRA DE PASTAGENS

Em relação a eficiência do P₂O₅ em soqueira de pastagens pode-se verificar num trabalho feito pela Embrapa de 1976 com Braquiária humidícola, que a aplicação de uma única vez de 100 kg/ha de P₂O₅ tem sido menos eficiente do que as aplicações de doses divididas de 50 kg/ha de P₂O₅ ao longo das safras a partir de 78/79, tem sido mais eficiente.

Tal fato vem corroborar que a divisão do teor de P_2O_5 em soqueira de pastagens foi devido a fixação pelo solo, no caso da aplicação de 100 kg/ha de uma única vez.

13.20.1. Nível de Manejo na Implantação de Pastagens

Nível médio de manejo: na instalação usar somente fósforo, faixa de 70 kg/ha de P_2O_5 em solo de textura média a arenosa e 90 kg/ha em solo argiloso, no sulco de plantio ou área total. Se possível usar fonte solúvel ou FNR. Na condução da pastagem, a cada 2 a 4 anos voltar a fazer as reaplicações na faixa de 50 a 60 kg/ha P_2O_5 também em área total, e se possível mediante avaliações de análises de solo, porém sem incorporação.

Nível elevado de manejo: há necessidade de se tratar a pastagem como se fosse uma cultura normal em termos de fertilizantes e corretivos. O uso do calcário é necessário, inclusive do gesso, assim como do nitrogênio (basicamente ureia) e cloreto de potássio na forma de KCl. Quanto ao P as recomendações são semelhantes aos casos anteriores.

Em solos de elevado teor de P, acima de 15 ppm para solos arenosos o procedimento é o de seguir as recomendações das curvas de calibração com aplicação de P em área total.

13.21. EXTRAÇÃO DOS NUTRIENTES DAS LEGUMINOSAS E PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Verifica-se que as leguminosas (Tabela 83) como cobertura de solos, extraem uma série de nutrientes do solo, inclusive de nitrogênio seguido pelo potássio. Dentre os macros nutrientes o P, com teores semelhantes ao enxofre, apresenta os teores mais baixos de extração.

Nas mesmas faixas que foram produzidas as leguminosas e depois de incorporada aos solos, foi sulcado para a produção de cana-de-açúcar com três cortes.

No primeiro corte da cana-de-açúcar nas faixas das Crotalaria juncea e Spectabilis, produziu mais cana-de-açúcar do que as demais leguminosas inclusive na testemunha. No terceiro corte as produtividades foram semelhantes a testemunha e na média final a área de pousio produziu na faixa de 89 t/ha enquanto as Crotalaria Juncea e Spectabilis produziu de 95 e 97 t/ha, 6 a 8 t/ha, muito pouco em considerando a reciclagem de nutrientes devido as leguminosas.

De qualquer maneira as vantagens de uma rotação de culturas têm sido imprescindíveis na cultura de cana-de-açúcar como reduzindo o processo erosivo. Porém fica evidente que os nutrientes reciclados pelas crotalárias são suficientes para o primeiro corte da cana-de-açúcar.

As demais leguminosas em termos de produtividade médias foram semelhantes ao pousio, indicando com isso ser necessário aplicar um adubo químico no sulco de plantio e soqueira da cana-de-açúcar.

Tabela 80 - Extração de nutrientes por leguminosas e médias de produtividade em três cortes.

Leguminosas	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg/ha					
Crotalaria juncea	235,0	18,5	101,5	53,3	29,1	16,3
Crotalaria spectabilis	113,4	8,8	94,5	63,0	15,5	7,6
Guandu	141,9	10,5	62,2	25,3	10,5	8,8
Mucuna ana	81,0	6,3	36,6	18,6	7,5	4,2
Mucuna preta	105,3	6,6	41,0	27,3	9,0	5,5
Lablabe	94,5	8,8	48,7	22,8	9,1	8,1
Feijão-de-porco	190,0	10,0	67,5	50,5	18,0	10,5

Leguminosas	Corte	Corte	Corte	Média
	TCH			
Pousio	118 b	84 b	64 ab	89,0
Crotalaria juncea	133 a	90 ab	63 ab	95,3
Crotalaria spectabilis	133 a	92 a	66 a	97,4
Guandu	126 ab	85 ab	61 ab	91,0
Mucuna ana	119 b	88 ab	59 ab	89,1
Mucuna preta	126 ab	87 ab	58 b	90,7
Lablabe	126 ab	85 ab	60 ab	90,8
Feijão-de-porco	126 ab	84 ab	60 ab	90,2
Dms Duncan 5%	9,49	7,82	7,41	-

Fonte: Caceres, N.T.et al. 1995.

13.22. ALTERNATIVAS DE MANEJO DO P

Neste caso há uma série de alternativas vistas anteriormente em relação ao manejo visando sempre no aumento do sistema radicular através de produtos químicos e biológicos e averiguar a possibilidade, de modo prático, no sentido de reduzir a adsorção pelo solo do P aplicado. Neste aspecto pode-se utilizar as culturas de proteção como as braquiárias e crotalárias que auxiliam a mobilização do fósforo pouco lábil do solo. Neste sentido há casos de soja, milho e aveia em produtividade, t/ha, com culturas de cobertura, como a liberação do P pela decomposição dos resíduos, principalmente pelas braquiárias. A ação de ácidos

orgânicos exsudatos pelas raízes pode auxiliar neste contexto, como visto na Tabela 84. Entretanto, sabe-se que ela existe, inclusive na possibilidade de ação em profundidade do P do solo, porém estudar a ciclagem do P neste contexto ainda é um desafio (Cruciol, et al. 2019).

Tabela 81 - Rotação de culturas e aumento de rendimento e atribuída à nutrição fosfatada.

Cultura principal	Sistema de cultivo	Produtividade t/ha
	Após 2 anos de milho/pousio	3,4
Soja	Após 2 anos de milho em consórcio com U. brizantha	3,7
	Após 2 anos de milho/pousio/soja/aveia branca	8,7
Milho	Após 2 anos de milho em intercalado com U. brizantha/soja/aveia branca	9,9
	Após 2 anos de milho/pousio/soja	1,5
Aveia branca	Após 2 anos de milho em intercalado com U. brizantha/soja	1,9

Fonte: Cruciol, C.A.C. et al. 2019, modificado.

CAPÍTULO 14: MANEJO DO NITROGÊNIO, POTÁSSIO, ENXOFRE, CÁLCIO, MAGNÉSIO E MICRONUTRIENTES

14.1. NITROGÊNIO

Dentre o NPK, o nitrogênio é o mais consumido pelas culturas no mundo (Cunha J.F et al 2010). No Brasil ele ocupa ainda o terceiro lugar entre os macros primários onde o baixo consumo se deve a soja e ao plantio da cana. Sendo assim o manejo deste nutriente é complexa e um dos mais difíceis a ser estudado sendo que as maiorias dos textos indicam que a extração pelas culturas (produção esperada) seria ainda um valor que deve ser utilizado na quantidade, assim como o histórico da área e o parcelamento em função da textura dos solos.

Apesar de ser no mundo o principal nutriente utilizado não há uma rocha que originam os solos com este nutriente, e sendo assim a fonte principal é o ar na forma molécula de N_2 . Há necessidade, entretanto para transformar o N_2 do ar em forma disponível no solo, necessidade de muita pressão e temperatura para quebrar a tripla ligação entre os átomos de nitrogênio.

Nos solos existem quantidades enormes de nitrogênio, sem o uso de fertilizantes, na forma orgânica e através das descargas elétricas das chuvas. As cargas elétricas transformam o N_2 em óxidos que são convertidos em ácido nítrico que chega ao solo via água das chuvas e rapidamente se transforma em nitrato sendo absorvido pelas plantas.

Em relação a matéria orgânica do solo foi visto que ao retirar a cobertura arbórea há queda da matéria orgânica e com isso o nitrogênio.

Outra fonte seria a fixação biológica, através dos microrganismos livres tais como as bactérias, fungos e algas capazes de fixar o N_2 com ênfase nas bactérias Azotobacter. Na agricultura a fixação do N_2 do ar é através de bactérias do gênero Rhizobium que ocorrem nos solos e nas leguminosas, quebrando a tripla ligação do N_2 , transformando-o em formas metabolizadas para a planta hospedeira. As formas de nitrogênio liberados pela ação das bactérias aeróbicas seria o amônio (NH_4^+), o nitrato (NO_3^-) e o nitrito (NO_2^-) que são imobilizados na matéria orgânica e podem ser mineralizados posteriormente. O nitrito é de vida curta sendo rapidamente transformados em nitrato, ambos sendo ânions e podem ser lixiviados. O amônio é um cátion e adsorvido como trocável nos solos.

14.1.1. Dinâmica do Nitrogênio nos Solos

As formas de nitrogênio no solo podem ser imobilizadas ou mineralizadas pela matéria orgânica, sendo, portanto, uma série de reações que ocorrem neste sistema. A longo prazo a dinâmica do nitrogênio não tem sido muito estudado. O nitrogênio está subordinado ao teor de matéria orgânica (MO) que ao longo do tempo, como foi observado, tende a decrescer buscando um novo equilíbrio dinâmico, porém em valores mais baixos do que o valor original e conseqüentemente, o nitrogênio. Em situações com culturas de cobertura com teores de MO maiores do que o original se lembre que a mineralização ela é dissociável com quedas acentuadas, se não for adicionada.

Como grande parte do nitrogênio está associado a matéria orgânica a liberação ou mineralização está associado a relação C/N, que deve ter valor inferior a 13 na camada superficial em solo bem drenado e com pH razoável na superfície. Resíduos frescos de matéria orgânica sendo adicionados nos solos eles serão rapidamente decompostos e os produtos (nutrientes, aminoácidos etc.) são fixados pela matéria orgânica do solo, e posteriormente sendo mineralizado.

A distribuição do N-NO₃⁻ depende das condições climáticas e de cargas positivas na subsuperfície dos solos em solo muito intemperizado. Suhet. A.R. et al. (1985) observaram no Brasil Central que no período seco a quantidade de N-NO₃⁻ em profundidade era pequena e no período chuvoso, novembro, a quantidade foi apreciável na profundidade de 100 a 240 cm com pico de N-NO₃⁻ em ppm de 15, na profundidade de 135 cm. Tal fato vem a explicar que no período úmido há liberação maior da matéria orgânica e por tabela o nitrogênio.

14.1.2. Disponibilidade

Neste aspecto há uma série de reações que fogem do escopo deste trabalho (ver Lindsay W. 1979). Entretanto, é numa mineralização da matéria orgânica, está explicada na seguinte expressão:



A mineralização pode ser ativada com o pH mais alto e uma adequada aeração, e a forma mais absorvida pela planta é o NO_3^- pois um se transforma no outro e vice-versa.

14.1.3. Resposta das Culturas

Este nutriente está concentrado nas folhas e podem ser mineralizados para o solo. As elevadas quantidades de nitrogênio absorvido pelas culturas indicam que tal nutriente não ser suficiente para prever respostas generalizadas às aplicações deste nutriente. Respostas ao nitrogênio variam de ano para ano e, portanto, torna-se difícil prever uma adequada quantidade a ser aplicada. Em relação a este tema há um princípio, ou seja, “o que a planta retirou na forma de N em seu ciclo, há necessidade de repor”.

Em trabalhos de Rajj B. van (2011) verificaram que dos 326 ensaios de diferentes culturas somente 48% deram respostas positivas ao uso deste nutriente e no caso de cana-de-açúcar no plantio, 90% não deram respostas tanto em solos argilosos como nos arenosos no plantio. No plantio quantidades de 0 a 60 kg/ha de N tem sido suficiente para altas produções de cana-de-açúcar (100 a 160 t/ha) significando que sendo feito no período úmido os microrganismos trabalham para mineralizar a MO e com isso maiores quantidades de N e nas soqueiras há respostas de acordo com os dados e as respostas devido ao N seria provavelmente as condições climáticas mais amenas, sendo que os microrganismos na decomposição da matéria orgânica apresentam uma menor atividade. Utilize os dados da Tabela 85 para as recomendações de NPK para socas (Penatti, 2013).

Use as curvas de repostas para as demais culturas ou as extrações de nutrientes.

Tabela 82 - Recomendação de adubação N-P-K para cana soca (K trocável mmolc.dm^{-3} N).

K trocável mmolc.dm^{-3}	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O
<0,6	100 – 30 – 130
0,7 – 1,2	100 – 30 – 100
1,3 – 2,1	100 – 30 – 70
2,2 – 4,2	100 – 30 – 40
>4,2	100 – 30 – 0
Quando: $\text{P} \leq 15 \text{ mg.kg}^{-1}$, aplicar 30 kg.ha^{-1} de P_2O_5	

Fonte: Penatti (2013)

14.1.4. Perdas de Ureia Aplicadas na Superfície

Em termos de nitrogênio as perdas de ureia aplicadas na superfície são de 40 a 60% devido à uréase, enzima do solo, que ataca a ureia decompondo-a e se perdendo. Com a incorporação do fertilizante as perdas são negligíveis.

Um dos fatores utilizados para a redução nestas perdas com a aplicação na superfície seria o revestimento deste fertilizante com um inibidor designado de NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) que funciona com solo úmido, com redução em soqueira de cana-de-açúcar de 38,5% nas perdas se comparado num solo seco de 11,8%.

Com tais resultados e no cultivo de grãos, as aplicações seriam no período úmido, viabilizando o produto. Entretanto, mesmo no período úmido com o inibidor e com aplicações na superfície da ureia, há perdas, ficando em poder do produtor em relação aos cálculos de ganhos e perdas do inibidor em função da ureia.

14.2. POTÁSSIO

Os minerais primários que apresentam maiores quantidades de potássio são os feldspatos e as micas, (moscovita e biotita) e no intemperismo desses minerais há a forma do K^+ não trocável. Tal forma estão presos na interface dos minerais filossilicatos (KÄMPF, F.N et al 2009) (dois tetraedros unidos pelo K sanduichando um octaedro), com coordenação 12, distribuindo 6 de eletrovalência para cada tetraedro, unindo-os formando lâmina dos minerais 2:1. Dependendo da intensidade do intemperismo este potássio pode sair desta interface e colocado na forma trocável no solo municiando a solução. Nesta forma ele pode ser assimilado pela planta ou perdido por lixiviação. Associado a estas etapas há os enriquecimentos através dos fertilizantes contendo este nutriente.

A planta absorve o potássio em maiores quantidades do que nitrogênio e fósforo na maioria das culturas.

14.2.1. Disponibilidade do Potássio

A disponibilidade do K normalmente se utiliza a forma de óxido, K_2O , porém o solo não absorve esta forma, mas sim somente de K^+ . Os solos de mineralogia 2:1 apresentam as formas de potássio fixado, trocável e solução, enquanto nos solos muito intemperizados de

mineralogia 1:1 apresentam as formas trocável e solução sendo que são considerados “potássio disponível”. O teor de matéria orgânica também adsorve K^+ através dos microrganismos, porém em pequenas quantidades.

Tem sido observado que em período de secas em solos muito intemperizados as plantas apresentam deficiência de K^+ , porém não seria por falta deste nutriente no solo, mas sim devido a relação de cátions, Ca^{2+} e Mg^{2+} que tende a reduzir a absorção de K^+ . A expressão na solução do solo seria a Relação da Atividade (RA) de cátions é a seguinte:

$$RA = \frac{(K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})^{1/2}}$$

Onde RA é constante, e a atividade de K^+ na solução do solo como numerador da expressão e os demais cátions bivalentes no denominador da equação, como raiz quadrada. Em períodos úmidos, com uma quantidade adequada de água disponível no solo, melhorando a difusão, ocorre a diluição da concentração salina assim como a de íons na solução do solo. Nesta sequência e para manter o RA constante, há adsorção de cátions bivalentes e dessorção de cátions monovalentes. Em períodos secos há redução da difusão pelo qual o K^+ que chega ao sistema radicular. Para ser mantida constante a relação RA os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} aumentam mais rapidamente do que o K^+ . Portanto, no período úmido há mais absorção de K^+ pelo sistema radicular da cultura.

Na Formação Geológica Marília que cobre grande parte do oeste de São Paulo, as terras arenosas apresentam teores elevados de potássio normalmente 5 a 7% da CTC sendo que a explicação estaria no intemperismo menos acentuado nestes solos e a presença de mineral primário ortoclasio.

Na Tabela 86 ilustra as quantidades de potássio trocável em diferentes solos incluído num solo arenoso da Formação Marília (Pml) cujo teor de potássio na camada superficial era de 128 ppm, elevado para um solo arenoso, sendo que na relação absorção/diminuição foi de 1,2, superior a solos mais argilosos, como o LRe na superfície com relação 1,1 (Raij B. van e Quaggio, 1984).

Nesta Tabela 86 ilustra as condições de um solo orgânico (H), encharcado com água, com mineral 2:1 e de relação 0,7, bem inferior ao solo da variação Marília. Tais fatos tendem a

ilustrar que os solos tropicais devido a maior profundidade e possibilidade de exploração pelos sistemas radiculares das plantas do que solos de clima temperado, tendem a ter minerais intemperizáveis ao longo do perfil e, portanto, tenham potássio fixado e à medida que forem sendo intemperizados podem ser aproveitados pelas culturas.

Tabela 83 - Potássio trocável e solos, antes e depois de três cortes de capim-braquiária, potássio absorvido pelo capim e diminuição de potássio no solo nas camadas superficiais.

Solo	Potássio trocável		Potássio absorvido	Diminuição de K ⁺ no solo	Relação Absorção/diminuição
	Inicial	Final			
LEa-Ap	54	14	68	40	1,7
LRe-Ap	305	29	257	276	0,9
LRe-B	101	7	104	94	1,1
LRd-Ap	38	18	51	20	2,6
H-Ap	276	40	176	236	0,2
Pml-Ap	128	23	127	105	1,2

Lea: Latossolo Escuro arenoso. LRe: Latossolo Roxo eutrófico

LRd: Latossolo Roxo distrófico, H: Histossolo, Pml: Solo pobbolizados variação Marília

Fonte: Rajj e Quaggio, 1984 modificado.

14.2.2. Potássio nas Plantas

A grande maioria do K⁺ é absorvido nesta forma iônica e assim permanece na planta não tendo posição específica, porém sua ação tem sido inúmera como nas reações enzimáticas, aminoácidos e na manutenção da turgidez das células.

Como o K não faz parte específica de compostos na planta, ele está livre e se movimenta desde as folhas até o sistema radicular no vegetal. Porém uma vez colhido a cultura, ele está livre na palhada que fica na superfície do solo e pode ser absorvido pela cultura ou retido pela CTC do solo ou perdido por lixiviação. Na cana-de-açúcar e após o corte a quantidade de palha pode chegar a 10 t/ha e na forma na forma de K₂O de 40 kg/ha. As usinas de açúcar têm modificados as formulações de fertilizantes devido a este valor de potássio.

14.2.3. Respostas de Culturas a Potássio e Sistemas de Manejo

No caso deste nutriente na forma de KCl, em relação as culturas anuais têm sido preconizadas que seja feito com aplicação total no sulco de plantio ou com 50% no sulco e o

restante em cobertura. Em solos arenosos de baixa CTC o parcelamento é preconizado apesar de ser questionado sendo que o parcelamento juntamente com o nitrogênio tem sido aplicado com êxitos pelos agricultores.

No sulco de plantio o fertilizante deve ser aplicado ligeiramente afastado da semente devido ao efeito salino principalmente do KCl na faixa de 116 de condutividade elétrica contra 100 de NaNO_3 . Após diversos ciclos de culturas e com aplicação do fertilizante no sulco de plantio, seria praticamente uma potassagem (aplicação do potássio em área total). Neste aspecto em solos de elevada CTC, superior a $8\text{-}10\text{ cmol/dm}^3$ as aplicações bandeadas no sulco de plantio podem ser mais favoráveis do que o parcelamento, aplicado ao longo da cultura.

No plantio em culturas perenes use a aplicação bandeada do K_2O nas laterais e fundo de sulco levando-se em consideração a incorporação da palhada da cultura anterior, deduzindo assim a quantidade de K_2O incorporado ao solo. Em solos de baixa CTC e no plantio utilize as mesmas considerações feitas em culturas anuais. Use as recomendações feitas nas tabelas de indicações da quantidade do fertilizante como indicado. Ver a reciclagem de culturas de cobertura de potássio.

14.2.4. Quantidade a Ser Aplicada em Função das Culturas

A Tabela 87 indica a quantidade a ser aplicada de potássio trocável na forma de K^+ (mmol/dm^3) e de fósforo na forma de P (mg/dm^3), em função da produção relativa das culturas anuais e perenes (Raij B. van et al., 1996).

Tabela 84 - Limites de interpretação de teores de potássio e de fósforo em solos.

Teor	Produção relativa %	K^+ trocável mmol/dm^3	P resina (mg/dm^3)			
			Floresta	Perenes	Anuais	Hortaliças
Muito baixo	0 – 70	0,0 – 0,7	0 – 2	0 – 5	0 – 6	0 – 10
Baixo	71 – 90	0,8 – 1,5	3 – 5	6 – 12	7 – 15	11 – 25
Médio	91 – 100	1,6 – 3,0	6 – 8	13 – 30	16 – 40	26 – 60
Alto	>100	3,1 – 6,0	9 – 16	31 – 60	41 – 80	61 – 120
Muito alto	>100	>6,0	>16	>60	>80	>120

Fonte: Raij et al. (1996)

14.3. MANEJO DO ENXOFRE, CÁLCIO E MAGNÉSIO

14.3.1. Enxofre

O enxofre é um não metal sendo que a fonte primária deste nutriente são as rochas ígneas ocorrendo em pequenas quantidades como sulfetos. No solo a maior fonte deste nutriente é a matéria orgânica combinado com o carbono e nitrogênio. No solo ele é absorvido na forma de SO_4^{2-} sendo um ânion específico. Devido ao uso frequente do calcário e fósforo nos sistemas de manejo dos solos as cargas positivas na camada superficial são diminuídas e, portanto, não sobriam cargas positivas para fixar o SO_4^{2-} e sendo assim o acúmulo deste nutriente seria na subsuperfície.

Na maioria das culturas ele está na faixa de 10 a 30 kg/ha na matéria seca. Em condições aeróbicas no solo ele ocorre na forma de sulfato e em condições anaeróbicas na forma de sulfetos, podendo haver desprendimento de H_2S podendo haver até formação de enxofre elementar. A atmosfera é uma fonte importante deste nutriente principalmente devido a poluição e queima de carvão e demais resíduos pelas indústrias.

A mineralização da matéria orgânica deste nutriente é basicamente afetada pela relação de C/N/S e na proporção em números seria de 100:10:1. Existe a possibilidade de imobilização do enxofre se a relação C/S ou N/S for muito alta, e a liberação se estas relações forem baixas (Brandy e Weil, 2013).

Na planta o enxofre participa das proteínas assim como aminoácidos tais como a cistina e a metionina, e os teores foliares estando na faixa de 2 a 5 g/kg de matéria seca. A necessidade de enxofre nas maiorias das culturas estaria na faixa de 10 a 30 kg/ha. As respostas de culturas em relação a este nutriente são frequentes sendo que um problema sério reside na ausência deste nutriente nos fertilizantes NPK concentrados, aplicados nas lavouras.

Fontes deste nutriente estaria no superfosfato simples, sulfato de amônio, sulfato de potássio e no gesso.

14.3.2. Teores de Cálcio e Magnésio

Tanto o Ca^{2+} como o Mg^{2+} são oriundos do intemperismo de rochas primárias como as ígneas e metamórficas como feldspatos calco-sódicos, anfibólios etc. Através dos sistemas de formação das rochas eles podem estar nas rochas sedimentares. Além destas fontes tem sido

encontrada em maiores proporções nas dolomitas, calcita, apatita. Nos solos estariam na forma trocáveis que estão em equilíbrio dinâmico com a solução do solo, onde podem ser absorvidos ou perdidos por lixiviação. Na sequência de íons retidos pelo solo o Ca^{2+} trocável é mais retido do que o Mg^{2+} assim como nas análises de solos. No caso do Mg^{2+} ser mais abundante do que o Ca^{2+} seria ele estar na forma trocável nos micros agregados como ocluso assim como nos solos salinos e alcalinos na forma de sais.

Em termos da cultura o Mg^{2+} é requerido na quantidade de 10 a 40 kg/ha e na análise foliar estaria na faixa a de 2 a 4 g/kg de matéria seca enquanto do Ca^{2+} é requerido na faixa de 10 até 200 kg/ha e na análise foliares de 4 a 40 g/kg. O Mg^{2+} participa numa reação importantíssima na planta que é a fotossíntese, sendo muito móvel onde se transloca de folhas mais velhas para as folhas mais novas.

Pelo contrário o Ca^{2+} é pouco móvel nas plantas não sendo transportado pelo floema e sendo assim é importante a ocorrência deste cátion no solo e principalmente na interface solo-raiz. Sendo assim o sistema radicular não penetra em solos deficientes em cálcio. Tanto um como o outro cátion são supridos pelo calcário ou pelos fertilizantes contendo tais nutrientes, como o superfosfato simples, o gesso, no caso do Ca^{2+} .

A Tabela 88 indica em mmol/dm^3 a quantidade de SO_4^{2-} variando de teor baixo a elevado assim como os teores de cálcio e de magnésio (Raij B. von et al. 1996).

Tabela 85 - Limites de interpretação para cálcio, magnésio e enxofre.

Teor	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
	mmol/dm^3		
Baixo	0 – 3,0	0 – 4,0	0 – 4
Médio	4 – 7,0	5 – 8	5 – 10
Alto	>7,0	>8,0	>10

Fonte: Raij et al. (1996)

14.4. MANEJO DE MICRONUTRIENTES

A aplicação de micronutrientes via aérea ou no solo seria apenas para suprir uma deficiência nutricional, e, portanto, a adubação via solo implica numa recuperação química levando-se em consideração as reações do solo. A principal consequência deste fato é que no solo se aplica muito mais fertilizantes e corretivos do que via aérea apresentando uma relação em termos de para cada quilo de aplicação aérea corresponde a 10 kg do solo podendo chegar

a 40 no caso do cálcio. Entretanto estas quantidades irão depender da cultura e da quantidade a ser aplicada. Neste aspecto há compêndios e fontes específicas para serem consultadas.

14.4.1. Características dos Micronutrientes

Dependendo do material de origem dos solos, do teor de matéria orgânica, do pH, do adubo, dos insumos aplicados na recuperação da fertilidade no caso calcário e gesso, assim como fungicidas e demais produtos aplicados na cultura, podem apresentar apreciável teores de micros.

Tem disso relatado que de 2,0 t/ha num calcário de PRNT de 80% tem apresentado, em g/ha, 120 de Zn, 58 de Cu, 7.520 de Fe, 1.270 de Mn e 378 de B. Havendo deficiência, constatado na planta, por diagnóstico foliar ou pelas análises de solos, fazer as aplicações necessárias. Há micros com maior ação quando aplicado no solo, como as Fritas BR12 na quantidade de 30 a 50 kg/ha, enquanto, que outros como os sulfatos de zinco e de cobre tem maior eficiência quando aplicado nas folhas.

Análises de solos feitas em laboratórios como da ESALQ em Piracicaba, SP, indicaram 85% de deficiências de boro e zinco.

A seguir as principais características dos micros.

- **Boro:** sendo um não metal, é caracterizado pelo seu comportamento aniônico, e no mineral ocorre nas turmalinas, mineral de difícil decomposição. Na solução do solo o ácido bórico (H_3BO_3) é a sua forma dominante, sendo um ácido muito fraco com $pK_i = 9,24$ sendo que a dissociação do ácido ocorre em pH acima de 7,0. Nos solos a quantidade deste micro é muito variável de 1,0 mg/kg a 467 mg/kg. Ele é adsorvido na forma de óxidos como ácido bórico, podendo também ser encontrado na matéria orgânica. De qualquer maneira o boro é o mais móvel no solo dentre os micros, exceto o cloro, podendo ser lixiviado, principalmente em solos arenosos.

- **Molibdênio:** No solo tem um comportamento aniônico sendo, porém, um metal, com situações semelhantes ao fósforo sendo um ânion específico. Como é um micro de teores mais baixos que se tem conhecimento, sendo encontrado nos solos desenvolvidos de granitos podendo ser encontrado na faixa de 2 mg/kg, entretanto tal valor é extremamente variável. O mineral primário do molibdênio é a molibdita, um sulfeto (MoS_2), podendo ser oxidado e transformado em íons que podem ser absorvidos. Tais íons, no caso o Mo_4^{2-} ocorrendo acima

de pH 7,0 e o HMoO_4^{2-} em meio ácido. Neste caso é semelhante ao íon fosfato à medida que aumenta o pH até a faixa de 7,0 a sua disponibilidade aumenta.

- **Zinco:** seu teor varia de 80 mg/kg a 120 mg/kg em rochas magmáticas na forma de sulfetos (ZnF) e pode ocorrer na forma de substituição isomorfa nos silicatos no lugar do Mg^{2+} assim como na matéria orgânica. Devido ao intemperismo o sulfeto pode ser dissociado ocorrendo na forma iônica de Zn^{2+} onde é absorvido. Neste aspecto o Zn^{2+} sofre a reações com o pH, sendo mais adsorvido pela superfície do mineral do solo a média que se torna mais ácido.

- **Cobre:** este micronutriente ocorre nas rochas na forma de sulfetos facilmente intemperizados liberando íons de cobre especialmente em meio ácido como o Cu^{2+} que é absorvido pelas cargas negativas do coloide assim como na matéria orgânica. As deficiências são muito encontradas em solos orgânicos devido a adsorção do íon pelo material orgânico. No solo ele é pouco móvel com teores médios de 6 mg/kg a 60 mg/kg.

- **Manganês:** sendo um dos micros nutrientes mais comuns na litosfera com teores variando de 350 mg/kg a 2.000 mg/kg. A decomposição de rochas pelo intemperismo ocorre na forma iônica de Mn^{2+} , Mn^{3+} e Mn^{4+} sendo que esta forma é mais inerte. Tais formas podem ser encontradas em minerais secundários de solos de comportamento químico muito complexos. Tais compostos de manganês podem ser oxidados ou reduzidos dependendo das condições do solo. A forma de manganês mais solúveis é o Mn^{2+} apresentando-se como cátion trocável e na solução do solo podendo ser absorvido, porém em meio ácido.

- **Ferro:** como elemento metálico é o mais comum na crosta da terra, sendo a química muito complexa devido à facilidade de mudança de valência de Fe^{2+} a Fe^{3+} . O seu comportamento nos solos está ligado as ciclagens do oxigênio, enxofre e carbono nos solos, ele ocorre mais facilmente nos óxidos e hidróxidos com valores na forma iônica de 5 a 50 g/kg podendo ser mais elevados dependendo na fonte de intemperismo. No Brasil e com rochas eruptivas básicas tais valores podem atingir 100 ou mais g/kg. Porém os teores de ferro solúvel na solução do solo, possível de serem absorvidos são extremamente baixos. Neste aspecto há diversas formas catiônicas tais como Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^{2+}$ que sofrem a influência do pH do solo. As formas Fe^{2+} e Fe^{3+} são dependentes do ambiente de solos, se encharcado a forma reduzida prevalece e aerados a forma oxidada prevalece.

- **Cloro:** ocorre na forma iônica de Cl^- sendo um componente comum nos sais de sódio, potássio, cálcio e magnésio. No solo e íon Cl^- é muito móvel apresentando semelhança neste aspecto com o nitrato, ambos sendo íons que não reagem com a superfície positiva dos coloides,

principalmente na subsuperfície do solo. No solo o elemento origina-se no material de origem, nas contribuições da atmosfera, pela água de irrigação e adubações principalmente pelo KCl.

Na publicação em trabalhos de Rajj B. von 2011 indicam que em termos de São Paulo e no Brasil os valores de teores muito baixos até teores muito altos dos micros nutrientes, são semelhantes. Assim é que o boro e o zinco de maneira geral decrescem à medida que passa do teor baixo para teores mais elevados. O manganês apresenta-se com frequência mais elevadas (Tabela 89).

Tabela 86 - Porcentagem de ocorrência de micros nutrientes e as classes de interpretação

Micronutrientes	Frequência de ocorrência (%)			
	Teor baixo	Teor médio	Teor alto	Teor muito alto
	Estado de São Paulo			
Boro	37	55	6	2
Cobre	7	26	21	46
Ferro	1	16	30	53
Manganês	8	26	16	50
Zinco	20	21	51	8
	Demais estados			
Boro	43	42	10	5
Cobre	16	26	18	40
Ferro	1	12	27	60
Manganês	24	27	11	38
Zinco	33	20	16	11

Fonte: Rajj, 2011.

14.4.2. Fatores Que Afetam a Disponibilidade dos Micros

Diversos fatores atuam nas deficiências dos micros e sendo assim seriam levantadas as principais tais como o pH do solo. Sobre este parâmetro a disponibilidade dos micros decresce com o pH, inclusive o Molibdênio, exceto os micros positivos que aumentam como o decréscimo de pH.

Quanto a textura dos solos e os micros aplicados quanto mais argilosos e oxídicos a adsorção dos micros positivos é grande, reduzindo assim a disponibilidade, sendo reduzido para solos arenosos.

Porém nas plantas tais limites são inconclusivos, haja visto os teores exigidos pelas culturas anuais e perenes relatados por Malavolta (1985) sendo considerados valores modestos se comparados atualmente com valores bem mais elevados. Devido a tais fatos seria esta a razão

pelo qual “o princípio de restituição de nutrientes seria de uso limitado em relação aos micros nutrientes” (Fernandos et al., 2009).

Em relação a este assunto não se sabe até que ponto a deficiência que reduz a produtividade, porém sem causar sintomas nas plantas, estaria afetando a produtividade das culturas. Neste caso as deficiências devem ser corrigidas por regiões e por culturas, através de tabelas geradas e incorporadas os micros nos fertilizantes.

De modo geral as deficiências quando aplicados nos solos são generalizadas no boro e zinco e em menor grau no cobre e manganês. A deficiência de molibdênio assim como nos micros negativos pode ser corrigida pela calagem e a do ferro na forma de Fe^{3+} e sua deficiência ocorre principalmente em solos alcalinos. A deficiência de cloro ainda não foi definida e constatada em condições de campo.

Deve ser levado em consideração que as grandes produtividades obtidas nos solos recuperados quimicamente, podem apresentar deficiências de micros ao longo do tempo, principalmente nos solos arenosos.

14.4.3. Composição de Micros

Tais composições dependem das regiões de ocorrência dos solos e da cultura. Na região de Goiás em cana-de-açúcar, tem sido evidenciada semelhanças nas formulações de micronutrientes. Tais formulações diferem umas das outras no preço e em relação as percentagens, agentes quelatizantes e dos produtos. Note que os teores de Zn e B sempre têm sido considerados em maior quantidade, independente da empresa fornecedora (Tabela 90).

Tabela 87 - Teores de micros nutrientes de alguns fornecedores

Fornecedor	Quimifol		Nytry Cana		Brenntag		BIOJOSA	UBYFOL	GTS	BVI
R\$	33,91	90,00	30,00	75,00	47,00	68,00	75,00	91,95	93,00	115,00
-	kg/ha na dose recomendada pelo fabricante									
B	0,108	0,108	0,038	0,125	0,129	0,129	0,096	0,080	0,036	0,134
Zn	0,360	0,360	0,390	0,375	0,382	0,382	0,204	0,200	0,041	0,360
Mn	0,108	0,108	0,234	0,250	-	-	0,118	0,200	0,028	0,088
Mo	0,036	0,036	0,004	0,050	0,076	0,076	0,068	0,040	0,007	0,070
Cu	0,072	0,072	-	-	0,038	0,038	-	0,040	0,019	0,120
Fe	0,018	0,018	-	-	-	-	0,130	-	-	0,060
Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,006
N	-	4,200	0,078	5,00	-	4,140	3,080	0,960	0,270	-
P	-	-	-	-	-	-	-	-	0,180	0,740
K	-	-	-	-	-	-	-	-	0,390	0,600
Mg	0,180	0,180	-	-	0,048	0,048	-	-	-	-
S	0,468	0,468	0,312	0,325	0,307	0,307	-	0,226	-	0,150

Fonte: Usina São Francisco, Quirinópolis – GO, 2019.

14.4.4. Micro e Solubilidade

A solubilidade dos compostos a serem utilizadas nos solos e nas aplicações aéreas tem sido levado em consideração em função da solubilidade. Neste caso os menos solúveis são indicados para o uso nos solos e os mais solúveis utilizados em aplicações aéreas e também nos solos.

- **Menor solubilidade:** são produtos usados preferencialmente nos solos tais como as Fritas BR 12 de liberação lenta, na quantidade de 30 a 50 kg/ha. Tais produtos apresentam uma quantidade razoável de micronutrientes e são designados por uma série de letras. Outros produtos como os óxidos e oxi-sulfato, como de Zn e Cu são muito utilizados. As fontes de boro utilizadas como ulexita (10,5% de B); colemanita (9,5% de B) são indicadas na aplicação aérea. O ácido bórico é muito solúvel e perdas por lixiviação têm sido constatadas.

- **Maior solubilidade:** os sulfatos são as fontes mais utilizadas de sais metálicos e se possível como fontes quelatizadas como Cu; Zn; Mn; Fe etc. Muito utilizado em aplicação foliar e podem também ser aplicados no solo. No caso de molibdênio tem sido utilizado em aplicação foliar o MoNa (mais usados) e MoNH₄.

- **Quelatos:** São compostos que protegem micros catiônicos podendo ser sintéticos ou naturais, como açúcares e matéria orgânica e são solúveis em água sendo os mais comuns o EDTA (Ácido Etileno Diamino Tetracético) e o DTPA (Ácido Dietileno Triamino Pentacético).

14.4.5. Sugestões de Uso

Os solos devem estar recuperados quimicamente com pH faixa 5,5 a 7,5. Na aplicação via solo, os micros estariam melhorando as condições químicas e independe das condições climáticas.

Numa aplicação foliar em cana-de-açúcar, no período úmido, as condições climáticas é que irão governar o aumento da produtividade. Num ano com verânicos severos, aplicação foliar de micros pode não dar resultados como na Tabela 91 onde a aplicação correu em verânicos (Nicchio, B. 2017).

Tabela 88 - Aplicação de micros nutrientes em soqueira de cana-de-açúcar com produtividades semelhantes à testemunha.

Micro foliar: mistura de sais com 11,3% S; 4% B; 2% Cu; 10% Mn; 10% Zn; 2% Mo;									
Densidade: 1,3 g/mL									
N-foliar: mistura e/ou solução sais; e contém 32% (416 g/L de N; Densidade: 1,3 g/mL)									
Produtividade de cana sendo após 180 dias aplicação dos fertilizantes via foliar na cana soca									
Testemunha	Micro	N	TCH	TAH	ATR	Corte	Variedade		
Usina Vale do Tijuco							2°	RB867515	
-	1,0 kg/ha	3,0 L/ha	110	a	15,5	a	140	-	-
-	2,0 kg/ha	6,0 L/ha	109	a	15,2	a	139	-	-
-	3,0 kg/ha	10,0 L/ha	112	a	15,7	a	139	-	-
Controle	-	-	106	a	14,6	a	137	-	-
testemunha	-	-	113	a	15,8	a	138	-	-
CV	-	-	12,6	-	12,3	-	3,1	-	-
Usina Aroeira							3°	SP813250	
-	1,0 kg/ha	3,0 L/ha	71	a	10,8	a	149	-	-
-	2,0 kg/ha	6,0 L/ha	76	a	11,9	a	151	-	-
-	3,0 kg/ha	10,0 L/ha	67	a	10,2	a	149	-	-
Controle	-	-	73,7	a	11,3	a	150	-	-
testemunha	-	-	66,7	a	10,2	a	149	-	-
CV	-	-	14,2	-	14,7	-	3,2	-	-
Usina Delta							2°	RB855536	
-	1,0 kg/ha	3,0 L/ha	91	a	16,8	a	157	-	-
-	2,0 kg/ha	6,0 L/ha	83	a	15,8	a	156	-	-
-	3,0 kg/ha	10,0 L/ha	85	a	14,1	a	155	-	-
Controle	-	-	74	a	12,9	a	152	-	-
testemunha	-	-	74	a	13,3	a	152	-	-
CV	-	-	16,6	-	18,9	-	5,5	-	-
Médias teste de Tukey 5%									
Tratamentos	Produto	Dose							
Testemunha	Água								
Controle	Ácido bórico	200 g/ha							
	Sulfato Mn	300 g/ha							
	Sulfato Zn	300 g/ha							
	Ureia	5 kg/ha							

Fonte: Nicchio, B., 2017. STAB – Ribeirão Preto.

14.5. ADUBAÇÃO FLUIDA

Em relação às adubações fluidas e sólidas não há diferenças na produtividade das culturas, pois os nutrientes são semelhantes e assim como suas reações no solo. Entretanto, a eficiência de adubos fluidos é maior. No Brasil tem tido avanços e recuos em relação às adubações fluidas. Os motivos são vários, entre eles os seguintes: dificuldade em acertar a relação entre o transporte da solução fluida e o campo de aplicação das culturas; necessidade de se ter equipamentos adequados de aplicação no campo; dificuldade de aquisição do NH₃ em

épocas de forte demanda para a indústria; dificuldade de ajustar a composição fluida no campo em épocas de frio intenso, etc.

14.6. USO EFICIENTE DOS FERTILIZANTES

Neste aspecto seria enfatizado somente ao uso da lei dos “Incrementos Decrescentes de Fertilizantes” (Demattê, J.L.I., 2005). Em resumo esta lei informa que “...os aumentos sucessivos de quantidades iguais de fertilizante correspondem a um incremento decrescente da produtividade”. Em outras palavras, quando se chega a um patamar adequado de produtividade o uso de mais fertilizante não paga o acréscimo de produção. Os maiores ganhos com o fertilizante seriam na fase inicial, onde numa mesma quantidade de fertilizantes houve um acréscimo acentuado de produtividade. Na fase final, um mesmo acréscimo do fertilizante teria um aumento pequeno de produtividade ou não haver tal acréscimo (Figura 69).

Em situações em anos ruins de preços dos produtos onde se tem utilizado por diversos anos o fertilizante adequadamente em função da expectativa de produção, assim como tem-se usado os corretivos, nada impede que se reduza a quantidade de fertilizante entre 8% e 12%. Em casos como estes há sempre reservas no solo que podem ser utilizadas em anos de carência.

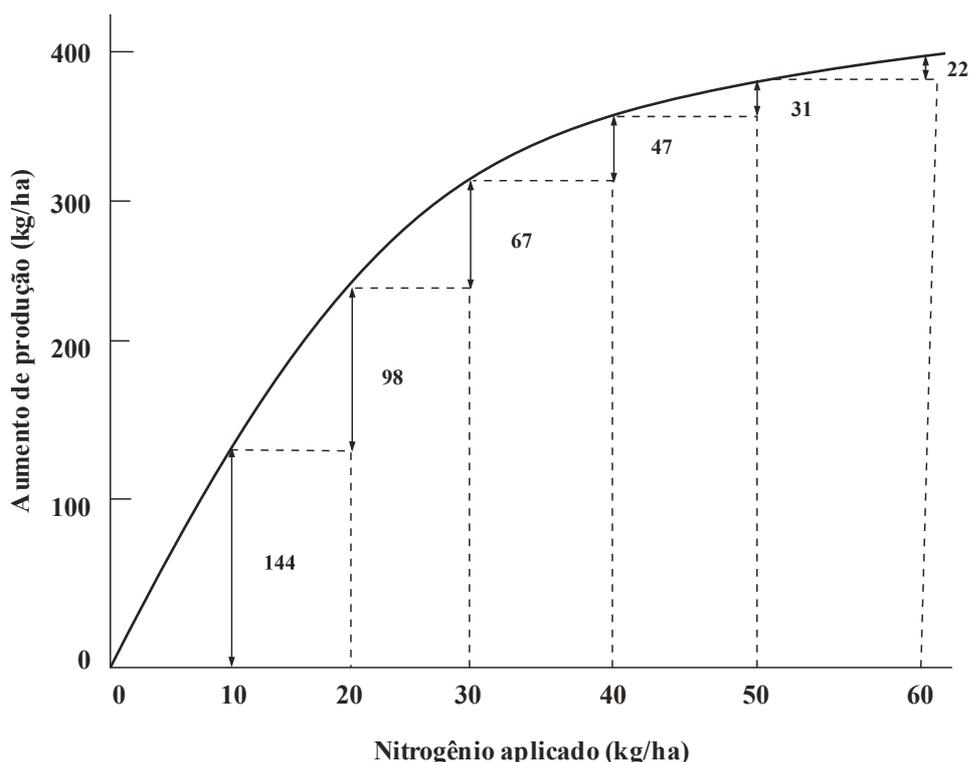


Figura 69 - Curva de resposta de algodão a nitrogênio, mostrando-se os incrementos decrescentes da produção para aumentos sucessivos de 10 kg/ha na dose do nutriente. Curva construída com resultados médios de 15 ensaios conduzidos em latossolo roxo. A produção média sem nitrogênio foi de 1.790 kg/ha de algodão em caroço. **Fonte:** Demattê, J.L.I. (2005).

Nem sempre a adubação dá os resultados esperados e tais causas devem ser devidamente avaliadas, numa possível averiguação em termos de fracasso. Várias causas podem ser apontadas, tais como: acidez do solo não corrigida adequadamente; alcalinidade; aplicação do fertilizante junto com as sementes de grãos devido ao efeito salino do adubo; profundidade do solo não atingindo pelo calcário; compactação e aplicação do fertilizante na entre linha do plantio; reação com o herbicida, inseticida, nematicida; encharcamento e assoreamento de sulco; mato competição; falta de elementos essenciais no solo; proporção inadequada dos fertilizantes; fonte inadequada de elementos; época de aplicação; pragas e moléstias; variedade pouco responsivas, assim como outras.

14.7. O USO DE ROCHA MOÍDA COMO FERTILIZANTE

Os solos são provenientes da intemperização dos minerais contidos nas rochas assim como os fertilizantes que após tratamentos, principalmente os ricos em fósforo, como o MAP, Super Fosfatos Simples, o potássio (KCl) e enxofre assim como os micronutrientes são

provenientes deste processo. Entretanto e na forma original os minerais de rochas estão nas diversas estruturas e são insolúveis e necessitam ser intemperizados para serem liberados e absorvidos pelos solos e culturas. Devido a tal fato há uma série de rochas que possuem parte dos componentes de nutrientes mais facilmente intemperizados e outros não, que resistem a ação das intempéries.

Sendo assim o uso de rocha de material intemperizado tem sido utilizado no passado como recuperadora de solos e foi através do uso de equipamentos que moíam as rochas e usados no campo como fertilizantes, vindo daí o termo genérico utilizado como “rochagem” ou o uso de “Rocha Moída” ou “Pó de Rocha” na substituição total ou parcial dos fertilizantes minerais. Entretanto nem toda rocha pode ser fonte de nutrientes.

Por outro lado, há uma série de rochas que devido a riqueza em fósforo como os fosfatos naturais reativos ou fosfatos naturais, aplicados na forma de pó nos solos, substituem parcialmente ou não os fertilizantes minerais solúveis. Baseado neste princípio de aplicação de rocha moída, as fábricas de mineralização e de calcário, que possuem equipamentos para moer as rochas, tem utilizado recursos na busca de rochas constituindo de minerais facilmente mineralizados e de ação para a agricultura.

Entretanto, o uso de “pó de rocha” sendo uma técnica antiga o seu uso na agricultura atual necessita ainda de estudos técnicos, econômicos e ambientais, para se tornar tecnologia efetiva, apesar dos experimentos e dados de respostas favoráveis. Não esquecer que os minerais que compõem uma rocha, e uma vez solubilizados, podem ser poluentes como zinco, cádmio, cobre, chumbo, níquel, cromo e outros.

O Brasil está na dependência extensa quanto ao uso de fertilizantes para se tornar um dos produtores de alimentos para o mundo. Segundo dados no trabalho (Cunha J.F. et al. 2010), 73% do nitrogênio, 54% do fósforo e 92% do potássio consumidos no Brasil em 2009 foram comprados de outros países.

Ressalta-se com isso a busca de fertilizantes para outras alternativas principalmente para pequenos agricultores, vindo daí a “rochagem” na substituição total ou parcial de fertilizantes minerais. Por outro lado, a “rochagem”, necessita ser avaliada por um período mais longo nas terras e culturas, inclusive em comparação com fertilizantes convencionais.

14.7.1. Tipos de Rocha, Processos que Afetam, Tipos de Rochagem

Normalmente as rochas, rochas ígneas e metamórficas contêm a maior parte dos nutrientes necessários para as plantas tais como o potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, de micronutrientes, além do silício sendo amplamente distribuídas no território nacional. São usadas rochas magmáticas alcalinas como os carbonatitos, rochas metassedimentares contendo cálcio-silicáticas e produtos ricos em potássio, como micaxistos, biotita xisto, biotitito entre outras (Resende A. V. 2006).

Quanto aos processos que influem na “rochagem”, é citado o tipo de rocha; a distância entre a fonte e o uso; o uso na forma de pó e as aplicações em área total; os sistemas de intemperismo físico, químico e biológico; a matéria orgânica misturada com o “pó de rocha” facilitando a decomposição dos minerais; influência do sistema radicular no intemperismo biológico; a estabilidade dos componentes mineralógicos de rochas nas frações areia e silte dos solos etc.

Tratamentos prévios para aumentar a solubilidade dos componentes dos minerais, tais como temperatura, pressão, porém são antieconômicos atualmente.

Quanto aos tipos de rochagem o princípio se baseia nos seguintes aspectos: produto finamente dividido que penetra no solo, aplicação em área total e o uso da acidez dos solos. Portanto pH dos solos tem influência marcante no sistema sendo que se usa o processo de acidez do solo, normalmente pH mais ácido para disponibilizar os produtos existentes na ‘rocha moída’. Porém tal produto seria incompatível num pH na faixa de 6,5 a 7,0 ou mais elevado.

Há uma série de produtos no mercado brasileiro viáveis para a agricultura sendo que uns utilizam produtos já existentes e que comprovadamente já conhecidos como os fosfatos reativos como Gafsa, Bayovar na mistura com rochas moídas; outros somente com rochas moídas; outros com rochas moídas na mistura com produtos químicos como super fosfatados simples, cloreto de potássio; outros na mistura com matéria orgânica de diferentes fontes etc.

Há nestes casos diversos produtos existentes no mercado, além das “rochas moídas” tais como os fertilizantes dolomíticos, calcíticos, dologesso e outros.

14.7.2. Respostas à Rochagem

Há diversos trabalhos ao longo das últimas décadas que indicam que a “rochagem” pode obter produtividades de culturas com o uso parcial de adubos solúveis ou somente rocha moída. Nesta linha os trabalhos de Theodoro e Leonardos (2010) concluíram que o uso da rochagem permitiu manter produções de milho, arroz, mandioca, cana-de-açúcar e hortifrutigranjeiros equiparáveis as adubações convencionais, fazendo com que a “rochagem” promoveu a construção da fertilidade do solo inclusive em solo arenoso.

De Pádua (2012), estudando a viabilidade agronômica da rochagem com rochas ricas em fósforo, contendo fosforito/zinnwaldita, fosforito/anfibolito, fosforito/micaxisto e fosforito/fonolito usando 1,0 t/ha e 5,0 t/ha da rocha moída em substituição parcial da adubação convencional no cultivo do girassol e soja. No primeiro cultivo com girassol na safrinha de 2010, houve uma superioridade do fertilizante convencional e nos tratamentos um ano após com soja, foram observados efeitos positivos das rochas fosforito, anfibolito, micaxisto e fonolito, superiores aos observados apenas com fontes convencionais de nutrientes (Tabela 92).

Tabela 89 - Produtividade do girassol safra 2010 e soja safra 2010/2011.

Tratamento	Produtividade girassol kg/ha safra 2010	Produtividade soja kg/ha safra 2010/11
kg/ha e t/ha	Girassol	Soja
MAP/KCl	1804 a	1556 b
Fosforito/KCl	868 c	1537 b
Fosforito/zinnwaldita	1288 b	1727 a
Fosforito/anfibolito	1665 a	1850 a
Fosforito/micaxisto	1567 a	1829 a
Fosforito/fonolito	1405 a	1969 a
Controle	1174 b	1813 a

Fonte: Padua, 2012. Modificado.

Como se observa a “rochagem” para os agricultores não deixa de ser uma modalidade de uma estratégia de manejo com baixo investimento em fertilizantes sendo possível substituir parcialmente as fontes solúveis de fertilizantes convencionais por rochas moídas aplicados em área total mantendo-se produtividades equiparáveis às obtidas com o uso exclusivo de fontes convencionais.

14.8. TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA OS FERTILIZANTES

Há neste aspecto uma infinidade de produtos viáveis, tanto na aplicação de solos como aérea principalmente de micros e maturadores, para o sistema de agricultura.

Os ácidos húmicos têm sido utilizados com muita frequência nas suas diversas formas, porém devem ser testados quanto sua ação no solo assim como na redução de fertilizantes minerais numa possível mistura ou na concentração de elementos minerais absorvidos. O uso de equipamentos de aplicação de compostos orgânicos com elevada eficiência é bem-visto.

- **Compostos mineral-orgânicos:** os compostos orgânicos e mineral-orgânicos para serem classificados devem ter teor de carbono >8%; CTC>80 em mmol/kg; NPK> 10 e umidade <25% (Brady e Weil 2013). Os diversos compostos mais utilizados na agricultura, como as camas de aves, de suínos, as coberturas de palhas que são utilizadas nos compostos orgânicos; os compostos de subprodutos das indústrias de açúcar como torta de filtro, compostos, cinzas, misturados ou não com matéria orgânica e associados com adubos minerais. O uso de vinhaça (rico em cloreto de potássio, subprodutos de usinas de açúcar) aplicado diretamente na linha da cultura da cana-de-açúcar ou na forma de irrigação.

- **Produtos sendo testados:** Há uma infinidade de produtos, aplicado nos solos, na superfície e incorporado a grandes profundidades, nas folhas em aplicação aérea, sendo testados. Tais produtos são bem-vindos no sistema agrícola.

Dentre as fontes de nutrientes as de fósforo tem sido uma das mais evidenciadas, porém, na maioria dos casos, constituem fosfatos de baixa reatividade e, portanto, de eficiência muitas vezes duvidosa.

Capeamentos como fósforo: visando aumentar a disponibilidade de P às plantas por produtos como resinas sem atividade iônica de superfície, como o produto Aval da família dos copolímeros dicarboxílicos. Modo de ação: dissolvido no solo tende a sequestrar os íons antagonísticos do P. NUTRISPHERE – N; Produto líquido formado por polímeros com alta densidade de carga, forma de proteção da ureia contra a volatilização.

O mundo todo está trabalhando nos métodos que reduzem as perdas de ureia, assim como o sequestro de íons de níquel (Ni), um dos componentes da uréase presentes na solução do solo. Outro método seria a Redução a da Nitrificação pelos sequestros de íons de Cu e Fe, elementos envolvidos no processo desenvolvido por bactérias do solo. Os recobrimentos como o KIMCOAT com o desenvolvimento de resinas capeadoras para os diversos ânions do solo de fósforo e nitrogênio. Recobrimento do fósforo com 12% de S na forma de MAP ou Fosfatos Reativos com gesso como fonte de enxofre. Inibidores de uréase NBPT (Tiofosfato de N-n-butiltriamida) porém necessitando de umidade para reagir. Em cana-de-açúcar os dados não são animadores, pois os efeitos correspondem a 10 a 15 dias de umidade, o que não satisfaz.

CAPÍTULO 15

15.1. CALAGEM

Nos solos brasileiro de pH dependente com elevado teor de alumínio em profundidade assim como a redução da capacidade de troca de cátions devido ao decréscimo da matéria orgânica, a acidez excessiva e o alumínio, seria um dos empecilhos para o aumento da produtividade. Em outras palavras, o solo será tanto mais ácido quanto menor a parte da CTC ocupada por cátions básicos.

Assim, a correção desta acidez é feita pela calagem, aumentando o pH, seria uma opção de manejo químico para redução dos fatores negativos nos solos. Sendo a calagem uma prática agrícola complexa é de se esperar que haja interações entre a calagem e demais fatores que afetam a produção das culturas anuais e perenes.

No Brasil tem havido polêmica sobre ao grau desejado da correção dos solos pela calagem, sendo no Rio Grande do Sul seria necessária para elevar a um pH de 6,0 para a maioria das culturas, enquanto nas outras regiões do Brasil a simples neutralização do Al^{3+} seria suficiente, usando menos corretivos. Por outro lado, (Raij, B von 2011) com as culturas de milho, soja e algodão, apontam que a calagem na região tropical sendo necessidade de ir além de uma simples neutralização de Al^{3+} .

De qualquer maneira os dados relacionados a ação do calcário em relação as culturas estão indicadas na Tabela 93, (Malavolta, 1985) onde se verifica os benefícios da calagem indicando que a medida que o pH sobe, a produtividade também cresce. Os valores máximos foram encontrados num pH na faixa de 6,8 a 7,5 enquanto valores mínimos de culturas foram encontrados num pH de 4,7. Fica esclarecido que tanto a aveia como o trigo são menos exigentes numa acidez elevada.

Tabela 90 - Produção relativa de algumas culturas em função do pH em água.

Cultura	pH em água				
	4,7	5	5,7	6,8	7,5
Milho	34	73	83	100	85
Trigo	68	76	89	100	99
Aveia	77	93	99	98	100
Centeio	0	23	80	96	100
Alfafa	2	9	42	100	100
Trevo doce	0	2	49	89	100
Trevo vermelho	12	21	53	98	100
Soja	65	79	80	100	93

Fonte: Malavolta, 1985.

15.2. PROCESSOS DE ACIDIFICAÇÃO DOS SOLOS

A acidificação dos solos, tanto na superfície como em profundidade, ocorre em todos os solos independente das condições climáticas devido aos fatores tais como: a absorção de nutrientes pela cultura, acidificação pelas chuvas, lixiviação de nutrientes, fertilizantes nitrogenados etc.

O cálcio e demais nutrientes assim como os ânions vieram do intemperismo e mais especificamente dos coloides de argila, de húmus ou adubos.

No caso da remoção pelo sistema radicular da planta de cátion ou de ânion da solução do solo, para o sustento da planta, e para manter o equilíbrio químico do solo, a planta emite dois prótons ($2H^+$) no caso de absorção de um íon de cálcio, acidificando o solo.

No caso de uma absorção de ânions pela planta, ela emite o correspondente de OH^- , mantendo assim o equilíbrio químico do solo. Como visto a tendência dos solos se acidificarem seria através da absorção pelas plantas.

Outro processo de acidificação dos solos seria através das águas de chuvas. Neste caso a percolação da água da chuva carrega os cátions não ácidos liberados com a água de drenagem. Como resultados, o complexo de troca (e, portanto, também a solução do solo) torna-se cada vez mais dominado por cátions ácidos (H^+ e Al^{3+}). Deste modo, com uma maior precipitação anual de chuvas ou de irrigação, a lixiviação dos cátions é mais intensa e, assim o solo torna-se fortemente ácido como na Amazônia, nos Cerrados etc.

Em regiões áridas com pouca ou nenhuma lixiviação, os íons H^+ produzidos causam pequena acidificação, mesmo a longo prazo, porque o Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ não são lixiviados,

mas permanecem no solo, onde podem novamente substituir os cátions ácidos e assim evitar uma queda no nível do pH.

Na percolação da água há formação dos íons HCO_3^- que se transloca nos solos com íons acompanhantes, coíons, acidificando os solos, num processo de lixiviação.

O processo de acidificação dos solos também pode ser devido aos fertilizantes e neste caso as formas de nitrogênio. A reação da molécula NH_4^+ com oxigênio gera nitratos (vindo da nitrificação do íon amônio do solo, da matéria orgânica ou adubos) e prótons.

A reação é acidificante.



Os dois prótons deslocam os cátions trocáveis ou da solução, acidificando o solo.

Por outro lado, a acidificação seria diretamente dependente de fatores como CTC dos solos (se maiores em solos argilosos ou menores em solos arenosos), ação do gesso, na redistribuição Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , culturas e variedades tolerantes a pH mais ácidos, condições climáticas como em regiões com déficit hídrico acentuado.

15.2.1. Acidificação dos Solos e o Calcário

Os solos são considerados como ácidos fracos consistidos de que apenas uma fração da acidez total se manifestar como acidez ativa, expressa pelo pH, sendo que a maior parte da acidez fica na forma de acidez potencial correspondendo ao hidrogênio não dissociável.

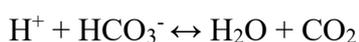
Como foi visto a acidificação consiste na remoção de cátions da CTC substituindo pelo alumínio e hidrogênio não dissociado. Numa primeira reação a neutralização da acidez do solo se processa pelo CO_2 dissolvido na água dando o próton e o ânion bicarbonato, sendo introduzidos na solução do solo de acordo com a reação a seguir:



O próton (H^+) desloca as bases retidas na CTC da fase sólida do solo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) e estes podendo ser perdidos, principalmente por lixiviação, ao se associar com o ânion bicarbonato (HCO_3^-). Tal reação ocorre em solos com pH mais elevados. Neste caso com valores de pH mais baixos, com maiores concentrações de próton, tornam a dissociação menos importante chegando a impedi-la a pH abaixo de 5,2. Portanto, em solos muito ácidos não é provável uma grande acidificação através do ânion bicarbonato.

A segunda causa da acidificação dos solos, como foi visto, é ocasionado por matérias acidificantes adicionados aos solos como os fertilizantes, águas de chuvas, extração de nutrientes pela lavoura etc.

O material corretivo mais utilizado na neutralização da acidez é o calcário (sal básico) constituído de carbonatos de Ca^{2+} e Mg^{2+} . O carbonato de cálcio (calcário) se dissocia na presença do CO_2 (dissolvido na água) dando o Ca^{2+} , o ânion bicarbonato e hidroxila, sendo suficiente para desencadear numa reação de neutralização da acidez do solo, de acordo com as reações a seguir:



A hidroxila (OH^-) reage com o próton da solução do solo resultando em água assim como o próton reage com o bicarbonato originando gás carbônico (CO_2). Enquanto existiam íons de H^+ na solução do solo a reação tende para a direita. Neste caso o pH da solução está em equilíbrio com a acidez total, permitindo assim que a acidez do solo seja gradativamente neutralizada, inclusive o íon alumínio que é precipitado como $Al(OH)_3$.

Como se verifica na neutralização da acidez significa a participação de receptores de prótons, no caso do OH^- e HCO_3^- . De maneira geral pode-se representar a reação de um solo ácido com o calcário:



Por outro lado, se vários solos, inclusive os arenosos, forem adicionadas quantidades crescentes de calcário e for medido o pH após determinado tempo seria obtido curvas de neutralização, salientando-se que solos diferem das necessidades de calcário, para proporcionar uma mesma mudança de pH. Em conseqüências solos diferem em relação ao poder tampão o que seria dependendo da CTC (teor de matéria orgânica e teor de argila).

Em solos arenosos observou-se que a reação com calcário com o solo pode se dar a maiores profundidades devido a macro porosidade das terras arenosas e que o uso de componentes químicos como o gesso (na introdução de cálcio), e demais produtos químicos ou biológicos (com o as coberturas de plantas) que aumentam o sistema radicular, devem ser usados.

Nos sistemas de plantio direto (PD) em grãos a acidificação deve ser corrigida com os corretivos aplicados na superfície do solo sobre a palhada, sistema este sendo um aspecto que até hoje não foi resolvido a não ser se houver paralização do PD mudando para o convencional.

15.3. AÇÃO DOS RESÍDUOS VEGETAIS NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO

Tem-se observado em trabalhos (Pavan M.A, 1994) que devido ao caráter anfótero da matéria orgânica tem sido observado que o aumento do pH do solo pode se dar pela aplicação de material orgânico. A capacidade de neutralização da acidez do solo por resíduos vegetais está associada aos teores de cátions e carbono orgânico solúvel da MO. No caso de resíduos orgânicos de culturas como a soja ou milho, a menor capacidade de neutralização da acidez do solo está relacionada a redução dos teores de cátions e carbono solúvel.

Nestes aspectos foram realizados vários experimentos no IAPAR, em Londrina, PR em 1999, verificando que as culturas de cobertura apresentam também ação de alteração do pH do solo. Foi utilizado extratos vegetais que mostraram a sua percolação por colunas de solo neutralizando a acidez até a camada subsuperficial. No caso da aveia preta e do nabo forrageiro o pH na camada superficial passou de 4,1 no controle para 5,2 e 5,3 respectivamente. Na faixa dos 20 cm o pH esteve na faixa dos 4,3 contra 4,2 na testemunha.

Os resíduos de aveia preta, nabo forrageiro, mucuna cinza e leucena foram os que proporcionaram os maiores aumentos nos teores de Ca e Mg na camada subsuperficial de solos ácidos, e com sensível redução do Al.

As principais reações de ligantes orgânicos, solúveis em resíduos vegetais, responsáveis pela neutralização da acidez na superfície do solo (ou subsolo) envolvem a participação de radicais carboxílicos e são os seguintes:



Em ambiente alcalino (pH superior a 7,0) as reações se processam pelos radicais amídicos e fenólicos da matéria orgânica. Como se nota a natureza anfótera de resíduos vegetais faz com que aumente o pH dos solos ácidos e reduza o pH dos alcalinos.

O uso do calcário permite a elevação do pH normalmente nas camadas superficiais devido a baixa mobilidade do Ca e Mg na forma de $CaCO_3$ ou $MgCO_3$ uma vez que o HCO_3 é instável na reação com calcário, se transformando em H_2O e CO_2 .

Em relação aos teores de matéria orgânica e a ação dos sistemas radiculares principalmente braquiárias têm sido utilizado produtos químicos e biológicos assim como ativadores de sistemas radiculares tais como Microgeo, Nature e outros podem auxiliar no sistema de manejo.

15.4. MICROBIOMA DO SOLO

Atualmente tem sido desenvolvido produtos biológicos, associados ou não aos químicos, com o objetivo de dar maior atividade aos solos restabelecendo o microbioma. Tais produtos têm diversas ações nos solos assim como tem uma relação aos nutrientes liberados dos produtos assim como do solo. Uns dos produtos são ricos em fungos e bactérias, como ação fungicida e nematicida biológico, tendo uma série de alvos tais como *Trichoderma*, *Bacillus subtilis* e outros. O esterco bovino ou conteúdo ruminal seria outro produto, ricos em microrganismos e nutrientes que serão utilizados pelas culturas. A eficiência nutricional e produtividade são diversos, sendo os meios de aplicação em área total ou no sulco de plantio dependendo do tipo de cultura.

Em relação ao desenvolvimento radicular há uma série de produtos no mercado (químicos e biológicos) que permite tal aumento em profundidade dos solos e neste caso como

um dos objetivos, além da absorção de nutrientes e água em profundidade, mas também para reduzir a densidade do solo.

Neste aspecto observe a Figura 70 em solo arenoso álico, no Oeste de São Paulo em cana-de-açúcar (itens A, B, C) com o desenvolvimento radicular abundante, numa profundidade de 0-100 cm, e argiloso (item D) em Usina Bevap irrigado em Minas Gerais com o produto Longevus (Borges, 2018).

Tem sido observado em diversas culturas de cobertura, principalmente braquiárias e milho que apresentam um sistema radicular vigoroso em profundidade, inclusive em solo álico, independente dos produtos adicionais como visto anteriormente e que podem auxiliar na recuperação de fertilidade e na descompactação do solo.

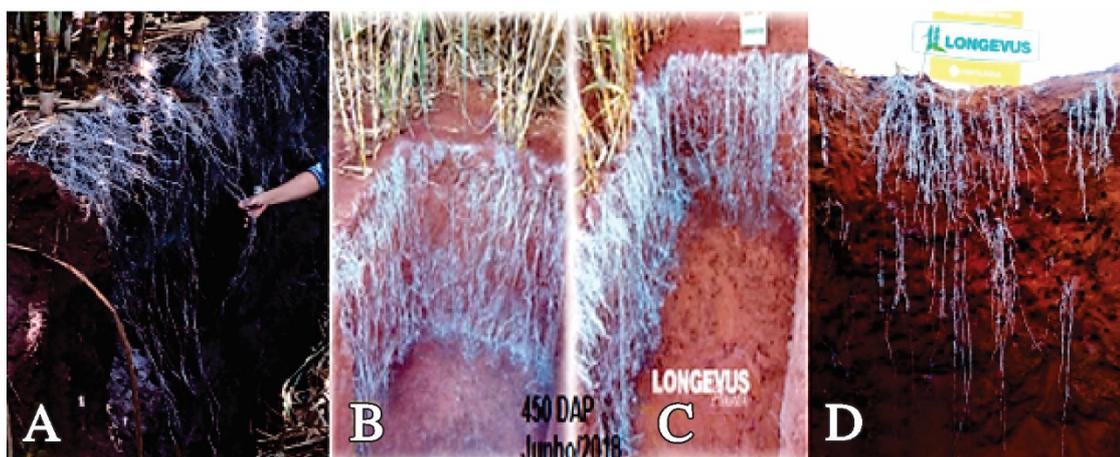


Figura 70 - Uso de químicos no desenvolvimento radicular: A, B, C solos arenosos. D solo argiloso. **Fonte:** A, B, C solos arenosos e D solos argilosos. Todos com Longevus (Borges, 2018)

15.5. MÉTODOS DE RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVO

Há diversos métodos de recomendação da quantidade de calcário a ser utilizado nos solos. Uns preconizam eliminar apenas o Al; outros são baseados nos teores de Ca e Mg como no caso da Copersucar (SP); sendo que outros preconizam um método de determinação do pH_{SMP} , outros leva em consideração os teores saturação de bases iniciais e finais (índice V) assim como a CTC a pH 7,0 e o PRNT do corretivo. Tais métodos são indicados para a profundidade de 0-20 cm de solo.

Tem sido observado em relação aos cálculos teóricos sobre a quantidade de calcário para um determinado valor de saturação de bases, uma vez aplicado aos solos nem sempre os teores acompanham os cálculos, eles são menores, devido a uma série de fatores como o vento; sistemas de aplicação utilizando carretas, caminhões ou manual; sistemas de incorporação, com grade ou arado ou aplicação no sulco de plantio, ou na superfície com plantio direto; variação do PRNT; tipo de solos; poder tampão dos solos entre outros. Devido a tais fatos os usuários tem-se utilizado um acréscimo de 10% ou 15% do corretivo.

O método utilizado da saturação de bases seria o seguinte:

$$NC = (V_f - V_s) \times CTC \times PRNT/100$$

Onde:

(NC) seria a Necessidade de Calcário em t/ha, a 0-20 cm;

(V_f) saturação de bases final desejada;

(V_s) saturação de bases do solo;

CTC a pH 7,0 (cmol/dm³);

O valor de 100 é a transformação para t/ha.

Exemplo: determine a quantidade de corretivo (NC) em t/ha, com saturação de bases do solo (V_s) de 32%, obtido através de análises de solos, e saturação de bases final, (V_f) desejada, de 65%, com corretivo de 80 de PRNT (100/80) e CTC de 3,5 cmol/dm³, a quantidade de calcário será de:

$$NC = (65-32) \times 3,5 \times 1,25/100 = 1,44 \text{ t/ha.}$$

Para 0-40 cm, considerando as mesmas quantidades, a quantidade seria de 2,88 t/ha e a 0-10 cm, de 0,72 t/ha.

Em relação ao uso de calcário as culturas são diferentes em termos de V%, como na soja do Brasil Central (Raij, B. van, 2011) verificaram que o valor de 50% como Vf de saturação de bases nos solos trabalhados seria suficiente para esta cultura. Observaram também que em relação as gramíneas pouco exigentes, como as Braquiárias, a saturação de bases na camada superficial seria de 30 a 35% enquanto o Capim Elefante ou Napier, mais exigentes em fertilidade, as correções seriam na faixa de 50 a 60%. Há casos da necessidade de V% para 80%.

Em conclusão: o calcário é um dos corretivos que age numa série de fatores de solos, melhorando-os, e no caso de culturas elas necessitam quantidade diferenciadas de corretivos.

15.6. QUEDA DE NUTRIENTES EM RELAÇÃO AO TEMPO – CULTURAS ANUAIS E PERENES

Nos solos os teores trocáveis na CTC tais como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ são tempo dependentes, devido à exportação pelas culturas e demais fatores como acidificação dos solos, sendo que há necessidade de ser aplicado o corretivo para que os solos não acidifiquem novamente. Nesta queda, a maior velocidade seria nos solos arenosos, baixa CTC, e menor velocidade de queda para solos de elevada CTC, independentemente do teor de corretivo aplicado.

Em experimento de longa duração com arroz e soja, realizado no Brasil Central (Tabela 94) observou-se o seguinte: após 6 meses a quantidade de calcário calculada para elevar o pH na faixa desejada de 60% da saturação foi de 3,0 t/há, porém tal valor não foi suficiente para atingir o valor preconizado, mas sim uma quantidade de 4,0 t/ha acima da dose recomendada. Neste caso houve maior acréscimo da saturação de bases (V%), próximo a faixa desejada. Após 66 meses da instalação, o pH na dose de 4,0 t/ha caiu para os níveis iniciais de pH 4,7. Os teores de Ca + Mg, antes de 0,6 cmol/dm³ aumentaram para 3,1 e após os 66 meses decresceram para 2,1 cmol/dm³. Os rendimentos relativos de grão obtiveram os valores máximos quando se utilizou teores mais elevados de calcário. O teor de alumínio aumentou com as doses zero da testemunha e decresceram após os 66 meses após a aplicação do corretivo.

Tabela 91 - Efeito residual da aplicação de calcário em Latossolo argiloso (Brasil Central) nos atributos químicos do solo e no rendimento relativo de grãos aos 6 e 66 meses após a aplicação feita em 1972.

Calcário	pH		Al		Ca + Mg		Rendimento relativo em grãos	
	6	66	6	66	6	66	6	66
t/ha	H ₂ O						%	
0	4,7	3,9	1,1	1,5	6,0	0,3	53	50
2	5,1	4,3	0,5	1,0	1,5	1,0	88	88
4	5,6	4,8	0,2	0,4	3,1	2,1	100	89
8	6,3	5,2	0,0	0,0	4,4	4,0	93	100

Em solo de textura média-arenosa (Morelli J. et al., 1987), na cultura de cana-de-açúcar, foi feito ao longo de cinco cortes um experimento com corretivos na reforma da área assim como as produtividades. Nesta Tabela 95 ilustra a queda da saturação de bases, consequentemente de Ca²⁺ e Mg²⁺ medido pelo índice V%, ao longo dos cinco cortes assim como as produtividades que foram caindo assim como a saturação de bases, ilustrando não somente a demanda de bases pela cultura, mas também as quedas nestes valores. Tal fato significa que tais solos necessitam ter adições de corretivos ao longo dos cortes aplicados em área total para não haver quedas, como no exemplo, após o segundo corte no exemplo da Tabela 95.

Tabela 92 - Queda da fertilidade expressa pela saturação de bases ao longo dos cortes de cana-de-açúcar em latossolo de textura médio-arenosa. Usina Barra Grande – SP.

Profundidade	Reforma	1° Corte	2° Corte	3° Corte	4° Corte	5° Corte
cm	V%					
0 – 20	25	52	40	32	21	18
20 – 50	6	38	29	19	16	6
Profundidade	t/ha					
t/ha	62	100	92	83	74	65

Fonte: Morelli et al. (1987)

15.7. PROFUNDIDADE DE INCORPORAÇÃO DO CALCÁRIO

Resultados experimentais têm demonstrado que o calcário é pouco móvel no solo que tende a reagir quando em contato com o solo devido a umidade e, portanto, a aplicação na superfície como tem sido feito no PD, sem incorporação, tenderá a reagir apenas na superfície 0-5 ou 0-10 cm.

Tais correções em profundidade são dependentes do tipo de cultura, se anuais ou perenes, assim como o reflexo no desenvolvimento radicular que tende a se desenvolver cada vez mais em profundidade à medida que os solos são recuperados.

Os resultados da Tabela 96 sobre a incorporação do corretivo nas doses de 0-1-2-4-8 em t/ha numa incorporação rasa (0-15 cm) e profunda (0-30 cm), na produção de grãos de milho (três culturas sucessivo), soja e sorgo, indicam a melhor ação da incorporação profunda ao longo do tempo. Tal fato indica que em períodos secos (verânicos) a profundidade de 0-30 cm foi mais eficiente.

Tabela 93 - Produção de grão de milho (ver. Cargill 111) em função de doses e do efeito residual do calcário incorporado em 1972 (primeiro ano do experimento), em duas profundidades, num solo LE. CPAC, 1980-1981.

Profundidade de aplicação do calcário ¹	Doses do calcário (t/ha)	Anos e culturas							
		1972	1973 ²	1973	1974	1975	1976	1977	1978
		Milho	Milho	Milho	Sorgo	Milho	Milho	Soja	Milho
(kg de grão/ha)									
S	0	2.115	4.569	880	661	2.364	1.108	1.055	341
S	1	3.423	5.281	1.474	1.944	4.275	1.935	1.966	1.087
S	2	3.531	5.689	1.863	5.133	4.322	1.994	-	1.686
S	4	4.004	6.903	2.265	5.902	4.622	2.350	1.889	2.331
S	8	3.723	5.903	2.052	6.853	5.412	2.590	2.113	2.596
P	1	4.019	5.684	2.086	3.325	4.431	1.521	1.304	845
P	2	4.341	5.858	2.573	5.578	4.596	1.935	2.054	1.647
P	4	4.797	6.682	3.058	6.084	4.812	2.372	2.248	2.101
P	8	4.792	7.266	3.601	7.089	5.968	2.835	2.254	2.504

¹S = Superficial (0 – 15 cm); P = Profundo (0 – 30 cm).

²Cultivo irrigado no período seco.

Em solos arenosos em PD devido a macro porosidade há translocação na forma de CaCO₃, em quantidade acima da recomendada, permitindo assim a incorporação do cálcio em maior profundidade, sem o uso do arado.

Em relação a este tema, Franchini *et al.* (2016) numa cultura de soja em solo arenoso no Paraná após a pastagens com braquiária, observaram que em relação ao efeito da incorporação no solo e a aplicação na superfície do corretivo sobre a produtividade, verificaram que, no primeiro ano após a calagem, a oleaginosa obteve maior produtividade na dose de aproximadamente 4,0 t/ha de corretivo, com incorporação. Todavia, nas safras subsequentes a produtividade da soja foi similar entre os sistemas (safra 2007) inclusive maior (safra 2008,

Embrapa Soja/ Coamo, Moreira Sales, 2006) com a aplicação do calcário em superfície (Figura 71).

A manutenção da qualidade estrutural do solo, construída previamente pelo crescimento radicular da pastagem de braquiária pela adição de material orgânico, constitui-se na principal explicação para o melhor desempenho da produtividade da soja após a primeira safra nos tratamentos sem incorporação de calcário. Esses resultados corroboram com os dados de pH do solo apresentados anteriormente e indicam a possibilidade de aplicação superficial do calcário em situações que o alumínio tóxico não é muito elevado.

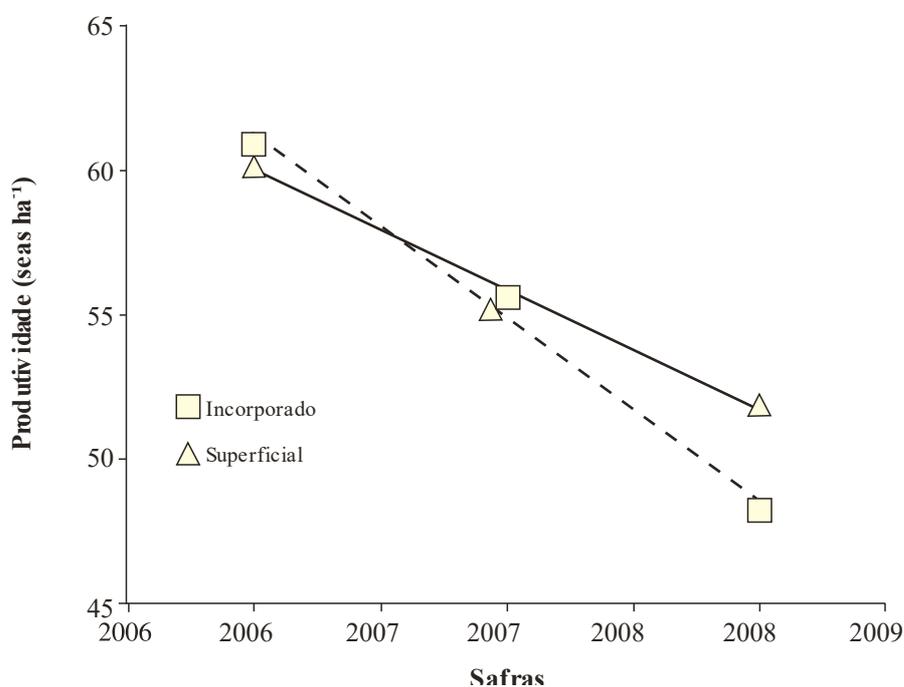


Figura 71 - Produtividade de soja em três safras após a calagem realizada em superfície ou incorporada a 20 cm de profundidade (média de 4 doses de calcário). **Fonte:** Franchini, J.C. et al.2016

15.8. TEMPO DE REAÇÃO DO CORRETIVO EM CULTURA ANUAIS E CANA-DE-AÇÚCAR

Neste aspecto o tempo de reação dos corretivos, independente se calcário ou calcinados depende de uma série de fatores entre os quais valor do PRNT, da granulometria, métodos de aplicação, ventos etc. (Souza D.M.G, etal 2007). Nos sistemas de corretivos designados “tradicionais” e “calcinados” (Quaggio, 2000) trabalhando em grãos com doses de 0-2-4-6-8-t/ha na camada superficial do solo 0-20 cm, e com o tempo de reação do solo de um mês após

a colocação dos corretivos, 6 meses e 20 meses. Verificou-se que o calcinado obteve ligeiramente maiores quantidades de Ca+Mg do que o tradicional assim como os dados de 2,0 t/ha do corretivo (tradicional e calcinado), os teores de bases decresceram em ambos indicando que seria interessante valores mais elevados dos corretivos, independente da fonte.

Num experimento em relação aos efeitos após da aplicação do corretivo em cana-de-açúcar, na Usina da Barra, SP, em solo arenoso com teores de corretivos de 3,0 t/ha com PRNT de 80% determinado para atingir a saturação de bases de 60%. O corretivo foi aplicado em área total e após incorporação notou-se que a produtividade em t/ha foi de 102 aos 30 dias após a aplicação do corretivo, para 110 t/ha aos 90 dias e decrescendo a produtividade para 102 t/ha após 120 dias de aplicação.

Em termos de pH (CaCl_2) há um crescente na camada 0-25 cm, atingindo valores de 5,3 após 120 dias de aplicação do corretivo, inclusive na saturação de bases. Entretanto, se verifica o aumento ténue nas camadas subsuperficiais de bases e índice V%, porém não aumentou na camada 50-100 cm. Com tais resultados se verifica que em solos arenosos os efeitos do corretivo estariam somente na cada superficial de 0-25 cm

15.9. SUPER CALAGEM

Os perigos de uma elevação acentuada do pH, acima de 7,0 a 8,0, pode acarretar sensíveis prejuízos com sais e principalmente nos micros nutrientes positivos, e neste caso seria necessário se utilizar de aplicação aérea desses micros. Nos demais nutrientes como os macronutrientes e os micro negativos a questão da super calagem não teria significativos efeitos inclusive com alumínio, ferro e manganês onde são removidos (precipitados) a pH elevados. Foi observado que as doses normais de corretivos não atingem os valores desejados de saturação de bases e neste caso numa super calagem com aumento de 20 a 30% ou mais das doses recomendadas, tem efeitos benéficos ao longo do tempo.

15.10. CORREÇÕES EM PROFUNDIDADE PELO GESSO

Foi visto que em profundidade que o calcário dificilmente pode reagir, se dissociando, se aplicado na superfície ou incorporado. Entretanto, há necessidade de incorporação em

profundidade do Ca^{2+} necessário para o desenvolvimento das raízes, assim como de outros nutrientes para recuperação dos solos.

Neste aspecto produtos que introduz nutrientes seriam adequados como o “fósforo, gesso”, que foi descoberto na década de 1980 pela Embrapa no Brasil Central que a partir daqui será considerado simplesmente como “gesso”.

A origem do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, com 96,50%) seria na produção de ácido fosfórico numa proporção de 1,0 t de ácido fosfórico para 4 a 5 t de gesso, numa reação com a rocha fosfática com ácido sulfúrico e água dando o ácido fosfórico, o gesso e o ácido fluorídrico. Nesta reação com 17% de umidade, há 0,75% de P_2O_5 , fluoreto (F) de 0,63%.

Na composição do gesso em 1,0 tonelada há 200 kg de Ca^{2+} e 150 kg de enxofre (S). O gesso é 150 vezes mais solúvel do que o calcário.

Alguns pontos devem ser considerados em relação ao gesso, a saber: ele não corrige o pH do solo. Nos dados de experimentos há pequeno efeito positivo neste atributo do solo, pequena redução do pH. Relação com a saturação de bases: há um enriquecimento de cálcio no solo devido ao gesso no sistema de troca dos solos (CTC) e em consequência aumento do V%, porém é um aumento artificial, de diluição. O SO_4^- sendo um ânion específico pode reagir com o Al na subsuperfície, bloqueando-o. Entretanto, em solos com elevado teor de Al, acima de $6,0 \text{ cmol/dm}^3$, a ação do gesso como neutralizador do Al, é efêmero.

15.11. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO GESSO EM RELAÇÃO AOS SOLOS

O aumento da carga líquida na subsuperfície em solos muito intemperizados e de baixa fertilidade, as camadas de subsuperfície apresentam predomínio de cargas positivas (CTA) devido ao PCZ. Em termos de manejo o objetivo é de reduzir a CTA e aumentar a CTC em profundidade assim como introduzir Ca, Mg, K e outros nutrientes.

Havendo redução das cargas positivas na superfície do solo pela ação da calagem, o SO_4^- aplicado no solo, via gesso, tende a se translocar em profundidade, transportando bases. Na subsuperfície o SO_4^{2+} tem afinidade com a superfície positiva do coloide onde irá ser adsorvido e liberando Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ enriquecendo a subsuperfície do solo.

O aumento da carga líquida negativa em profundidade, até 120 cm em solo argiloso, com o uso de 6,0 t/ha de gesso foi demonstrado por Souza D. M. G., e Ritchey K.D (1986). Note que na faixa de 15-30 cm a carga líquida passou de 1,11 para 1,15 m.eq/100 g com as doses de gesso de 0 e 6 t/ha. Na profundidade de 30-45 a carga líquida passou de 1,04 para 1,13 e na profundidade de 105-120 passou de 0,31 para 0,42 m.eq/100g. Com tais dados de 0 a 6,0 tha de gesso pode-se aumentar as cargas líquidas negativas em valores substanciais em se considerando solos intemperizados (Tabela 97).

Tabela 97 - Aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) em profundidade com o uso do gesso em solo argiloso do Brasil Central.

Profundidade solo	Carga líquida negativa	
	Dose de gesso – t/ha	
	0	6
cm	m.eq/100g	
0 – 15	2,87	1,42
15 – 30	1,11	1,15
30 – 45	1,04	1,13
45 – 60	0,74	1,13
60 – 75	0,83	0,91
75 – 90	0,58	0,65
90 – 105	0,40	0,41
105 – 120	0,31	0,42

Fonte: Souza e Ritchey (1986).

15.12. GESSO E O TEOR DE MAGNÉSIO

Neste caso o gesso não apresenta Mg^{2+} em sua constituição, porém em solo argiloso ele está redistribuindo este nutriente devido ao fato da ocorrência deste cátion no solo inclusive em profundidade. Observe que à medida que há aumento da tonelagem de gesso, 0-2-4-6 t/ha na Tabela 98 tem havido uma redistribuição de Mg^{2+} no solo.

Entretanto em solo arenoso tal fato não deixa de ser preocupante pois o gesso pode arrastar o Mg^{2+} como tem sido verificado nos experimentos. Neste caso ficar atento através das análises de solos sobre o uso isolado deste insumo. Seria interessante, quando se utiliza o gesso em solos arenosos, o uso de calcário seria aconselhável, contendo Mg^{2+} .

Tabela 98 - Distribuição percentual do teor de magnésio em profundidade do solo com o uso do gesso, em LE argiloso no Brasil Central.

Profundidade do solo	Doses de gesso (t/ha)			
	0	2	4	6
0 – 15	75	54	39	33
15 – 30	4	16	14	10
30 – 45	2	9	16	15
45 – 60	3	3	9	13
60 – 75	4	4	6	7
75 – 90	4	5	5	8
90 – 105	4	4	6	6
105 – 120	4	4	5	6

Fonte: Souza e Ritchey (1986).

15.13. GESSO E PRODUTIVIDADE E O SISTEMA RADICULAR DO MILHO

Na Tabela 99 em experimento na região de Barreira - BA, com milho safras 80/81 até safra 83/84, em Latossolo de textura média-arenosa, o uso isolado de 6,0 t/ha de calcário permitiu sensíveis acréscimos de produtividade de milho, nos 4 anos agrícolas. Porém, quando o gesso foi associado ao calcário a produtividade aumentou ainda mais na faixa de 40 a 60% em todas as safras.

Tabela 94 - Produção de grãos de milho (Centralmex) em resposta a aplicação de calcário e gesso em um LV com 18% de argila em Barreiras – BA.

Dose de calcário	Dose de gesso	Ano agrícola			
		80-81 ⁽¹⁾	81-82	82-83	83-84
t/ha					
0	0	1,4 c	0,2 c	0,3 b	1,3 b
6	0	3,1 b	1,0 b	1,7 ab	4,9 a
6	4	5,0 a	2,5 a	2,0 a	6,2 a

⁽¹⁾Estes dados referem-se à produção de matéria seca, pois após 33 dias de veranico a produção de grãos foi frustrada.

⁽²⁾Este cultivo recebeu irrigação suplementar.

Fonte: Adaptado de SILVA & OLIVEIRA, s.n.t.

A distribuição do sistema radicular deste experimento onde se verifica que a testemunha, sem o gesso, produziu 92% de raízes na primeira camada e o elevado teor de alumínio em profundidade reduziu a percentagem para 6% na profundidade de 20-40 cm e praticamente 2% na profundidade de 40-60 cm e zero nas demais. Por outro lado, a dose de

gesso (4,0 t/ha) associado aos 6,0 t/ha de calcário fez com que o desenvolvimento radicular explorasse em maior profundidade com 60% na camada 0-20 cm, 18% na camada 20-40 cm, 12% na camada 40-60, 7% na camada 60-80 cm e 3% na última camada até 100 cm (Figura 72).

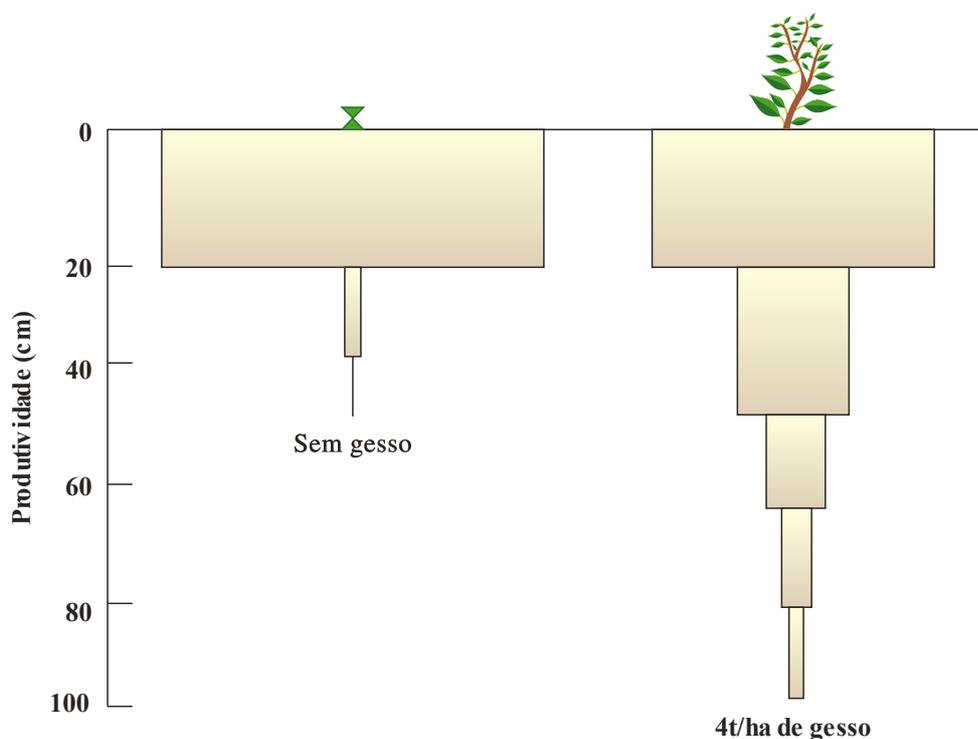


Figura 72 - Distribuição relativa (%) de raízes de milho de um perfil LV (18% de argila) de Barreiras, BA, em um tratamento com calcário (6 t/ha) + gesso agrícola (4 t/ha). **Fonte:** modificado Sousa D.M.G et al. (2007)

15.14. GESSO E O AUMENTO DO TEOR DE ÁGUA DISPONÍVEL DOS SOLOS

O aumento do teor de água disponível em profundidade até 120 cm com o uso de gesso (zero a 6,0 t/ha) pode ser observado na Tabela 100. Note que à medida que há aumento do teor de gesso há aumento da quantidade de umidade disponível deste solo. Verifique que na profundidade de 60-100 cm e com zero de gesso a quantidade de umidade foi zero, porém com 2,0 t/ha de gesso passou para 36% e com 68% na quantidade de 6,0 t/ha de gesso. Tal fato indica que em regiões mais secas ou com veranicos, em solos arenosos e argilosos, o uso do gesso deve ser incrementado.

Tabela 100 - Utilização relativa da lâmina de água disponível no perfil de um LE argiloso pela cultura do milho (cultivo da estação seca de 1983) após um déficit hídrico de 25 dias por ocasião do lançamento de espigas para diferentes doses de gesso.

Profundidade de amostragem	Lâminas d'água disponível	Doses de gesso (t/ha)			
		0	2	4	6
cm	mm	%			
0 – 10	11,2	100	100	100	100
10 – 20	11,2	93	96	93	93
20 – 30	11,2	92	92	92	81
30 – 40	8,9	94	82	82	82
40 – 60	17,8	47	72	78	65
60 – 100	15,6	0	36	58	68
100 – 120	17,8	0	0	55	55

Fonte: Souza e Ritchey (1986).

15.15. GESSO E AUMENTO DA PRODUTIVIDADE EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Na Usina São José em Macatuba, SP (Lorenzetti, J. M. et al., 1992), foi feito um experimento em soqueira de cana-de-açúcar com aplicações de calcário, gesso e fósforo no segundo corte que estava com produtividade baixa e com V% na faixa de 29%. O corretivo assim como o gesso e fósforo foram aplicados na superfície do solo Tabela 101.

A produtividade, sem o P_2O_5 , porém com 2,0 t/ha de calcário, foi de 21 t/ha de acréscimo nos cortes de terceiro ao quinto e com o gesso, sem o fósforo foi de 19 t/ha, ilustrando com isso que as aplicações ao longo dos cortes têm dado resultados. As produtividades de cana-de-açúcar em soqueira no caso do gesso, com e sem fósforo, tem sido semelhante. A explicação para este caso o gesso contém 0,6 a 0,8% de fósforo no processo de fabricação do superfosfato simples.

Tabela 951 - Aplicação de calcário, gesso e fósforo em soqueira em solo arenoso.

Tratamentos			Soqueira			Acréscimo
Calcário	Gesso	P ₂ O ₅	3°	4°	5°	
t/ha		kg/ha		t/ha		
0	0	0	52	76	54	0
2	0	0	56	85	62	21
2	0	40	60	93	66	37
0	0	40	56	77	55	6
0	3	0	60	90	56	19
0	3	40	60	85	60	18

Instalação/; nov/91 (2° corte), 7/92 (3° corte), 10/93 (4° corte), 10/94 (5° corte).
V% estava na faixa de 29% quando foram aplicados calcário, gesso e fósforo.

Fonte: Usina São José, Macatuba – SP.

15.16. GESSO E DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS E AUMENTO DA MATÉRIA SECA DA LEUCENA

Com o uso de gesso 0 até 6,0 t/ha Souza e Ritchey (1986) verificaram, além do aumento da produtividade em termos de matéria seca da Leucema (cv. Cunningham) uma distribuição de nutrientes à medida que o gesso em t/ha foi aumentado. Nas doses crescentes de gesso os teores de nutrientes foram também crescentes principalmente no nitrogênio, cálcio, enxofre e fósforo Tabela 102.

Tabela 962 - Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pela leucena (cv. Cunningham) para diferentes doses de gesso, em um LE argiloso, no ano de 1989.

Dose de gesso	Produção de matéria seca	Nutrientes absorvidos					
		N	P	K	Ca	Mg	S
t/ha		kg/ha					
0	3,1	91	5	31	38	17	5
2	4,8	148	9	51	62	24	8
4	4,5	139	7	47	54	23	8
6	6,8	228	11	71	110	36	15

Fonte: SOUSA E RITCHEY, 1986.

15.17. INTRODUÇÃO DE CÁLCIO PELO CALCÁRIO, GESSO E CLORETO

Para ilustrar a introdução do Ca²⁺ no solo foi desenvolvido na região do Cerrado, em LE argiloso, um experimento usando o calcário (CaCO₃), gesso (CaSO₄.2H₂O) e o cloreto de cálcio (CaCl₂). Após o equivalente a uma precipitação de 1.200 mm de chuva determinou-se o teor de cálcio até 210 cm de profundidade do solo.

A incorporação do Ca^{2+} pelo calcário comparado com a testemunha (doses de 0-2-4 t/ha) foi crescente em termos da quantidade de corretivos, com incorporação do nutriente em meq/100 g na profundidade de 0-30 cm.

O SO_4^{2-} do gesso, ânion específico, tem uma afinidade grande com cargas positivas na subsuperfície do solo sendo adsorvido e incorporando Ca^{2+} em maior profundidade do que o calcário, até 70 cm.

No caso de ânions monovalentes que apresentam pouca ou nenhuma afinidade com a superfície positiva dos coloides e devido a isto não reagem, onde se destacam o Cl^- e o NO_3^- . Sendo ânions não específicos podem se translocar nos solos em profundidade arrastando consigo cátions acompanhantes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , enriquecendo a subsuperfície do solo ou lixiviando fora da ação das raízes, empobrecendo os solos (Figura 73).

Note que o calcário introduziu o Ca^{2+} em menor profundidade (30 cm) o gesso em 70 cm enquanto o Cl^- levou o Ca^{2+} na maior profundidade, não deixando de ser um ânion perigoso em termos de empobrecer o solo (Raij B von. 2008).

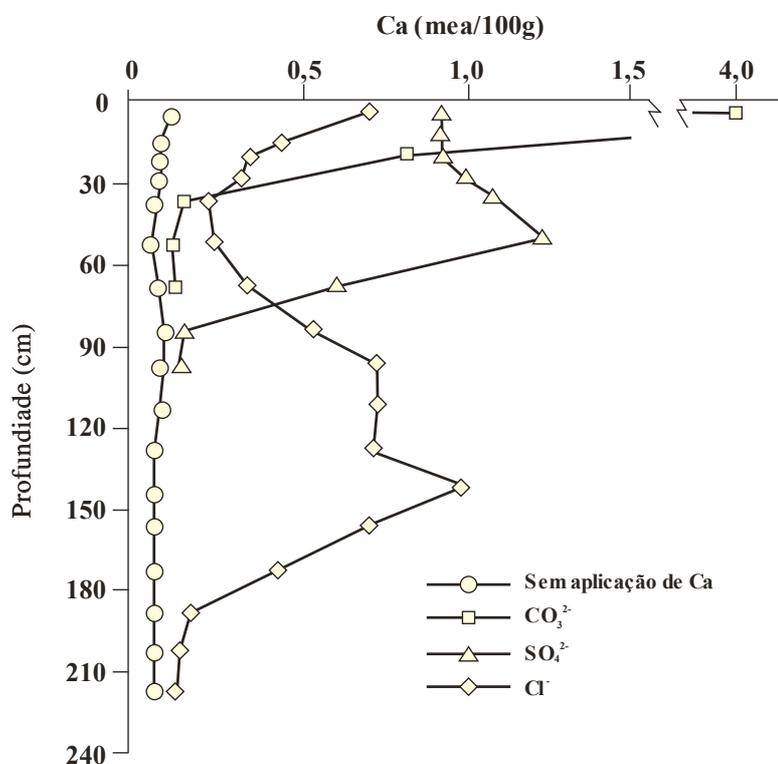


Figura 73 - Efeito da natureza do ânion na distribuição de Ca em um perfil reconstruído de um Latossolo Vermelho-Escuro, em experimento de colunas, após percolação do equivalente a 1.200 mm de chuva através da camada superficial (0-15 cm) que recebeu a cálcio como carbonato, sulfato ou cloreto. **Fonte:** Sousa e Ritchey 1986.

15.18. PROCEDIMENTO DO USO DO CALCÁRIO E DO GESSO

Como já foi visto, o melhor efeito do gesso, como transportador de cátions em profundidade, se dará com a aplicação antecipada do calcário na superfície do solo para eliminação ou atenuação das cargas positivas, porém tal fato normalmente não é possível numa atividade em grandes áreas. Teoricamente há necessidade de se aplicar o calcário antes do gesso. A explicação é a seguinte: o calcário reduz as cargas positivas da camada superficial e, portanto, deixando o SO_4^{2+} teoricamente livre para descer no solo com íons acompanhantes e fertilizar a subsuperfície.

Entretanto, há necessidade de se aplicar conjuntamente, calcário e o gesso e, portanto, irá ter uma eficiência menor do gesso, pois haverá uma maior fixação do ânion específico do gesso na camada superficial e sabendo disso a eficiência do gesso será decrescente.

As sugestões são as seguintes: armazenar no campo montes de calcário ao lado dos montes de gesso e iniciar com a aplicação do calcário. Se durante a aplicação do calcário começar a ventar, parar tal aplicação e iniciar a aplicação do gesso que é mais pesado e permite a operação com vento; após aplicar o gesso sobre o calcário. No caso de uma soqueira não há necessidade de incorporar, porém numa reforma pode-se incorporar e num plantio direto, não incorporar.

Tal procedimento tem sido utilizado nos exemplos das recuperações químicas dos solos aqui apresentadas, cujos resultados foram satisfatórios, o que permitiu manter um razoável nível de eficiência operacional, apesar de tecnicamente não ser a mais indicada (Lorenzetti, J.M. et al 1992).

15.18.1. Mistura do Calcário Com o Gesso

Tanto o calcário como o gesso não regem entre si e devido a isto tem havido a mistura destes insumos na empresa de calcário que apresentam equipamentos específicos para a mistura. No caso de carregadeira e no campo a mistura tem sido inadequada, pouco eficiente, pois o calcário apresenta densidade menor que a do gesso, além das duas moléculas de água, mas tem sido utilizado pelas empresas devido ao menor custo.

O gesso não substitui o calcário em termos de reação de carbonatação, portanto, calcário e gesso devem ser vistos como dois constituintes independentes. Se a análise de solo indicar necessidade de 2,0 t/ha de calcário e 1,0 t/ha de gesso, a mistura deve ter na faixa de 3,0 t/ha.

15.18.2. Recomendações do Gesso

Após a descoberta do uso do gesso como incorporadora de cátions na camada subsuperficial de solos inférteis, uma série de trabalhos tem sido produzido para se determinar em culturas anuais e perenes a quantidade de gesso nos solos assim como o efeito residual e demais características. Entretanto, até agora, as recomendações de gesso são incompletas e empíricas, a não ser os testes biológico preconizado pela Embrapa (Sousa D.M.G et al 2005). Recomendações em função do teor de argila do solo, teor de percentagem de Al, teor de cálcio, saturação de bases e CTC, tem sido usado na profundidade de 20-40 cm ou maior, porém sem indicação o que poderá ocorrer em termos de nutrientes levados para fora de ação das raízes, como o magnésio.

Em cana-de-açúcar tem sido muito utilizado a relação (Lorenzetti, J.M. et al 1992) para segunda camada de solos:

$$NG = (V_f - V_s) \times CTC / 50$$

Onde:

(NG) necessidade de gesso em t/ha na segunda camada de solos;

(V_f) saturação de bases final de 50%;

(V_s) saturação de bases do solo;

(CTC) capacidade de troca de cátions a pH 7,0 em cmol/dm³;

O valor de 50, de transformação para t/ha.

Exemplo: determinar a quantidade de gesso (NG) em t/ha, sendo que a V_f é de 50%, V_s de 25% e a CTC de 3,0 cmol/dm³.

$$NG = (50-20) \times 3,0/50 = 1,8 \text{ t/há}$$

Nesta análise observe que a segunda camada dificilmente o nível de saturação de bases será maior do que 50%, se for superior a este valor não será necessário o uso do gesso.

Para segurança do usuário, principalmente em solos arenosos, o uso do gesso deve ser levado em consideração as análises de solos na segunda camada e observe os níveis de magnésio do solo num valor mínimo na faixa de 0,30 cmol/dm³. Tais recomendações é que irão indicar se há necessidade ou não do insumo assim como a sua complementação.

O efeito residual do gesso de 4 a 5 anos tem sido observado em solos de textura argilosa ou muito argilosa. No caso de solos mais arenosos o efeito residual é menor, 2 a 3 anos.

Há grande possibilidade de respostas ao uso do gesso em solos muito intemperizados com teores de Ca²⁺ menores do que 0,5 cmol/dm³ e saturação de Al maior que 20%. Atualmente tem sido utilizado análises de fertilidade em maiores profundidades como 40-60 para culturas anuais e 60-80 cm culturas perenes (Sousa *et al.* 2007).

Utilizando a fórmula da recomendação de gesso em relação ao teor de argila em t/ha, Raij B von (2008) para ao Estado de São Paulo, foi testado a quantidade de gesso em diversos experimentos desde solos arenosos aos mais argilosos. Tal autor verificou que a produtividade máxima das culturas testadas era mais elevada do que as quantidades recomendadas de gesso em função do teor de argila (Tabela 103), indicando com isso que a NG em função do teor de argila não é o mais recomendado, porém é o mais seguro.

Tabela 103 - Dose de gesso e produtividade máxima da cana em solos de São Paulo.

Solo	Argila	Ca	m	V	Gesso (t/ha)	
	g/kg	mmol/dm ³	%	%	Recom.	Prod. Máx.
II.5	160	1,2	59	15	1,0	6,0
11. 7-LVEa	160	1,2	76	15	1,0	2,0
11. 7-LVA9	230	0,5	87	3	1,4	5,0
11. 7-LR-2	760	9,1	40	19	4,6	6,0
11. 7-LVAII	140	6,3	18	33	0,8	6,0
11. 7-LAVA9	190	0,5	79	31	1,1	4,8
11. 7-LVE-3	590	1,9	81	5	3,5	10,0

Fonte: Raij, 2008.

Em relação a este tópico tal autor foi enfático salientando que “faltam informações sobre a influência de diversos atributos de solos para uma recomendação de gesso mais científica”

Entretanto, enquanto não surgir uma recomendação melhor, o uso do teor de argila da segunda camada de solos tem sido a mais indicada. A Tabela 104 utiliza a textura do solo para a indicação da quantidade de gesso em função das culturas anuais e perenes.

Tabela 104 - Gesso em função da textura do solo para culturas anuais e perenes.

Textura do solo %	Culturas anuais	Culturas perenes
	Necessidade de gesso em t/ha	
Arenosa (<15)	0,7	1,0
Média (16 a 35)	1,2	1,8
Argila (36 a 60)	2,2	3,3
Muito argilosa (>60)	3,2	4,8

Fonte: Souza et al., 2005.

15.18.3. Respostas de Culturas Anuais e Perenes ao Gesso

Além dos trabalhos relacionados a este tema nas apresentações aqui feitas em termos de produtividade das culturas, no trabalho de Souza, D.M.G. et al. (2005) observaram-se em culturas anuais sem gesso na produção em t/ha de 3,2 para o milho, 2,2 para o trigo e 2,1 para soja e com gesso as produções foram respectivamente de 5,5, 3,5 e 2,4 indicando que as produções foram maiores com gesso.

Em relação a cultura de café em cerrado, a produtividade na quarta e quintas safras, sem gesso a produtividade em kg/ha foi de 2,3 e 5,9 e com gesso a produção passou para 4,9 e 7,7 em kg/ha.

Tais autores verificaram em culturas anuais que a quantidade de macronutriente com aplicação do gesso absorvido pelo trigo foi maior do que sem o gesso (Tabela 105).

Tabela 105 - Nutrientes absorvidos (contidos na palha e grãos) pela cultura do trigo, submetida a veranicos na época de floração em função de gesso.

Insumos	Nutrientes					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Sem gesso	80	15	53	12	11	7
Com gesso	120	22	80	18	16	12

Fonte: Souza et al., 2005.

15.18.4. Testes Biológicos Para a Recomendação de Gesso

Como foi enfatizada, a única recomendação de gesso **não empírica** seria o teste biológico preconizado pela Embrapa (Souza D.M.G. et al., 2005). Tal teste consta de dois tratamentos sem e com o gesso, com os sistemas radiculares da cultura, sendo desenvolvido em quatro etapas se há necessidade de se utilizar o gesso.

As interpretações seriam através de um índice com gesso e sem gesso relacionado aos sistemas radiculares obtidos nos testes. Dividir o valor médio obtido do comprimento das raízes com gesso pelo valor médio das raízes sem gesso, se este valor for superior a 1,15 seria usado o gesso. Entretanto, os laboratórios de rotina não estão habilitados a usar o teste.

Em relação a quantidade de gesso a ser utilizado, segundo tais autores preconizam, entretanto, a textura dos solos, para culturas anuais a dosagem de gesso com 15% de enxofre, a dosagem do gesso (DG) em kg/ha, seria de 50 x argila (%) para culturas anuais e para as perenes (DG) em kg/ha seria de 75 x argila (%).

Porém o que se sabe é que há grande possibilidade de respostas ao uso do gesso em solos muito intemperizados com teores de Ca^{2+} menores do que $0,5 \text{ cmol/dm}^3$ e saturação de Al maior que 20%.

CAPÍTULO 16

16.1. EROÇÃO DE SOLOS ARENOSOS

Há necessidade de ser feito um breve comentário dos termos Conservação de Solos e Controle da Erosão. O primeiro termo implica na recuperação da fertilidade dos solos, nas condições climáticas, no conhecimento das culturas e na produtividade agrícola, assim como no Controle da Erosão que está incluído na Conservação de Solos. Como se verifica tal termo é bem mais amplo e que foi derivado das Classes de Capacidade de Uso, com as subclasses e unidades de manejo. Portanto, o Controle da Erosão está dentro da Conservação de Solos.

Os agricultores, empresários assim como consultores querendo evoluir no sentido das modificações que estão sendo feitas nos talhões das culturas, como as alterações das sulcações e eliminação de carregadores, não levando em consideração os resultados de pesquisas em termos de controle da erosão. Assim é que a eliminação de terraços, ou de terraços passantes, assim como uma sulcação reta, independentemente do tipo de solo e da topografia, tem sido feito com o objetivo principal de ajustar o sistema de colheita e ganhar no rendimento das máquinas, sem observar os dados das pesquisas sobre erosão.

A erosão hídrica é a causa da desagregação dos solos agrícolas, indicando que uma série de eventos na evolução do Planeta Terra culminaram no desaparecimento e soterramento de civilizações.

A Figura 74 extraída do compêndio de Bertol, I. *et al.* (2019) indica as perdas relativas de solo em t/ha das principais culturas, variando de 100% para a mamona e para 16% para batata doce em t/ha/ano. Na soja os valores giram na faixa de 48 t/ha e na cana-de-açúcar os resultados entorno de 30 t/ha/ano. Através desta tabela verifica-se que apesar dos avanços que se tem preconizado nas culturas o efeito não é animador em relação as perdas de erosão.

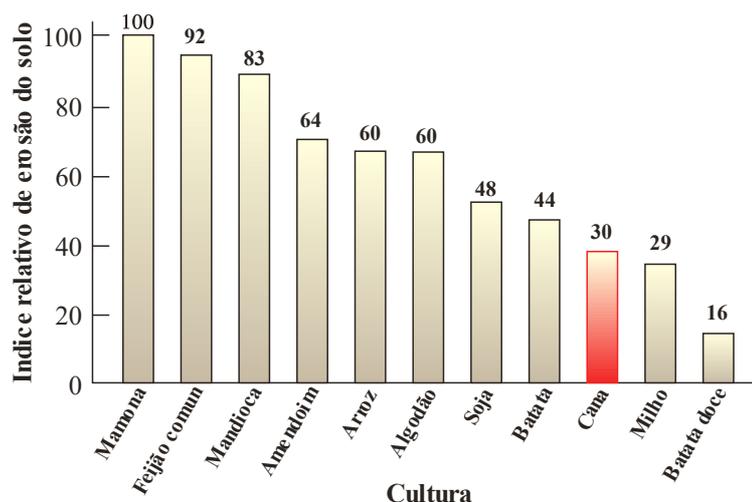


Figura 74 - Índice relativo da erosão do solo para diferentes culturas em relação à mamona.
Fonte: Bertol et al. (2019)

Em igualdades de condições, seria bem mais fácil trabalhar num solo argiloso do que num solo arenoso, pois a mínima falha num solo arenoso estaria propensa a erodir. As terras arenosas são frágeis em termos de matéria orgânica e agregação, fatores fundamentais no sistema erosivo e, portanto, deve ser adequadamente protegida. A figura 74.1 ilustra áreas erodidas em solos arenosos.



Figura 74.1- Ilustração de áreas erodidas em solos arenosos (Créditos: Henrique Bellinaso).

16.1.1. Processos de Erosão Hídrica

Em termos de erosão hídrica, inclusive em solos arenosos, seria o resultado de três processos, que podem agir ao mesmo tempo, tais como, a desagregação do solo na superfície, o transporte do material desagregado e a deposição deste material de solos nos pontos mais baixos do relevo ou nos escoadouros e corpos de água. Na Figura 75 se refere a tais processos devido a ação das gotas de água (chuva ou irrigação) num solo desprotegido, a saber: a desagregação da superfície do solo, o transporte do material desagregado e a deposição deste material.

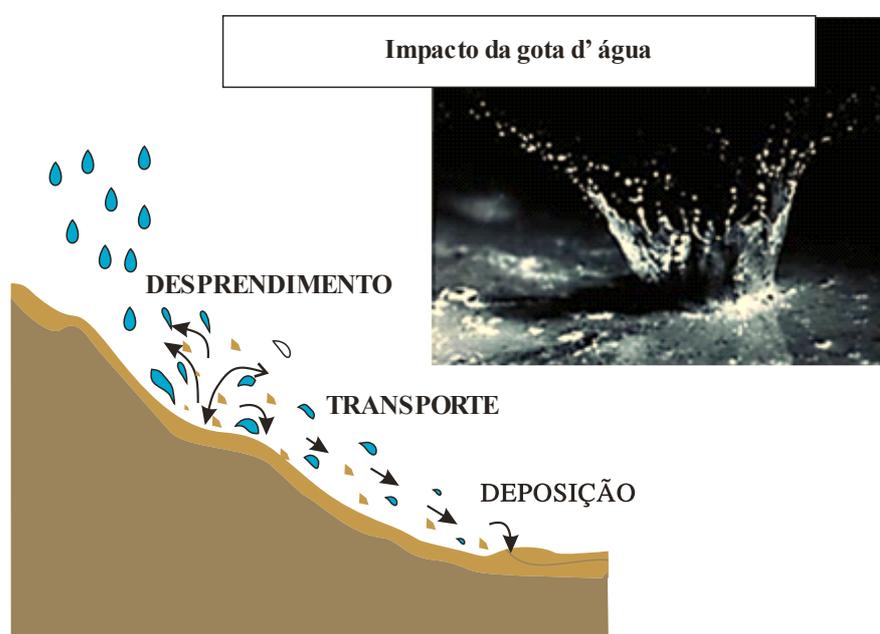


Figura 75 - Aspecto da gota de água desagregando o solo, transporte do material desagregado e deposição. **Fonte:** Merten, G.H. &Minella, J.P. G., 2019

Nestes processos estariam implícitos a sistematização do terreno, tais como a eliminação de sulcos de erosão existentes, ajustando estradas e carreadores e o uso da bioengenharia. Neste aspecto a expressão Bioengenharia inclui a utilização de material biológico em áreas de difícil contenção da erosão, em locais de solos degradados, sulcos profundos de erosão bem como em situações em que outras práticas não podem ser utilizadas. Utilizam-se pedras, troncos, sacos de areia, mantas sintéticas, obras de engenharia, cacimbas e outras.

As práticas de Controle da Erosão devem atuar nestes três processos descritos. De qualquer maneira a cobertura do solo, viva ou morta, estaria relacionada a reduzir os processos

de erosão, maiores nos cultivos perenes e menores nos anuais ou maiores em solos argilosos e menores em solos arenosos. Os sistemas de produção de uma determinada região devem buscar o cultivo com diversidade de espécies e aumento da cobertura dos solos, obtendo assim a proteção da superfície, tanto pelo volume abrangente assim como pela arquitetura foliar e distribuição de seus sistemas radiculares.

O sistema de produção vegetal está relacionado aos diversos capítulos neste compendio, porém, sem o adequado Controle de Erosão, não seria isto possível. O solo tem ficado exposto as intempéries do clima nas diferentes épocas do ano, num sistema de preparo sem a cobertura de plantas. Em relação ao Escoamento Superficial, que numa precipitação anual variando na média brasileira de 900 mm a 2.000 mm, em geral concentradas num determinado período do ano, suplantando a capacidade de absorção de água dos solos, sendo assim a erosão vai ocorrer. Em razão disto podem ocorrer eventos com elevados volumes de escoamento superficial, havendo necessidade de práticas mecânicas e vegetativas que reduzem o comprimento de rampa, porém nem sempre são suficientes. Em razão deste fato há casos em que há necessidade de que o excesso de água seja conduzido para os carregadores ou escoadouros, deixando a lavoura quase isento de erosão.

16.2. PRÁTICAS MECÂNICAS E VEGETATIVAS

Tais práticas são utilizações para reduzir o comprimento de rampa, tais com os terraços embutidos, terraços de base larga, terraços passantes, sulcação em lençol podendo ser de construção em nível ou em desnível. Há necessidade de se levar em consideração que práticas mecânicas estariam associadas a práticas vegetativas, tais como plantio em faixas, cordões de contorno, escoadouros consolidados.

O objetivo principal num Controle de Erosão numa propriedade agrícola seria o de aumentar ao máximo a infiltração das águas para reduzir ao mínimo o escoamento superficial (Veiga M. et al, 2019) de modo que os insumos aplicados na superfície como enterrados, permaneçam no mesmo local de origem. Porém nem sempre tal fato é alcançado.

Os espaçamentos entre os terraços e cordões de contorno estão disseminados nos diversos compêndios sobre o assunto.

Não somente em solo arenoso, mas também nos argilosos, no oeste de São Paulo, a construção de terraços tem sido uma prática comum nas lavouras em geral particularmente em

cana-de-açúcar, tais como os terraços embutidos invertidos ou não, de base larga possibilitando o tráfego entre os diferentes talhões (Figura 76).

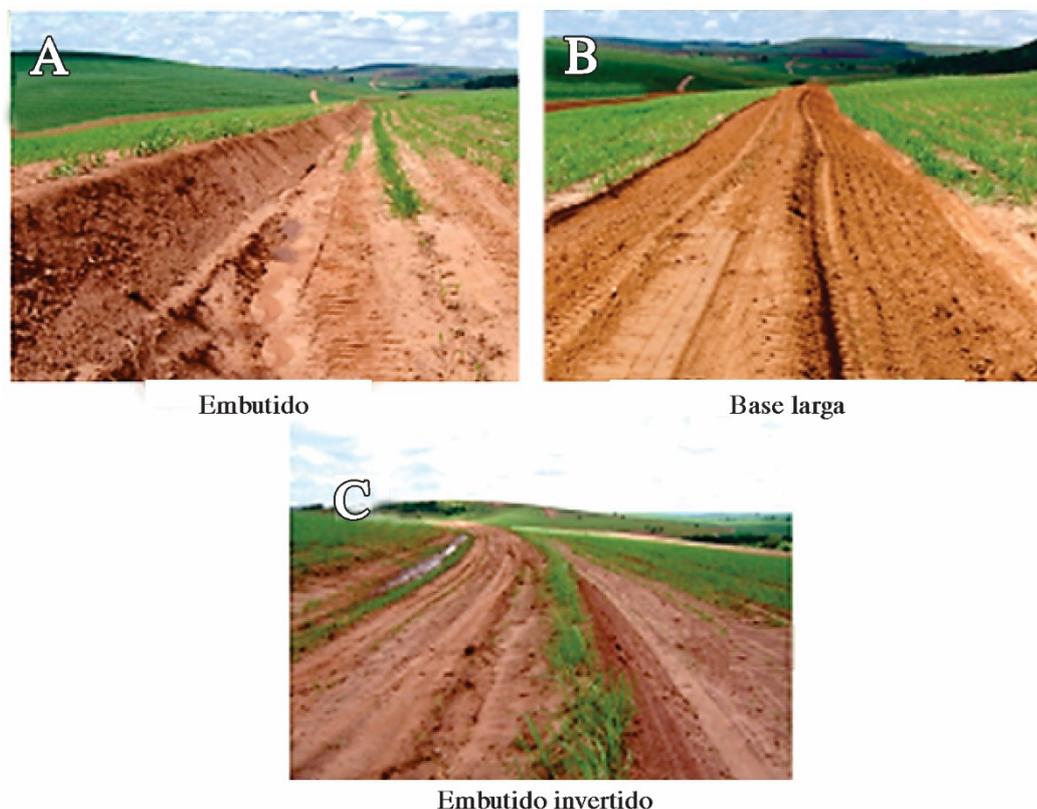


Figura 76 - Tipos de terraços em solo arenoso no Oeste de São Paulo em solos de textura arenosa. **Fonte:** Demattê, J.L.I. (2020)

De maneira geral há necessidade que seja feito um adequado planejamento na implantação da lavoura como indicado na Figura 77 na cultura de cana-de-açúcar, em solo de textura média-arenosa e arenosa. Nesta área numa associação de terrenos planos a suave ondulado de solos arenosos com teores menores que 25% de argila foi feita uma divisão de talhões levando-se em consideração a textura assim como mudanças na direção de plantio, tendo talhões com sulcação reta, talhões com sulcação em nível e talhões com sulcação em declive conduzindo os excessos de água para os escoadouros (itens A e B). No item C e D a utilização de sulcação reta em solo argiloso, sem critérios e a direção de sulcação, tem sido erodido no sulco de plantio.

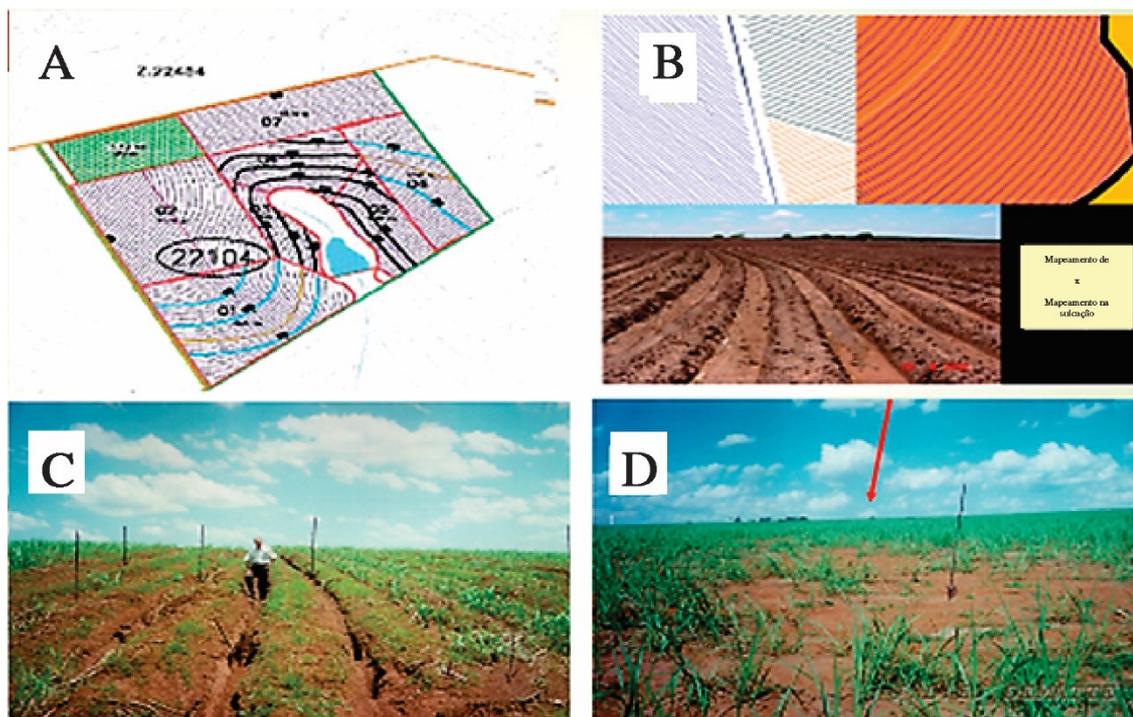


Figura 77 - (A) com sulcação reta e mudanças de direção, sulcação em nível e finalmente sulcação conduzindo o excesso de água para um escoadouro. (B) mesma área indicando os tipos de sulcação. (C e D) indicam que a sulcação reta sem a utilização de critérios tais como GPS tem ocasionado erosão em área de relevo plano em solo argiloso. **Fonte:** A e B (Usina da Barra), e C e D (Usina São Joao) Dematte JLI 2020, ambos de SP

16.3. OPERAÇÕES DE PREPARO DE SOLOS NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

As opções de preparo de solos arenosos e argilosos na cultura de cana-de-açúcar estão apresentadas na Figura 78 que foi dividida em faixas A, B e C, lidas de cima para baixo (Usina da Barra, 2004).

Na faixa (A) nota-se a aplicação de herbicida numa soqueira que após a morte, servirá de anteparo contra as chuvas, em seguida um implemento utilizado para romper as camadas compactadas e finalmente a sulcação mantendo a entre linha com culturas. Na opção (B) em solo de textura média-argilosa o uso de grades com destorroador e na opção (C) o uso de arado assim como a área devidamente arada.

Operações de Preparo



Figura 78 - (A) com herbicida aplicada na soqueira de cana-de-açúcar, operação de subsolagem e sulcação. (B) operações de grade. (C) aração assim como área preparada para plantio. **Fonte:** Usina da Barra, 2004

16.3.1. Alteração nos Talhões de Cana-de-Açúcar no Sentido de Melhorar as Eficiências da Mecanização

Na área de cana-de-açúcar assim como nas demais culturas, tem sido feito um trabalho de básico em termos de maior eficiência para as máquinas e demais atividades, do que nos trabalhos anteriores, porém o controle do sistema é mais complexo no sentido de Controle da Erosão Hídrica, se bem que tudo se refere ao empirismo, porém, à medida que o sistema evolui uma série de dados são incorporados.

Neste sentido foi feito uma área da Fazenda Mandacaru, Piracicaba, SP (Demattê, J.L.I. 2020) modelo constituída de solos arenosos na parte mais plana e nas encostas, também em solos arenosos, porém com presença de latossolos transitando para argissolos.

Nesta sequência pode ser visto a área do modelo anterior com as estradas e carregadores (item A) assim como o planejamento dos talhões e as modificações feitas no modelo atual (item B), com sensível aumento da área colhida inclusive com escoadouros em áreas mais declivosas (Figura 79).

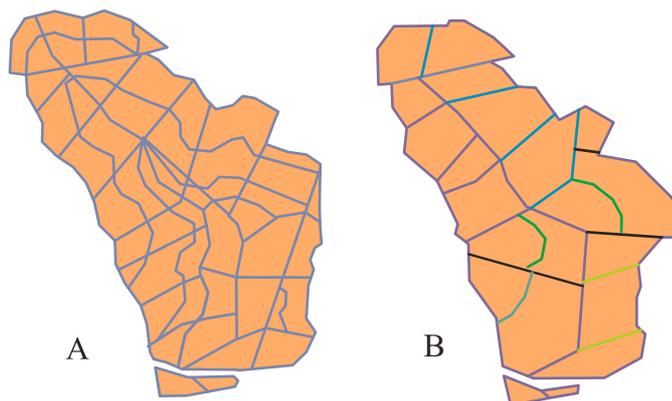


Figura 79 - Modelo antigo utilizado na cultura de cana-de-açúcar (A) e modelo atual (B) inclusive com canais escoadouros. **Fonte:** Demattê, J.L.I. 2020

16.4. OUTRAS ATIVIDADES USADAS NO CONTROLE DA EROSIÃO

Há diversas situações em termos de controle da erosão em áreas agrícolas em solos arenosos sendo que a Figura 80 indica as possíveis situações encontradas em regiões em diversas culturas (Veiga, M. et al, e De Maria el al, ambos 2019).



Figura 80 - (A) Terraço em nível e canal escoadouro. (B) Faixa de contenção de erosão. (C) Terraço em nível com água estancada, não é recomendado. (D) Cacimba próximo as culturas. (E) Estrada de terra erguida. (F) Esquema de plantio de cultura perenes em alternâncias. **Fonte:** Veiga, M. et al, e De Maria el al, ambos 2019.

O sistema de maneira geral partindo do convencional para uma condução da lavoura tidas como mais racional, como plantio direto, culturas de cobertura, duas ou mais culturas anuais em sistema como irrigação, assim como a evolução do plantio em culturas perenes, tem sido utilizado. Entretanto, em sistemas tidos como controlador de erosão hídrica mais eficiente isto não está ocorrendo, principalmente nesta época de mudanças climáticas.

16.5. SEQUÊNCIA DE EVENTOS NA LAVOURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Na evolução de sistemas empregados nas diversas culturas seria apresentada a evolução na lavoura de cana-de-açúcar em solos arenosos somente para usar um exemplo. Neste exemplo tem sido utilizado o sistema de condução da lavoura a mais de décadas, com os tipos de terraços e sistemas de plantio. Na década de 80 houve modificações de espaçamento das linhas de cultura nas terras arenosas, porém mantendo os terraços, foi utilizado o uso de gesso e calcário em soqueiras. Década de 90 foi eliminado um terraço com o objetivo de aumentar a área de trabalho mantendo a sulcação convencional. Década de 2000, sulcação reta, com terraços passantes e preparo reduzido. Década de 2010, colheita mecanizada, eliminação da queima de cana-de-açúcar em São Paulo, em 2015. Corte mecanizado de duas ruas de 1,50 m, década de 2022 assim como preparo canterizado.

Até agora não se sabe se tais evoluções reduz o processo erosivo nesta cultura. Pelo que se sabe o processo erosivo está aumentando.

16.6. USO DE MODELAGEM NO CONTROLE DA EROSÃO HÍDRICA

Tem sido feito nesta área trabalhos de Bertol *et al.* (2019) sobre simulações do sistema de erosão hídrica através de modelagem. Tal sistema serve para efetuar uma descrição generalizada de um sistema complexo, com o Controle da Erosão, e sendo assim a Modelagem não deixa de ser uma ferramenta que facilita o conhecimento das variáveis que atuam no sistema.

Um modelo é representado por uma ou mais equações matemáticas onde são inclusas as variáveis do sistema de erosão, assim como pode ser acrescentado de outras variáveis, não

constado no sistema. De qualquer maneira o Sistema de Modelagem envolve os três processos de Erosão Hídrica indicados no início deste capítulo que pode ser feito a Modelagem em relação ao total do processo ou separando em fases de Desagregação, Transporte e Deposição dos Sedimentos.

Neste aspecto a Modelagem pode ser feita através das perdas de sedimentos, perdas de nutrientes, sistemas de erosão em sulcos, voçorocas, em taludes, nas estradas etc., ao longo de determinado tempo. Os modelos podem ser baseados em princípios físicos, mais precisos do que os princípios empíricos. Nestes toma-se em consideração os resultados obtidos em parcelas não sendo aplicados na escala de bacias hidrográficas como o Modelo baseado em princípios físicos.

Os modelos empíricos mais utilizados é a Equação Universal de Perdas de Solos (USLE pela sigla americana), a nova versão designada de RUSLE com representante relacionada a equação universal de perdas, (Bertol *et al.* 2019).

$$A = R, K, L, S, C, P$$

Onde:

A: perda média anual de solo (t/ha/ano);

R: fator erosividade da chuva;

K: erodibilidade do solo;

L: comprimento do declive;

S: declividade do terreno;

C: sistemas de manejo dos solos, sem unidades;

P: práticas agrícolas adimensionais.

Os autores em temas dos modelos USLE e RUSLE indicam que o sistema foi desenvolvido com o fim específico de calcular as perdas médias de solos num período longo. Porém, no caso do Brasil, a não utilização de determinados princípios da Equação Universal e a Modelagem, tem sido negligenciado, porém levando-se em consideração o Sistema de

Informação Geográfica (SIG), cada vez mais utilizado, sendo que tal sistema tem sido muito utilizado nas propriedades agrícola para o planejamento geral inclusive o Controle da Erosão. Infelizmente tem sido culminado com aumento da erosão hídrica, sendo recomendado aos usuários cautela quanto ao uso do SIG para o controle da Erosão.

16.7. SULCAÇÃO VIRTUAL

Nas áreas de culturas de cana-de-açúcar tem sido feito um modelo tido como mais eficiente para Controle da Erosão Hídrica, porém não comprovado, sendo empíricas. Tal modelo implica numa série de parâmetros tais como a bacia de captação das águas de chuvas assim como os caminhos do excesso desta água, um preparo de solo de máxima infiltração das águas (pode ser incluído culturas de cobertura e plantio direto); tratamento com herbicida e incorporação adequada de restos culturais; época de plantio e colheita levando-se em consideração da época das chuvas; declividade do terreno e do sulco; escoamento seguro destas águas para um escoadouro; tipo de solo; uma estrutura final dos carregadores e talhões. Tal sistema não deixa de ser empírico na tentativa de resolver o problema de erosão.

Foi feito inicialmente (Raízen, 2018) numa área de 70 ha em Piracicaba (Figura 81), e projetado para ser seguido nas demais áreas, um modelo de Sulcação Virtual constituindo de um mapa com curvas de nível distantes entre si de 1,00 m (item A), declividade do terreno (item B), escoamento superficial (item C) e a declividade do sulco de plantio (item D).

Neste aspecto a declividade dos sulcos seria em nível (item D, cores azuladas) e em seguida em desnível (cores amareladas) tanto em solo arenoso como em solo argiloso. Neste sistema de sulcação tem permitido a absorção da água no procedimento em nível. Porém, a extensão do sulco em desnível como em nível assim como a declividade, seriam diferentes em função da textura dos solos. O escoadouro, quando necessário, seria construído um ano antes. (Figura 81).

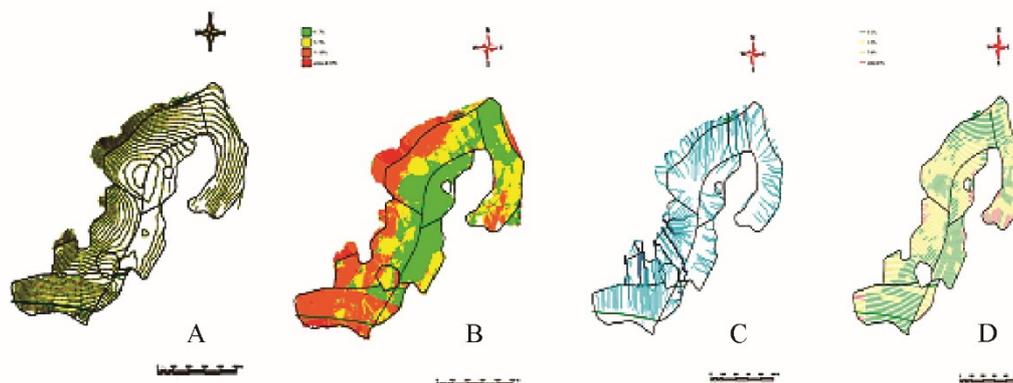


Figura 81 - Modelo de Sulcação Virtual em cana-de-açúcar - área de 70ha. **Fonte:** Raízen, 2018

16.7.1. A Sulcação Reta e o Sistema Conservacionista

Tem sido atualmente a tentativa do plantio direto, porém em sulcação reta, muitas vezes no sentido do maior declive, numa cópia de regiões de clima e de solos intemperizados. Porém tal fato pode ser utilizado se determinadas situações forem tomadas, como em solos argilosos, com GPS, com culturas de cobertura, porém não em terras arenosas. Nestes tipos de solos, em relevo ligeiramente ondulado, a sulcação reta pode ser um desastre como tem ocorrido em diversas situações do Brasil. Neste tipo de terras a sulcação reta pode ser indicada somente em relevo plano e com os recursos indicados para solos argilosos.

Por outro lado, com o advento do plantio direto em grãos tem sido comum na maioria dos agricultores a prática de reduzir ou eliminar o número de terraços, com sulcação reta, e muitas vezes aderir ao plantio “morro abaixo”. É necessário neste caso alguns pontos a considerar, a saber: em muitas regiões do Brasil, principalmente as de inverno seco e quente, é difícil formar uma adequada camada orgânica de proteção na superfície, e neste caso a remoção parcial ou total dos terraços pode ocasionar erosão.

A cobertura orgânica de fato protege o solo contra a erosão, mas o excesso de água que não se infiltrou tende a escorrer na superfície do solo, principalmente se houver declividade suficiente. Neste processo parte do adubo, dos corretivos, dos inseticidas, fungicidas e herbicidas tendem a ser arrastados pelo deflúvio superficial contaminando a área ambiental.

Sendo assim recomenda-se muita prudência e bom senso nesta questão. Não esquecer que os terraços de base larga, quando adequadamente construídos permite perfeitamente a transposição do tráfego de máquinas e equipes.

Na Figura 82 (A) indica numa cultura de soja no Paraná, a remoção dos terraços e o plantio direto na palhada não impediu a erosão. Em solo arenoso o sistema pode ser utilizado numa topografia plana e neste caso a sulcação deve ser vista com maiores detalhes para não erodir. Na Figura 82 (B) sulcação em cana sem terraços, em solo arenoso no Oeste de SP

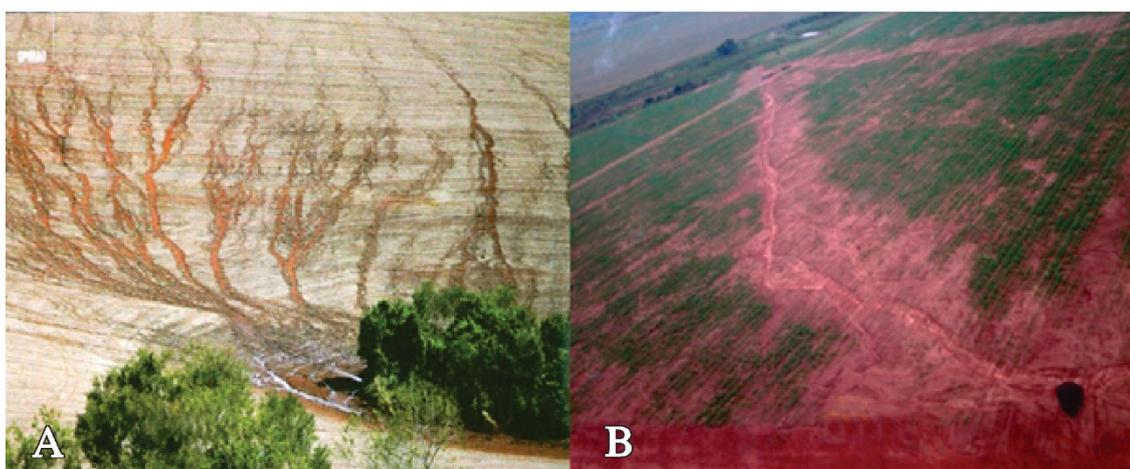


Figura 82 - Sistema de erosão em área de soja no Estado do Paraná com remoção de terraços.

Tal fato não corresponde somente em plantio de grãos, e cana-de-açúcar em solo arenoso, mas também em solo argiloso em cana-de-açúcar como na Usina da Barra em SP safra 2015/16, em área de topografia ondulada, reformou a área da Fazenda Santa Maria, eliminou os terraços e fez novo plantio de cana-de-açúcar com sulcação reta (Figura 83).

Posteriormente, já com o canal com 10 meses de idade, pôde-se verificar, com o auxílio dos Índices de Vegetação, que a produtividade variou de menos de 40 t.ha⁻¹, na área mais erodida (cores vermelhas e rosa), a mais de 80 t.ha⁻¹, na área de acúmulo do sistema de erosão (cor verde).

Como se observa, houve sensível erosão em toda a extensão do declive. Esta área será reformada após 5 a 6 cortes, corrigindo a sulcação, porém, o sistema de erosão já está instalado, e neste tempo a área perderá, além de terra em um solo nobre, moléculas de herbicidas, nutrientes etc.

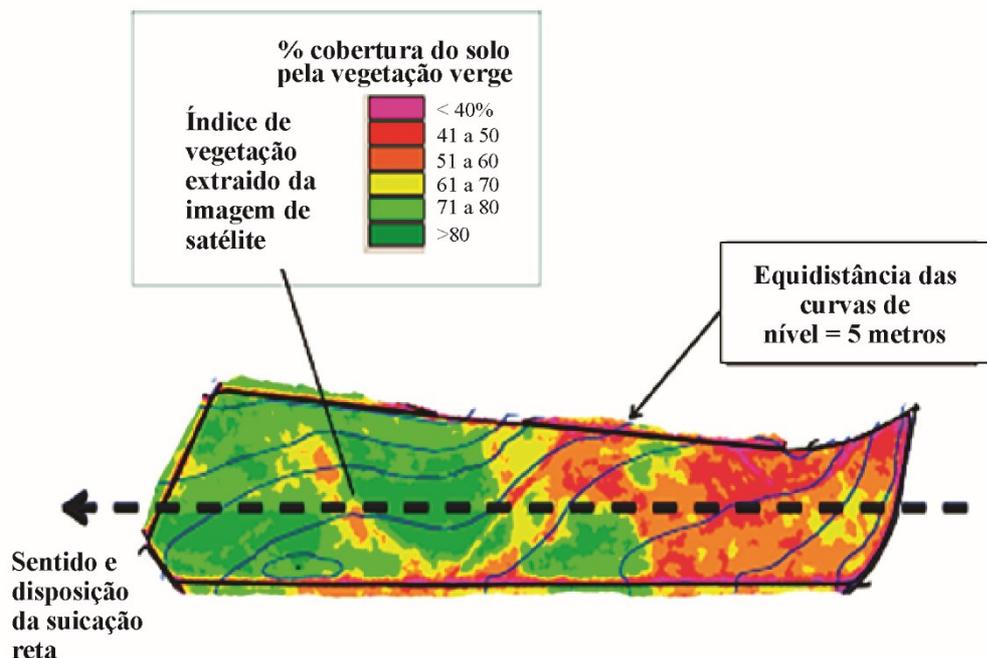


Figura 83 - Sistema de sulcação reta em solo argiloso. **Fonte:** Demattê, J.L.I. (2020)

Em outras palavras, há necessidade de se levar em consideração os tipos de terras, assim como as culturas, topografia etc., em relação a sulcação reta. Nem toda a situação é válida para sulcação reta.

Em relação os sistemas de preparo convencional do solo (CC), preparo reduzido (RD) e o preparo localizado do solo (PL), (Bertol, I. et al 2019) as perdas por erosão em termos de fósforo, potássio, cálcio e magnésio são menores na sequência $CC > RD > PL$. Com isso vem demonstrar que o Preparo Localizado (PL) ou plantio direto (PD), as perdas são menores de nutrientes Tabela 106.

Tabela 106 - Perdas médias de nutrientes em kg ha⁻¹.

Tratamento	Latossolo			
	P	K	Ca	Mg
CC	0,257 a	0,515 a	5,880 a	2,264 a
RD	0,046 b	0,151 b	0,861 b	0,325 b
PL	0,003 c	0,008 c	0,061 c	0,021 c

CC – Preparo convencional do solo; RD – Preparo reduzido do solo;
 PL – Preparo localizado do solo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%

Fonte: MARTINS FILHO, 2013.

16.8. CONCEITO DE DESERTIFICAÇÃO E DEGRADAÇÃO DOS SOLOS

O termo desertificação tem sido empregado como sinônimo de degradação e por isso causa uma série de transtornos e confusões. A desertificação se trata de uma degradação extrema e se aplica a terra, a cobertura vegetal e a biodiversidade. Denota a perda da capacidade produtiva de regiões áridas, semiáridas e subúmidas, resultante de vários fatores tais como variações climáticas e atividades humanas (Pan Brasil, 2004).

Por outro lado, a definição de degradação da terra envolve a redução ou perda de produtividade biológica ou econômica das terras agrícola por causa dos sistemas de utilização da terra. Devido a isto nem todo o caso de degradação seria considerado desertificação (Sá, B. I. & Paiva, A. de Q., 2019). O Atlas Mundial de Desertificação (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016) foi elaborado a partir dos dados de Thornthwait e Penman e definem o Índice de Aridez (IA) sendo advindo da quantidade de chuva (P) e da perda máxima possível de água por Evapotranspiração (ETP). Portanto, na Tabela 107 a desertificação somente ocorre quando o IA seria menor do que 0,65, ocorrendo na região do Nordeste e norte de Minas Gerais (Sá, B.I. & Paiva, A. de Q., 2019).

Tabela 107 - Classificação climática com base nos índices de aridez.

Índice de aridez	Classificação
<0,05	Hiperárido
0,05 – 0,20	Árido
0,21 – 0,50	Semiárido
0,51 – 0,65	Subsumido seco
>0,65	Subsumido e úmido

Fonte: SÁ, B. I. & PAIVA, A. de Q., 2019.

As causas da desertificação são inúmeras tais como fatores físicos, químicos, biológicos, políticos, sociais, culturais, econômicos, porém a contribuição da natureza seria um consenso cientificamente diagnosticado. As consequências da desertificação, porém as que ocorrem no Brasil, como a seca e os problemas sociais (saúde, pobreza, nutrição), são as bases do pobre desenvolvimento social da região.

A distribuição de áreas suscetíveis a desertificação é citada os Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí e Paraíba. Em termos absolutos as grandes áreas encontram-se na Bahia, Norte de Minas Gerais assim como no Ceará.

Os tipos de solos e a cobertura vegetal são variáveis, desde os latossolos argilosos até os solos rasos tais como os Neossolos Litólicos. No Estado da Paraíba os Neossolos Quartzarênicos, com cobertura de Savanas Estépica Florestada associada com Áreas Ocupadas com atividades de agricultura/pecuária, estão com nível Moderado de desertificação assim como os perfis de solos mais argilosos como latossolos e Planossolos Nátrico (Sá, B. I. & Paiva, A. de Q., 2019).

CAPÍTULO 17: Resumo geral

O presente texto foi extraído de Demattê JLI & Nanni M (2018). Levando-se em consideração o aumento da população mundial, de 6 bilhões no ano 2000 para 9 bilhões de pessoas em 2050, há um grande desafio para o setor agrícola, que deverá se responsabilizar com a produção de alimentos, pastagens, fibras, combustíveis renováveis e florestas plantadas para todo esse contingente. Associado ao crescimento populacional e à urbanização acelerada, tem-se observado o aumento de consumo per capita nos países em desenvolvimento e as mudanças dos hábitos alimentares nas diversas regiões do globo (Tabela 108). Dessa forma, a agricultura deverá não apenas elevar a produção, mas também a sua diversificação, uma vez que deverá atender às necessidades básicas de sobrevivência, tanto do nível mais baixo localizado principalmente na Ásia rural e África, como para o nível mais elevado, no qual o consumo é mais exigente, como é o caso dos EUA, Europa ocidental e Japão, onde a cobrança por alimentos mais nobres, fibras e produtos é mais expressiva.

Diante desse cenário, o setor agrícola deverá arcar também com as crescentes restrições físicas de recursos naturais, com legislações cada vez mais restritivas sob o ponto de vista ambiental, trabalhista e ocupacional, para a expansão de novas áreas, associado ainda ao aumento dos custos de produção. Portanto, nos próximos 50 anos, o setor agrícola deverá gerar um volume de alimentos, fibras e derivados semelhante ao que foi produzido nos últimos 8 mil anos, independentemente da variação do nível de consumo. De fato, este será um tremendo desafio, para o qual seguramente será necessária a incorporação de solos de textura mais arenosa no processo produtivo para atender à grande demanda.

Mas afinal, o que seriam esses solos de textura mais arenosa e qual sua distribuição no Brasil?

Basicamente, são terras profundas, aproximadamente com 3,00 m, podendo apresentar, no entanto, 15 ou mais metros de profundidade; com baixos teores de argila (menor que 15 %); bem drenados; localizados em relevo plano a suave ondulado (0-8 %), raramente em relevos mais acentuados (>20%); de baixa retenção de umidade; baixa fertilidade natural; elevado teor de alumínio que, na maioria dos casos, tem seus valores aumentados em profundidade; baixíssimo teor de matéria orgânica e muito suscetíveis à erosão hídrica. Essas características coloca a maioria das áreas que apresentam esses solos como marginais às atividades agrícolas. Portanto, são solos extremamente delicados em termos de sistemas de manejo, principalmente

quando conduzidos com baixo nível tecnológico. Na sua grande maioria, as principais classes de solos representantes dessas áreas compreendem os Latossolos com textura arenosa na superfície e os Neossolos Quartzarênicos.

O percentual dessas terras do Brasil é grande (na ordem de 5,82%) ou basicamente 50 milhões de hectares. No Cerrado do Brasil Central ocupam praticamente 15% da área e, na região designada de Matopiba (estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) representam 11,05% do território (Lumbreras, J.F et al 1987).

. Esses solos são ainda disseminados em extensão variável praticamente em todos os estados do Brasil, como no Rio Grande do Sul, Piauí, Alagoas, Amazonas, São Paulo e Paraná, podendo apresentar percentuais mais elevados dos que foram aqui indicados.

Tabela 108 – Características da demanda mundial de consumo.

Região	População (bilhões de pessoas)	Consumo	
		Principais demandas	Foco da demanda
Asia rural, África	1,3	Grãos, raízes, arroz, feijão	Sobrevivência
China, Índia	3,7	Carnes, lácteos, açúcar, frutas, vegetais	Produtos de base
Europa oriental, América Latina	1,0	Conveniência, snacks	Variedade
EUA, Canadá, Europa ocidental e Japão	1,0	Alimentos dietéticos e funcionais	Qualidade

Fonte: Rabobank, ICONNE, FAO.

Entretanto, esses solos podem estar associados a outros, também arenosos, profundos e bem drenados, mas com teor de argila um pouco maior (15% a 20%), ou ainda associados com solos de teores de argila variável em profundidade, arenoso na superfície (<15% de argila) e mais argiloso em subsuperfície (15 a 25% de argila). Isso ocorre em determinadas regiões, como no oeste de São Paulo, noroeste do Paraná, sul do Mato Grosso e oeste de Goiás. Esses apresentam assim, menor drenagem, o que, conseqüentemente, possibilita a permanência de excesso de água em superfície que, associado às condições de relevo local, acabam sendo mais susceptíveis à erosão. Nesses casos, destacam-se os Latossolos de textura média e os Argissolos com relação textural 1,5. Como o conjunto desses solos apresenta na paisagem grandes teores

de areia na camada superficial, torna-se difícil a separação entre eles, uma vez que, superficialmente os teores de argila são similares.

Portanto, o termo aqui utilizados “solos arenosos” contempla diversos perfis diferenciados em profundidade. De qualquer maneira, o principal fator limitante à produção agrícola desses solos é a grande suscetibilidade à erosão hídrica.

Por outro lado, os solos arenosos são quimicamente mais fáceis e baratos de serem recuperados; as reações químicas se processam com maior rapidez devido à baixa quantidade de cargas elétricas; e as reações com o fósforo são atenuadas, o que reduz o custo com as adubações fosfatadas. A quantidade de água para se atingir a saturação adequada é menor. Dessa forma, nos períodos secos ou de estiagem momentânea, as brotações de culturas perenes (pastagem) ou semiperenes (cana-de-açúcar, eucalipto, seringueira etc.) são melhores. Como apresentam menor saturação por água, a maturação de frutas ou de outras culturas atinge valores mais elevados de açúcares e, em períodos chuvosos, a eficiência do plantio ou da colheita é maior, e menor é a compactação devido ao tráfego de máquinas. Em regiões de inverno úmido, permitem ainda o plantio sem irrigação.

Níveis de manejo dos solos. Entende-se como manejo de solos “toda atividade aplicada ao sistema solo-planta-atmosfera com o intuito de aumentar a produtividade agrícola tendendo para um mínimo possível de degradação ambiental”. Portanto, as práticas de manejo para solos arenosos (Tabela 109) dependem dos níveis tecnológicos aplicados à cultura, que também são funções dos conhecimentos relacionados com as atividades agrícolas, mercado, clima e investimentos empregados. Dos níveis muito baixos aos muito altos de manejo, aumenta o nível de conhecimento de tecnologia e de recursos que devem ser empregados.

Tabela 109 – Solos arenosos e principais níveis de manejo.

Níveis de manejo	Com irrigação	Aplicação de tecnologia	Atividade	Nível de degradação
Muito baixo	Não	Rara	Pastagem	Muito alta
Baixo	Não	Muito pouca	Pastagem	Alta
Médio	Não	Pouca	Pastagem + cultura	Média
Alto	Semiplena	Média	Pastagem + cultura	Baixa
Muito alto	Plena	Alta	cultura	Muito baixa

Fonte: Demattê JLI & Demattê JAM 2009.

As expansões verificadas em solos arenosos de baixa fertilidade e a implantação de pastagens num sistema de baixo nível de aplicação de tecnologia fizeram com que a evolução da pecuária no Brasil sofresse profundo impacto negativo de produtividade. Houve, portanto, degradação de áreas de difícil recuperação, não somente em solos arenosos, mas também naqueles com maiores teores de argila. Tal degradação tornou-se um dos principais sinais de baixa sustentabilidade da pecuária nas diferentes regiões brasileiras, para todas as classes de solos atualmente ocupadas por essa atividade. No Brasil, dos 2,6 milhões de quilômetros quadrados ocupados por pastagens, cerca de 1 milhão são de pastagens cultivadas (IBGE, 2016). No Brasil Central, 80 % das pastagens cultivadas, responsáveis por mais de 55 % da produção nacional de carne, encontram-se em algum estágio de degradação, segundo diversos autores, particularmente Macedo et al. (2009).

Entretanto, nesses últimos anos, há de se enaltecer os órgãos de pesquisas, principalmente a Embrapa e universidades, cooperativas, empresários, produtores e demais envolvidos no processo de desenvolvimento de tecnologias para o aumento de produtividade. Com muito trabalho e dedicação, os envolvidos conseguiram - e estão conseguindo - a elevação da produtividade das terras arenosas, decorrente do melhor conhecimento das suas características e do quão delicadas são as atividades de manejo dessas áreas. Ações como a adoção de sistemas como plantio direto, integração lavoura-pecuária, sistemas agroflorestais, bem como elevação do nível de manejo, tanto para culturas isoladas como florestas e pecuária, estão sendo desenvolvidos e implementados, inclusive para aplicação em solos de textura mais fina.

Como exemplo, podemos destacar os resultados obtidos no setor pecuário. Áreas de integração de pastagens com lavouras ou florestas utilizando-se sistemas de baixo nível de manejo (pastoreio extensivo, sem correção de solo, etc), têm apresentado ganhos de produtividade de 0,5 Unidade Animal (UA)/ha. Quando se utiliza da prática de integração associada a sistemas de manejo com preocupação com a qualidade física e química dos solos, os aumentos de produtividade são ainda maiores (2,0 UA/ha).

Ou seja, apenas a adoção simples da integração já possibilita ganhos mesmo com baixo investimento em insumos, uma vez que a média nacional de ocupação está na faixa de 0,7 UA/ha.

Atualmente, os agricultores de todas as regiões - particularmente de áreas com predominância de solos arenosos - têm que conviver com uma série de dilemas. De um lado, o

constante aumento nos custos de produção (incluindo os custos da terra ou do arrendamento) e, do outro, a necessidade premente do aumento da produtividade. Nessa condição, a busca pelo aumento puro e simples da produção, atrelado à expansão de áreas para o cultivo, não se justifica por essas apresentarem baixa produtividade. Tais expansões se justificam somente se houver produtividade compatível e sustentável. Portanto, a escolha de novas áreas agrícolas, mesmo que incluam terras arenosas, deverá ocorrer com a adequada aptidão para agricultura sustentável. Caso contrário, poderemos estar privando as futuras gerações de um dos nossos maiores patrimônios.

Em relação ao nível mais elevado de manejo, por um lado já se verificam o grande emprego de capital e de tecnologia e, por outro lado, a menor importância relativa do fator terra. Nesse caso, a capacidade gerencial assume grande importância para equilibrar e harmonizar o emprego de todos os fatores de produção (capital, terra e mão de obra). Além do mais, agricultor nenhum irá utilizar práticas de manejo se a relação custo/benefício lhe for desfavorável.

Apesar do tema aqui abordado estar especificamente relacionado ao solo, é importante lembrar que, para manejar adequadamente uma área, é necessário profundo conhecimento em relação aos solos, à cultura e, principalmente, às condições climáticas (precipitação de chuvas no ano agrícola, balanço hídrico, veranicos, período seco, geadas etc.).

Como exemplo, tem-se a região de Campo Verde, no Mato Grosso, onde a produtividade em sistema lavoura-pecuária, inclusive em solo arenoso, tem se desenvolvido muito bem. Disto resulta que os pecuaristas e produtores de grãos estão entusiasmados com a produtividade e com o sistema empregado. No entanto, o clima da região ainda tem sido fator limitante, como se observa na Tabela 110.

Tabela 110 – Produção de grãos de soja e milho em solos de textura arenosa nas safras 2012/13 e 13/14 na região de Campo Verde (MT).

Teor de argila	Safra	Cultura	t/ha de grãos	Observações
<15%	2012/13	Soja	1,05	Estiagem e nematoides
<15%	2012/14	Soja	2,88	Sem estiagem
<15	2012/14	Soja	3,48	Sem estiagem
10 a 20%	2012/14	Soja	1,37 a 3,30	18 dias veranico
10 a 20%	2012/14	Soja e milho	3,48 a 7,32	Sem estiagem

Fonte: Donagemma et al. (2016) modificado.

Na Figura 84 apresenta erosão laminar/sulco em cana-de-açúcar no PR (DEMATTÊ, J.L.I. & NANNI, M.R. 2018).



Figura 84 - Erosão laminar/sulco em área de cana-de-açúcar na região de Inajá-PR após intensas precipitações Demattê J.L.I. & Nanni M. (2018).

Desafios em relação ao manejo dos solos arenosos

O desenvolvimento do conhecimento de solos implica basicamente no reconhecimento de suas limitações e na possibilidade, por meio de sistemas de manejo, de tentar atenuá-las ou eliminá-las. Assim tem sido feito na maioria dos casos, não somente em solos mais argilosos, mas também em arenosos. Com isso, o desenvolvimento dos sistemas indica que grande parte dos desafios em relação ao manejo desses solos arenosos está sendo resolvida, porém apenas em nível de manejo que se mostre compatível com as atividades agrícolas, ou seja, de nível médio a muito alto. Caso contrário, os solos podem degradar, como tem ocorrido no noroeste do Paraná, onde os solos sob condições de mata nativa apresentam, em média, teores de carbono acima de 1,2%, enquanto nas áreas de pastagem, esse valor se reduz para 0,8% a 1%, e nas áreas de plantio de cana-de-açúcar, não ultrapassam 0,5% (às vezes com teores menores do que aqueles encontrados nos horizontes B de solos argilosos).

Níveis elevados de manejo nos solos arenosos, inclusive com irrigação via gotejo ou pivô, têm proporcionado produtividades elevadas. Esta situação tem sido observada na fruticultura na região semiárida do Brasil, nos cultivos de tomate, abacaxi e outras culturas no Brasil central, ou ainda em cafezais na região do oeste da Bahia.

A produtividade da cana-de-açúcar em sistema de preparo reduzido ou plantio direto tem sido maior em solos arenosos na região oeste de São Paulo. Considerando a média de cinco

cortes no ano agrícola 2016/17, enquanto nos solos arenosos obteve-se 84,1 t/ha, com 11,3 ATR/ha, em solos argilosos verificou-se 79,2 t/ha, com 10,7 ATR/ha. No caso dessa cultura, que apresenta um sistema de manejo calcado nas condições climáticas do ano agrícola, totalmente diferente das culturas anuais e das perenes, a produtividade é dependente do nível de manejo, tais como época de plantio e de corte, manejo varietal, percentual de irrigação com vinhaça ou com água ou sem irrigação (Tabela 111). Observa-se que a produtividade agrícola e, em consequência, o ATR/ha desses exemplos indica que, sem o sistema de irrigação, com água ou com vinhaça, a produtividade agrícola tende a ficar na faixa de 63,5 t/ha - considerada baixa quando comparada com as 77 t/ha nesse mesmo ano agrícola na safra 2017/18 para a região Centro-Sul.

Tabela 111 – Produtividade solos arenosos em cana-de-açúcar (média de 5 cortes) em diversas regiões do país com ou sem irrigação.

Região	Período climático maio a setembro	Produtividade (t/ha)		Acréscimo de produtividade pela irrigação	
		Sem irrigação	Com irrigação	Convencional	Plena
Oeste São Paulo	Seco e quente	68	105 (gotejo)		37
Sudoeste São Paulo	Úmido e frio	65	72 (convencional)	7	
Centro São Paulo	Seco e frio	72	78 (convencional)	6	
Goiás	Seco e quente	62	95 (pivô)		45
Noroeste Panamá	Úmido e frio	60	72 (convencional)	12	
Guadalupe Piauí	Semiárido e quente	55	190 (gotejo)		135
Mato Grosso do Sul	Úmido e frio	64	72 (convencional)	8	
Minas Gerais	Seco e quente	72	105 (pivô)		33
Média		63,5	79,8	8	62,5

Fonte: Centro de tecnologia Canavieira (CTC). Dados da safra 2017/18 e dados pessoais.

Irrigação com vinhaça em 30% da área e com água em 20%, exceto Guadalupe/PI.

Período climático: outubro a abril chuvoso, maio a setembro seco ou úmido. Irrigação convencional: autopropelido somente para brotar cana.

Irrigação com vinhaça, colocar acréscimo de 6 t/ha.

De acordo com a Tabela 111, observa-se que irrigação com água seria viável somente em regiões secas e quentes e no período de maio a setembro, enquanto, em regiões de período frio, tanto seco como úmido, produtividade é baixa, mesmo com irrigação. Nesse caso, o que poderia ser feito? Novamente, verificar as limitações da região e atenuá-las com práticas de manejo.

Portanto, o sistema de irrigação em cana-de-açúcar não implica elevadas produtividades, a não ser em períodos climaticamente aceitáveis como indicado. Em

Guadalupe, no Piauí, onde a temperatura média está acima de 28°C e com irrigação de gotejo em solos leves, a produtividade média de dois cortes está na faixa de 190 t/ha, com 25,1 ATR/ha, contra 10,8 de ATR/ha do estado de São Paulo, de acordo com dados de 2016 do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). Em área experimental da Usina Gasa – Andradina (SP), a produtividade agrícola com gotejo encontra-se na faixa de 130 t/ha com quatro cortes e com 16,7 ATR/ha. Isso indica, portanto, que o aumento da produtividade com elevado nível de tecnologia depende, seguramente, das condições climáticas, como tem sido enfatizado.

De qualquer maneira, o aumento da tonelagem de cana para viabilizar o sistema de manejo com irrigação plena ou semiplena deve estar acima de 20 ou 25 t/ha de acréscimo em relação à produtividade sem irrigação.

Um alerta se faz importante: na tentativa de se aumentar a eficiência do corte mecanizado e do transporte (responsável por 35% a 40% do custo da tonelada de cana), muitas usinas têm-se utilizado de sistemas empíricos de conservação do solo (como remoção de terraços, aumento da distância vertical (tiro longo), sulcação reta, grandes blocos de colheita), o que tem propiciado aumento significativo de erosão e, muitas vezes, inviabilizando o projeto, numa direção totalmente contrária à limitação do solo. Infelizmente, perdas de terra por erosão, anteriormente na faixa de 12 t/ha/ano, já estão na faixa de 25 t/ha/ano.

Dada a grande fragilidade dos solos arenosos em relação aos processos erosivos, é imprescindível que tais solos devam estar sempre protegidos por práticas de conservação do solo e, principalmente, cobertos com culturas ou com a palhada, ou ainda por ambos. A figura 85 mostra o preparo em áreas no Paraná em cana-de-açúcar.



Figura 85 - Preparo de solo para plantio de cana-de-açúcar na região de Maringá-PR (2018). (Demattê JLI & Nanni M., 2018).

CAPÍTULO 18: AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE SOLOS ARENOSOS

Landell do IAC já indicou que a classificação dos ambientes de produção são principalmente função das camadas mais profundas ou do horizonte B diagnóstico dos solos. Neste sentido, os solos arenosos quando profundos, terão no geral horizontes Bw médio-arenosos ou C (como dos Neosolos Quartzarênicos). Quais seja, tais solos tem drenagem excessiva devido a sua estrutura e falta de variação textural ao longo do perfil. Neste sentido, os horizontes diagnósticos tem qualidades de produção baixas. No geral o pilar textura é arenosa ou média, sem microestruturação, alta constituição de quartzo em sua mineralogia, baixíssima retenção de cátions e água. No geral, são solos pobres em nutrientes. Logo, os ambientes destes solos são os denominados desfavoráveis ou níveis E, F ou G, próprios para variedades rústicas. Caso ocorra de o solo ter em subsuperfície caráter eutrófico melhora sua condição, mas não chegarão aos níveis dos ambientes favoráveis. Tais solos necessitam de cuidados especiais e manejo avançado com material verde, rotação de culturas, manutenção da água no solo e alto nível de conservação.

CAPÍTULO 19: NECESSIDADE DE DESENVOLVIMENTO

Há neste caso uma série de desenvolvimentos que não estão incluídos neste trabalho, mas são também importantes.

Historicamente a classe de solos arenosos tem sido severamente condenada à exploração agrícola de alimentos em culturas anuais, excluindo a pecuária e outros tipos de culturas de subsistências. Com a escassez de áreas disponíveis com teores de argila superior a 25% e com demanda mundial de alimentos crescendo a cada dia, os solos arenosos passaram a ser incorporados nos sistemas de produção, também de grãos e carnes, porém em níveis de manejo, alto a muito alto. Entretanto, e como todo sistema agrícola necessita de evolução e maiores conhecimentos.

Diversos autores e entre outros Franchini et al. (2014) comenta que a genética pode auxiliar por meio da biotecnologia, para a obtenção de genótipos mais tolerantes as intemperais do clima, do solo e do ambiente, inclusive a semente utilizada e aos estudos da planta, teriam papel relevante nesta empreitada.

Em relação ao alumínio nos solos há uma série de dúvidas ainda não esclarecidas, como a translocação de sinais para as plantas, os mecanismos de resistência/tolerância, tolerância por exclusão externa e interna e outras. Mecanismos fisiológicos do alumínio que permitem que as plantas sobrevivem em ambientes inférteis e elevado teor de alumínio. Casos de Braquiária e demais plantas de cobertura, de Arroz assim como Eucaliptos, como tolerantes ao ambiente ácidos, sendo que o sistema radicular destas plantas assim como os dados genéticos, necessitam maiores estudos.

Em relação as vias de sinalização envolvendo o alumínio dos solos, há uma série de sinais vindos do ambiente (solos), assim como enzimas existentes nas células de alumínio, que recebem tais sinais e que podem indicar que a toxidez do alumínio seriam frutos de tais sinais assim como se o sinal emitido é do alumínio ou do Al^{3+} Rossiello *et al.* (2018). Fatos como estes devem ser esclarecidos. Absorção do alumínio e da água, por processos de H^+ -ATPase e indosporina devem ser mais esclarecidos.

Outros aspectos, como o desenvolvimento de redução da lixiviação, reduzindo a contaminação de lençol freático com nitratos, cloretos e micronutriente; desenvolvimento de material genético, mais tolerantes à seca, ao elevado teor de Al em profundidade, a baixa

demanda de umidade, a resistências a maioria de pragas e doenças; teores de cálcio em profundidade; desenvolvimento de sistemas para absorção de nutrientes pelas culturas; necessidade de desenvolver estudos de solubilização pelo sistema radicular de fosfatos e micronutrientes. Quanto ao gesso, há necessidade de estudos em relação a quantidade a ser usada nos solos e a profundidade atingida, pois as indicações são empíricas, além do fato de haver empobrecimento de outros nutrientes (Mg^{2+}) como já está ocorrendo.

Desenvolvimento de práticas mecânicas e agronômicas de proteção ao solo contra sistemas de erosão; da necessidade de aumentar o sistemas radiculares com produtos químicos e biológicos, inclusive para reduzir a compactação; de manejos do solo e da cultura; melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos na profundidade de 0-100 cm ou mais; épocas de semeadura através dos sistemas de irrigação, espaçamento e densidade de plantio; ajustes de manejo fito sanitário considerando as características climáticas das regiões; dias de campo; poderão auxiliar no desenvolvimento da cultura nos solos arenosos.

O uso integrado dessas tecnologias pode resultar em um modelo tecnológico apropriado ao cultivo em solos arenosos, favorecendo a expansão da cultura como soja em várias regiões brasileiras. Portanto, a situação ainda não é confortável e requer esforços no futuro próximo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento que os agricultores irão utilizar no futuro para produzir alimentos para a imensa população depende das novas descobertas científicas. Grande parte destes estudos deverão se dar nas áreas de engenharia genética (biotecnologia entre outras), fertilidade do solo, nutrição de planta e manejo da variabilidade das áreas de produção. Os futuros agricultores deverão operar segundo a regra de melhor sintonizar e procurar pelo próximo fator limitante. A diferença com o presente é que estes agricultores terão ferramentas mais adequadas para realizarem seu trabalho. O sucesso dependerá então de quantas eficientemente estas ferramentas serão utilizadas.

Historicamente, os solos mais arenosos foram severamente condenados à exploração restrita às pastagens em baixo nível de manejo. Com a escassez de áreas disponíveis de solos com teores de argila superior a 25% e com crescente demanda mundial de alimentos, esses solos passaram a ser incorporados nos sistemas de produção também de grãos. Atualmente, o território ocupado por eles é considerado a nova fronteira agrícola do Brasil, porém sendo sustentável apenas em níveis adequados de manejo, qual sejam, de médio a muito alto.

Entretanto e, como todo sistema agrícola, os solos arenosos ainda carecem de mais conhecimentos para o seu adequado manejo. Como solos quimicamente pH dependentes, semelhante aos solos mais argilosos, a quantidade de nutrientes, corretivos, água pode ser similar, porém sendo requeridas aplicações em menor quantidade e mais frequentes, algo ainda não bem estabelecido. Da mesma forma, é necessário o desenvolvimento de sistemas que visem a redução da translocação de nutrientes em profundidade, possibilitando a diminuição da contaminação de lençol freático (sulfatos, nitratos, cloretos e micronutriente), assim como de sistemas de proteção de fertilizantes em relação às reações com o solo.

Outra demanda para esses solos é quanto ao uso do gesso como opção de manejo para melhorar quimicamente a subsuperfície, uma vez que a maioria das fórmulas para aplicação são empíricas. Portanto, o uso indiscriminado pode acarretar o empobrecimento de outros nutrientes, como o magnésio, como já está ocorrendo.

O desenvolvimento de material genético, com modificações ou não, mais tolerantes à seca, ao elevado teor de alumínio trocável em profundidade, a baixa demanda de umidade, a resistências a maioria de pragas e doenças podem ser alternativas para se buscar incrementar o potencial produtivo dos solos arenosos. Igualmente são requeridos investimentos no

desenvolvimento de práticas mecânicas e agronômicas de proteção desses solos contra a erosão. E, especificamente no caso dos solos arenosos e coesos da Formação Barreiras, principalmente no Nordeste do país, são ainda necessárias opções de manejo visado romper as restrições físicas ao desenvolvimento radicular devido ao bloqueamento de poros.

Referências Bibliográficas

A

ADAMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, G. de.; MADEIRA NETTO, J. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W. (Ed.). Solos dos cerrados. São Paulo: Nobel; Brasília: EMBRAPA, CPAC, 1986. p. 33-74.

ADAMCHUK, V.I.; HUMMEL, J.W.; MORGAN, M.T.; UPADHYAYA, S.K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>.

ALMEIDA, I.R. O clima como um dos fatores de expansão da cultura de soja no Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso. Presidente Prudente, 2005. (Tese de Doutorado).

ALVAREZ V, V.H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N.F. Enxofre. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Viçosa, MG: Ver Editores, 2007.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMBROSANO, E. J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia*, v. 70, n. 4, p. 810–818, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000400012>.

ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1999, p. 57–87.

ANDRADE, E.B.; FRAZÃO, D.A.C. Sistemas de produção em policultivo de mandioca, milho e caupi para microrregião Bragantina, Pará, Belém. PA. CPATU, 1980. 32 p.

ANDREOTE, F. D.; PEREIRA E SILVA, M. C. Microbial communities associated with plants: learning from nature to apply it in agriculture. *Current Opinion in Microbiology*, v. 37, p. 29–34, 2017.

ANTOS, H.G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M.L.D.; SOUSA, J.S. de; PARES, J.G.; FONTANA, A.; MARTINS, A.L. da S.; OLIVEIRA, A.P. de. O novo mapa de solos do Brasil; legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p.

ARTIOLLI, J. Nossa Cultura é Nossa Paixão. In: REUNIÃO TÉCNICA FMC CLUBE DA CANA, Guarujá, SP, 2012.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. Water quality for agriculture. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.

AZEREDO, D.F. DE; BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana planta-doses e fracionamento. STAB, v. 4, 1986.

ALEGRE, J.C. Effects of land clearing and preparation methods on soil physical and chemical properties and crop performance on an ultisol in the Amazon Basin. Raleigh, N.C., North Carolina State University, 1985. 153 p. (PhD Thesis).

ALEGRE, J.C. & SANCHEZ, P.A. Central continuous cropping experiment in Yurimaguas, y-101. In: Tropsoil Technical Report, 1988-89, p. 249-251. 1993.

ALEGRE, J.C.; CASSEL, D.K. & BANDY, D.E. Effects of land clearing method and subsequent soil management on soil physical properties of an Ultisol in the Amazon Basin of Peru. Journal Series of the North Carolina Agricultural Research Service. Raleigh, N.C. North Carolina State University, 1986. 17 p. (Paper number 15).

ALEGRE, J.C.; SANCHEZ, P.A.; SMYTH, T. Manejo de suelos con cultivos contínuos en los trópicos húmidos do Peru. In: Manejo de suelos tropicais em Latino America. Ed. SMYTH, T.; RAUN, W.; BERTSCH, Soil Science. NCSU, Raleigh, USA, 1991. p. 157-168.

ALEGRE, J.C. SZOTT, L.; PALM, C. Central low-input cropping experiment. Second cropping cycle. In: Trop soil technical report. NCSU, Raleigh. p. 130-134. 1991.

B

BALBINIOT JUNIOR, A.A.; REIS, R.F.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; MANDARINO, J.M.G.; FERREIRA, A.S.; WERNER, F.; IWASAKI, G.S. Adução nitrogenada na soja cultivada em solo arenoso no sistema de integração lavoura-pecuária. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 34., 2014, Brasília. Londrina. Resumo expandido. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 40-41.

BANDY, D.E. Deep lime experiment. In: Agronomic economic research on soils of the tropics. 1978-1979. Report. North Caroline State University, USA. p. 127-137. 1980.

BARBER, S.A. Soil-Plant Interactions in the Phosphorus Nutrition of Plants. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.). Madison: America Society of Agronomy, Wisconsin, USA.

BARROS, M.F.C.; MAGALHÃES, A.F. Avaliação de métodos de determinação da necessidade de gesso em solos salinos-sódicos. RBCS, v. 13, p. 119-123, 1989.

BAZAGLIA FILHO, O.; RIZZO, R.; LEPSCH, I.F.; PRADO, H. do; GOMES, F.H.; MAZZA, J.A.; DEMATTÊ, J.A.M. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of an area with complex geology. R. Bras. Ci. Solo, v. 37, p. 1136-1148, 2013.

BAZANI, J.H.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; CABRAL DE MELO, E.S.A. Nutrição fosfatada em plantação de eucalipto. Informações Agronômicas, n. 148, dezembro 2014. 11 p.

BEAR, F.E.; TOTH, S.J. Influence of calcium on availability of other cations. *Soil Science*, Baltimore, v. 65, p. 67-74, 1948.

BENATTI, P. Palestra realizada em Sertãozinho, SP em 2007. In: Livro Penatti.

BENITES, J.R.; NUREÑA, M.A. Integrated low input cropping system. In: *Tropsoils Triennial Technical Report*. 1981-1984. Raleigh: North Carolina State University, 1985. p. 149-151.

BERGAMIN, A.C. Compactação do solo em sistemas intensivos de produção. *Informações Agronômicas*, n. 164, dezembro 2008.

BERNSTEIN, L. Crop growth and salinity. In: *Drainage for agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, 1974. 252 p.

BERTOL, I.; CASSOL, E.A.; MERTEN, H. Modelagem e modelos utilizados para estimar a erosão do solo. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I.C.; SOUZA, L.S. (Eds.). *Manejo e conservação do solo e da água*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

BERTOL, I.; DEMARIA, I. C.; SOUZA, L. da S. (Org.). *Manejo e conservação do solo e da água*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

BELLINASSO, I.F. A compactação e o preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 1997.

BELLINASSO, I.F. A compactação e o preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar. In: VII Seminário Copersucar de Tecnologia Agronômica. Centro de Tecnologia Canavieira. Piracicaba, SP, 1997. Número de pgs 452.

BLASS, F.D. *Crystallography and Crystal Chemistry: An Introduction*. New York: Reinhold and Winston, Inc., 1971.

BOHN, H.L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G.A. *Soil Chemistry*. New York: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1979.

BOGIANI, J.C.; FERREIRA, A.C. de B. Plantas de cobertura no sistema soja-milho-algodão no cerrado. *Informações Agronômicas IPNI*, n. 160, 2017. 16 p.

BORLAUG, N.E.; DOWSWELL, C.R. Fertilizantes para nutrir o solo infértil que alimenta uma população fértil que povoa um mundo frágil. In: IFA 61st Annual Conference, New Orleans, 1993. Translated by F. Cardoso. Published by Manah S.A. São Paulo, 35 p.

BOHN, L. H.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. *Soil chemistry*. 3. ed. John Wiley and Sons, 2001.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. 3. ed. Bookman Editora, 2009.

Disponível em:
https://books.google.com.br/books/about/Elementos_da_Natureza_e_Propriedades_dos.html?id=XI49IAu5mwkC&redir_esc=y.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora Limitada, 2013. 685 p.

BREVIK, E.C. et al. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, v. 264, p. 256-274, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.017>.

BRISCOE, O.C. Integrated forestry-agriculture-livestock land use at Jari Florestal. Agropecuária. In: HUXLEY, P.A. (Ed.). *Plant Research in Agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 1983. p. 63-70.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: MIRANDA-DINARDO, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G. de A. (Eds.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: IAC, 2008. p. 205-237.

BAYER, C. Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos. 1996. 241 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK J.; DIECKOW, J.; AMADO, T. J. C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interactions in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. *Geoderma*, Amsterdam, v. 133, n. 3-4, p. 258-2668, 2006.

BELLINASSO I.F. A compactação e o preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar (páginas 206 a 210). In: VII Seminário Copersucar de Tecnologia Agronômica. Centro de Tecnología Canavieira. Piracicaba, SP 1997. Número de págs. 452.

BERGAMIN, A.C. Compactação do solo em sistemas intensivos de produção. *Informações Agronômicas*. No 164. Dezembro 2018.

BERTOL, I; CASSOL E, A, MERTEN, H. Modelagem e Modelos Utilizados para estimar a erosão do solo. BERTOL, I; DE MARIA, I. C.; SOUZA L.S Editores *Manejo e conservação do solo e da água*. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2019.

BOGIANI, J.C. FERREIRA, A.C. de B. Plantas de cobertura no sistema soja-milho-algodão no cerrado. *Informações Agronômicas IPNI*. No 160. 2017. 16 p.

BOHN, H.L; MCNEAL, B.L.; O'Connor. *Soil Chemistry*. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley, Sons. 1979.

BRADY, C.N. E WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3ª Edição Porto Alegre Bookman Tradução de I.F. Lepsch. 686 pg2013

BARBOSA, Izabela Richena. Produção de massa de matéria seca da parte aérea e marcha de absorção de nutrientes em *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*. 2019. 52 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019.

C

CACERES, N.T.; ALCARDE, J.C. Adubação verde com leguminosas em rotação com cana-de-açúcar. Revista STAB, v. 13, 1995.

CAMPANELLI, V.C. Agricultura de Alta Tecnologia na Prática. In: Clube da Cana FMC, Guarujá, SP, out. 2012.

CARNAÚBA, B.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. Revista STAB, v. 8, 1990.

CARNEIRO, M.A.C.; FERREIRA, D.A.; SOUZA, E.D.; PAULINO, H.B.; SAGGIN JUNIOR, O.J.; SIQUEIRA, J.O. Arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregates from fields of "murundus" converted to agriculture. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 50, n. 4, p. 313-321, abr. 2015.

CAROLINO DE SÁ, M.A.; REIN, T.A.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; SOUZA, K.W.; FRANZ, C.A.B. Produtividade da cana-de-açúcar e atributos de um Latossolo Acriférico do Cerrado sob plantio direto e convencional. STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos, 2022.

CARDOSO, F.P. Santa Braquiária. Informações Agronômicas, n. 73, março 1996.

CATANI, R.A.; GALLO, J.R. Avaliação da exigência de calcário dos solos do estado de São Paulo: a correlação entre pH e a saturação em bases. Revista de Agricultura, Piracicaba, v. 30, p. 49-60, 1995.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC). Relatório de fechamento de safra. Piracicaba, SP, dez. 2016.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC). Relatório de fechamento de safra. Piracicaba, SP, dez. 2017.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC) PROJETO 1033. SAFRA 2010/11. RELATÓRIO DE FECHAMENTO DE SAFRA. PIRACICABA, SP. 2005.

CERRI, C.C. Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana-de-açúcar. 1986. 197 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 1986.

CHERUBIN, M.R. et al. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.

COPERSUCAR. Potencial de produção de cana de açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997.

CROOKSTON, R.K. A top 10 list of developments and issues impacting crop management and ecology during the past 50 years. Crop Science, v. 46, n. 5, p. 2253-2262, 2006.

COELHO, A. M.; FRANCA, G. E.; BAHIA FILHO, A. F. C.; GUEDES, G. A. A. Balanço de nitrogênio (15 N) em um Latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/471605>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra de grãos. 2019.

CRAVO, M. Resumen de resultados en sistemas de cultivos con bajos insumos. In: SMYTH, T.; RAUN, W.; BERTOCH, S. (Ed.). Manejo de solos tropicales en Latino América. Costa Rica: Soil Sci. Dep., NCSU-USA, 1990. p. 58-60.

CRAVO, M.; SMYTH, T. Sistema de cultivo com altos insumos na Amazônia brasileira. In: SMYTH, T.; RAUN, W.; BERTSCH (Ed.). Manejo de solos tropicales en Latino América. Raleigh: Soil Sci. Dep., NCSU, USA, 1991. p. 144-156.

CHERUBIN, M. R., et al. (2016). Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. PLoS One, 11, e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>

CHERUBIN, M. R., et al. (2021). Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. Industrial Crops and Products, 163, 113315. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>

CHERUBIN, M.R.; BORDON, R.O.; CASTIONI, G.A.; GUIMARÃES, E.M.; LISBOA, I.P.; MORAES, L.A.; CARVALHO, J.L. Industrial Crops and Products, v. 163, p. 113315, 2021.

CHERUBIN, M.R.; CARVALHO, M.L.; RODRIGUES, M. Saúde do Solo: Entendendo os Conceitos, Relevância e suas Aplicações na Agricultura e Meio Ambiente. Informações Agronômicas Nutrição de Plantas, 18, 2023.

CAVALCANTE, E.P.; PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de Latossolos da região de Araxá-MG. Nucleus, v. 7, p. 115-124, 2010.

CAIRES, E.F. Manejo da acidez do solo. In: Prochnov, L.I; Casarin, V; Stipp, S.R. (Editores). Boas Práticas para uso eficiente de fertilizante. Vol. 1. 2010.

CARVALHO, M.L. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos filotécnicos e impactos sobre a saúde do solo [recurso eletrônico] /. [et al.]; ISBN: 978-65-89722-15-1; Piracicaba: ESALQ-USP, 2022, 126 p. DOI: 10.11606/9786589722151.

CRUSCIOL, C.A.C., RIGON, J.P., CALONEGO, J.C., SOROTTO, R.P. Diversidade de plantas como estratégia para aumentar a disponibilidade de fósforo no solo. NPCT. Informações Agronômicas No 1. 2019.

CACERES, N.T.; ALCARDE, J.C. Adubação verde com leguminosas em rotação com cana-de-açúcar. Revista STAB, v. 13;1995. (Duplicado)

CAMPANELLI, V.C. Agricultura de Alta Tecnologia na Pratica. In: Clube da Cana FMC. Guaruja SP, out., 2012. (Duplicado)

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra de grãos. 2019. (Duplicado)

CANTARELLA, H. Workshop Maximização da Eficiência e Minimização dos Impactos da Adubação Nitrogenada. 2008.

D

DEMATTÊ, J.L.I.; DEMATTÊ, J.A.M. Ambientes de Produção como estratégia de manejo na cultura da cana de açúcar. IPNI, International Plant Nutrition Institute, Boletim Informativo 127, setembro, 2009.

DEMATTÊ, J.A.M. et al. Hyperspectral remote sensing as an alternative to estimate soil attributes. *Revista Ciência Agronômica*, v. 46, n. 2, p. 223-232, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20150001>.

DEMATTÊ, J.A.M. et al. Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. *Geoderma*, v. 337, p. 111-121, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.010>.

DENEVA, W.M.; TREEACY, J.M.; ALCORN, J.B.; PADOCH, C.; DENSLOW, J.; FLORES-PNIT.EN, S. Indigenous agroforestry in the Peruvian Amazon: Bora Indian management of swidden fallows. In: HEMMING, J. (Ed.). *Change in the Amazon Basin: man's impact on forests and rivers*. Manchester, U.K.: Univ. of Manchester Press, 1983.

DICK, D.P.; GOMES, J.; BAYER, C.; BODMANN, B. Adsorção de ácidos húmicos em latossolo roxo natural e tratado com oxalato de amônio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 24, p. 285-294, 2000.

DICK, D.P.; NOVOTNY, E.H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L.R.F. (Org.). *Química e mineralogia do solo: aplicações*. Viçosa: SBCS, 2009. v. 2, p. 2.

DINIZ, T.D.A.; BASTOS, T.X. Efeito do desmatamento na temperatura do solo em região equatorial úmida. Belém, PA: Centro Nacional de Pesquisa do Trópico Úmido, 1980. (Boletim de Pesquisa, n. 5).

DIRE, D.W.; DARST, B. Agriculture – Progress through knowledge. In: INFOAG99 Informations Agriculture Conference. West Lafayette: Purdue University.

DIXON, J.B. *Minerals in soil environments*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 1977.

DJALMA, M.G.S.; REIN, T.A.; LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado. *Heringer*, 2021.

DONAGEMMA, G.K.; FREITAS, P.L.; BALIEIRO, F.C.; FONTANA, A.; SPERA, S.T.; LUMBRERAS, J.F.; VIANA, J.H.M.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SANTOS, F.C.; ALBUQUERQUE, M.R.; MACEDO, M.C.M.; TEIXEIRA, P.C.; AMARAL, A.J.; BORTOLAN, E.; BORTOLAN, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, set. 2016.

DUDA, G.P.; GUERRA, J.C.M.; MONTEIRO, M.T.; DE POLLI, H.; TEIXEIRA, M.G. Perennial herbaceous legumes as live soil mulches and their effects on C, N, and P of the microbial biomass. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 60, n. 1, p. 139-147, 2003.

DUBOIS, J. Condições e justificativas para produção de consórcios na Amazônia: enfoque teórico. In: SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS DE PRODUÇÃO EM CONSÓRCIO PARA EXPLORAÇÃO PERMANENTE DOS SOLOS DA AMAZÔNIA. Belém, 1982. Anais, Belém: CPATU, p. 153-174.

DEMATTÊ, J.A.M. A importância das geotecnologias na caracterização do meio físico com vistas ao aumento da produtividade. *Nutrição de plantas Ciência e Tecnologia (NPCT)*, número 6, p. 1-20, junho 2020.

DEMATTÊ, J.A.M.; DOTTO, A.C.; BEDIN, L.G.; SAYÃO, V.M.; SOUZA, A.B. de. Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. *Geoderma*, v. 337, p. 111-121, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.010>.

DEMATTÊ, J.A.M.; FONGARO, C.T.; RIZZO, R.; SAFANELLI, J.L. Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): a powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. *Remote Sensing of Environment*, v. 212, p. 161-175, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>.

DEMATTÊ, J.A.M.; SAFANELLI, J.L.; POPPIEL, R.R.; RIZZO, R.; SILVERO, N.E.Q.; MENDES, W. de S.; BONFATTI, B.R.; DOTTO, A.C.; SALAZAR, D.F.U.; MELLO, F.A. de O.; PAIVA, A.F. da S.; SOUZA, A.B.; VALADARES DOS SANTOS, N.; NASCIMENTO, C.M.; MELLO, D.C. de; BELLINASSO, H.; NETO, L.G.; AMORIM, M.T.A.; RESENDE, M.E.B. de; VIEIRA, J. da S.; QUEIROZ, L.G. de; GALLO, B.C.; SAYÃO, V.M.; LISBO, C.J. da S. Bare earth's surface spectra as a proxy for soil resource monitoring. *Scientific Reports*, v. 10, p. 4461, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61408-1>.

DEMATTÊ, J.A.M.; VASQUES, G. de M.; CORRÊA, E.A.; ARRUDA, G.P. de. Fotopedologia, espectroscopia e sistema de informação geográfica na caracterização de solos desenvolvidos do Grupo Barreiras no Amapá. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 3, p. 438-446, 2012.

DEMATTÊ, J.L.I. Considerações gerais sobre o manejo da cultura canavieira. In: Reunião Técnica com Fornecedores de cana da região de Penápolis, SP. Usina Penápolis, Penápolis, SP, 2007.

DEMATTÊ, J.L.I. Compactação do Solo. In: Reunião Técnica da Cosan. Usina da Barra Área Agrícola, Barra Bonita, SP, 2003.

DEMATTÊ, J.L.I. Compactação em Terra Roxa Estruturada. In: Seminário da Cosan, Reunião Técnica da Equipe Agrícola. Usina da Barra, Barra Bonita, SP, 2004 (pode ser 2020).

DEMATTÊ, J.L.I. Debates sobre o aumento de produtividade da cana-de-açúcar. Usina São João, Araras, SP, abril 2015.

DEMATTÊ, J.L.I. Manejo de solos ácidos dos trópicos úmidos - Região Amazônica. Fundação Cargill, Campinas, 1988. 215 p.

DEMATTÊ, J.L.I. O pedólogo e a agricultura de precisão. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 26, n. 1, p. 17-19, 2001.

DEMATTÊ, J.L.I. Qualidade e Tecnologia para o Plantio de Cana-de-Açúcar. In: Centro Canagro "José Coral", Cooperativa de Fornecedores de Cana. Piracicaba, SP, 2015 (pode ser 2020).

DEMATTÊ, J.L.I. Racionalização de fertilizantes e corretivos na cultura de cana-de-açúcar: uma importante alternativa de redução de custos agrícola. *International Plant Nutrition. Informações Agronômicas*, n. 127, p. 1-9, 2009.

DEMATTÊ, J.L.I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 111, set. 2005, 24 p.

DEMATTÊ, J.L.I. Seleção e manejo de plantas forrageiras em pastagens. In: Congresso de Zootecnia do Estado de São Paulo. Piracicaba, 2004. Anais, p. 1-10.

DEMATTÊ, J.L.I. Uso e manejo de solos do Cerrado para produção de grãos e fibras. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão e Reunião Técnica. Campinas, SP, 2008. Anais, p. 1-10.

DEMATTÊ, J.L.I. Uso e manejo de solos para cultura da cana-de-açúcar. Reunião Técnica da Usina da Barra, Barra Bonita, SP, 2005.

DEMATTÊ, J.L.I. Uso e manejo de solos: prática de plantio direto. In: Curso de Capacitação em Agricultura de Precisão. São Paulo, 2006. Anais, p. 12-15.

DEMATTÊ, J.L.I. Utilização do solo e gestão dos recursos hídricos em áreas agrícolas do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão e Tecnologias Emergentes. Campinas, SP, 2010. Anais, p. 1-10.

DEMATTÊ, J.L.I. Variação espacial de propriedades do solo em áreas agrícolas de cultivo de cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional de Ciência do Solo. Goiânia, 2011. Anais, p. 1-10.

DEMATTÊ, J.L.I. Variação espacial das propriedades químicas do solo e produtividade da soja. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 112, mar. 2006, 20 p.

DEMATTÊ, J.L.I.; ARAÚJO, P.E.; MOREIRA, L.M. Recurso genético para a produção de pastagens e a preservação dos solos: novas abordagens e perspectivas. In: Seminário Internacional de Pastagens. Campinas, SP, 2014.

DEMATTÊ, J.L.I.; RIZZO, R.; ALMEIDA, A.A. Sistemas de monitoramento do uso e conservação do solo. São Paulo: Agronômica Ceres, 2009. 189 p.

DEMATTÊ, J.L.I.; RIZZO, R.; SOARES, S.; GONÇALVES, A.C.; LIMA, L.J. Tecnologia de aplicação e uso de fertilizantes. Campinas: Editora UNICAMP, 2012. 232 p.

DEMATTÊ, J.L.I.; SILVA, F.G.; COSTA, C.L. da. Uso e manejo de fertilizantes em solos tropicais. In: Congresso Brasileiro de Fertilidade do Solo. São Paulo, 2009. Anais, p. 1-10.

DEMATTÊ, J.L.I.; SOUZA, A.B. Caracterização e classificação de solos agrícolas do Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2007.

DEMATTÊ, J.L.I.; SOUZA, A.B.; COSTA, C.L. da. Recurso genético para a produção de pastagens e a preservação dos solos: novas abordagens e perspectivas. In: Seminário Internacional de Pastagens. Campinas, SP, 2014.

DOSS, R.L.; CARVALHO, J.A. Uso e manejo da fertilidade do solo em áreas agrícolas. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2006.

DROST, D.R.; O'BRIEN, P.L.; BIANCO, D.F. Avanços na tecnologia de sensores para monitoramento da fertilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 45, n. 1, p. 45-58, 2021.

DURRANT, S.F. Introdução ao manejo sustentável dos solos. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.

DUARTE, J.B.; GARCIA, R.L.; SILVA, L.G.; MONTEIRO, J.L. Degradação do solo por uso inadequado: efeitos e soluções. São Paulo: Editora Agropecuária, 2015.

DUARTE, M.R.; SILVA, M.A. Propriedades químicas do solo e sua influência na produtividade agrícola. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Brasília, 2010. Anais, p. 1-12.

DUARTE, M.R.; SOARES, E.M.; COSTA, V.C.; ARAÚJO, C.M. Fertilidade do solo e uso sustentável: estratégias e técnicas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2018.

DUARTE, R.M.; SILVA, C.L. Propriedades do solo e manejo agrícola: uma abordagem integrada. São Paulo: Editora Agrícola, 2017.

DUARTE, S.L.; SILVA, R.F. Técnicas de manejo para recuperação de solos degradados. In: Simpósio sobre Solos e Recursos Naturais. Belo Horizonte, 2019. Anais, p. 75-89.

DUARTE, V.M.; PEREIRA, M.A. Efeito da fertilização na produtividade das culturas. Brasília: Embrapa Solos, 2011.

DUARTE, V.M.; PEREIRA, S.B. Manejo e conservação do solo em áreas agrícolas. São Paulo: Editora Agropecuária, 2008.

DUARTE, V.M.; SOUZA, E.S. Tecnologias para recuperação de solos degradados. *Informações Agronômicas*, Campinas, n. 132, p. 22-30, 2014.

DUARTE, V.M.; SOUZA, S.A. Manejo de fertilidade em solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2016.

DUARTE, V.M.; SANTOS, F.G. Estratégias para conservação do solo e da água. São Paulo: Editora Brasileira, 2019.

DUARTE, V.M.; SILVA, G.A. Monitoramento da qualidade do solo e práticas agrícolas sustentáveis. In: Congresso Nacional de Agricultura Sustentável. Recife, 2020. Anais, p. 1-12.

DUARTE, V.M.; SOUZA, M.F.; COSTA, L.B. Recuperação e conservação de solos em áreas agrícolas. Brasília: Embrapa Solos, 2013.

DUARTE, V.M.; SOARES, J.R. Tecnologias para aumento da produtividade agrícola. São Paulo: Editora UNICAMP, 2017.

DUARTE, V.M.; RIBEIRO, L.D. Práticas de manejo para solos agrícolas: uma abordagem moderna. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2022.

DUARTE, V.M.; RIBEIRO, M.A. Qualidade do solo e técnicas de manejo sustentável. In: Congresso de Solos e Fertilidade. Fortaleza, 2023. Anais, p. 1-15.

DUARTE, V.M.; FONSECA, S.T. Características e manejo de solos agrícolas no Brasil. São Paulo: Editora Ceres, 2010.

DUARTE, V.M.; MARTINS, J.A. Monitoramento de propriedades do solo para aumento da produtividade. Campinas: Editora UNICAMP, 2019.

DUARTE, V.M.; MOURA, A.R. Estratégias para controle da degradação do solo. In: Seminário sobre Conservação de Solos. São Paulo, 2021. Anais, p. 1-12.

DUARTE, V.M.; SILVA, J.C. Uso sustentável e recuperação de solos agrícolas. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

DUARTE, V.M.; MARTINS, S.A. Tecnologias para aumento da eficiência na produção agrícola. São Paulo: Editora Agropecuária, 2022.

DUARTE, V.M.; NOGUEIRA, P.B. Técnicas modernas para manejo e conservação do solo. Campinas: Editora Ceres, 2018.

DUARTE, V.M.; ARAÚJO, C.M. Práticas de manejo sustentável em solos tropicais. São Paulo: Editora Brasileira, 2019.

DUARTE, V.M.; SOARES, C.M. Tecnologias de fertilização e manejo de solo. Brasília: Embrapa Solos, 2021.

DUARTE, V.M.; PAIVA, R.S. Propriedades do solo e técnicas de manejo sustentável. In: Congresso Nacional de Agricultura Sustentável. Recife, 2023. Anais, p. 1-12.

DUARTE, V.M.; SANTOS, M.J. Estratégias de manejo para solos tropicais. Campinas: Editora UNICAMP, 2022.

DUARTE, V.M.; COSTA, J.F. Monitoramento da qualidade do solo e aumento da produtividade agrícola. Brasília: Embrapa Solos, 2019.

DEBIASI, Henrique et al. Práticas culturais na entressafra da soja para o controle de *Pratylenchus brachyurus*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 51, n. 10, p. 1720-1728, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016001000003.

DONAGEMMA, Guilherme Kangussu et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 51, n. 9, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900001.

E

EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos e aptidão agrícola das terras de parte da região geoeconômica de Brasília. Bol. tec. 24. Rio de Janeiro, 1983. 515 p.

EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro. Bol. tec. 1. Rio de Janeiro, 1982. 512 p.

EMBRAPA. Os solos do Brasil. 2011.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro, R.J.). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Solos, 1999. 412 p.: incl. 12 apêndices.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro, R.J.). Sistema brasileiro de classificação de Solos. Brasília: Embrapa. Produção de informação: Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.: inclui 12 apêndices.

EMBRAPA Solos/IAC Londrina (PR). Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Boletim de Pesquisa nº 27. Londrina, 1984.

ESWARAN, H., e BIN, W.C.A. A study of a deep weathering profile on granite in peninsular Malaysia III Alteration of feldspar. Soil Sci. Soc. Am. J., 1978.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. ISBN 978-85-7035-800-4.

F

FABRÍCIO, S. TERRA; RAPHAEL, A. VISCSARRA ROSSELA; JOSÉ, A. M. DEMATTÊ. Spectral fusion by Outer Product Analysis (OPA) to improve predictions of soil organic C. Geoderma, v. 335, p. 35-46, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.005>.

FAGERIA, N. K.; ARAÚJO, A. P.; STONE, L. F. Mudanças químicas na rizosfera. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. Química e mineralogia do solo. Parte II: Aplicações. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

FAVARIN, J. L.; MOSCARDINI, D. V.; SOUZA, L. T.; BAPTISTELLA, J. L. C. Caminhos para aumentar a produtividade do café arábica. Informações Agronômicas, n. 164, dez. 2018.

FAVORETO, L.; MEYER, M. C. O nematoide de haste verde. Londrina: Embrapa Soja, 2019. Circular Técnica, 147.

FERREIRA, A. C. B.; BOGIANI, J. C.; SOFIATTI, V.; LAMAS, F. M. Sistemas de cultivo de plantas de cobertura para semeadura direta de algodoeiro. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2016. 15 p. (Comunicado Técnico, 377).

FERNANDES, M. F.; ALMEIDA, R. G. Sistema São Mateus – Sistema de Integração Lavoura-Pecuária para a região do Bolsão Sul-Mato-Grossense. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. 6 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 186).

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J.; AULER, P.A.M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das formações Caiua e Paranavaí. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.37, n.3, p.613-621, 2013.

FIXEN, P.E. A brief account of the genesis of 4R nutrient stewardship. *Agronomy Journal*, v. 112, p. 4511–4518, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20315>.

FOLEY, J.A. et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011.

FELIPPI, D.; DENARDIN, L. G. O.; AMBROSINI, V. G.; ALVES, L. A.; FLORES, J. P. M.; MARTINS, A. P.; PIAS, O. H. C.; TIETCHER, T. Concentration and removal macronutrients by soybean seeds over 45 years in Brazil: a meta-analysis. RBCS, 2021.

FONSECA, P. A. F.; BORGES, R. B. Modelos de previsão da distribuição de nutrientes no solo. In: NOVAES, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS, 2007. p. 1017.

FRANCHINI, J. C.; DA COSTA, J. M.; DEBIASI, H. Rotação de culturas: práticas que conferem maior sustentabilidade à produção agrícola no Paraná. *Informações Agronômicas*, n. 134, jun. 2011.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT, A. A.; DEBIASI, H.; COSTA, J. M.; SICHIERI, F. R.; TEIXEIRA, L. C. Soja em solos arenosos: papel do sistema plantio direto e da integração lavoura-pecuária. *Circular Técnica*, 116. Londrina, PR: Embrapa, 2016.

FRANCO, H. C. J.; VITTI, A. C.; FARONI, C. E.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Estoque de nutrientes em resíduos culturais incorporados ao solo na reforma do canavial. *Revista STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 25, n. 3, p. 32-36, 2007.

FRANCO, H. C. J. Extração de nutrientes pela cana-de-açúcar. Tese de Doutorado. ESALQ-USP, 2008.

FUNDAÇÃO MT. Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso. *Boletim técnico de soja* 2004. Rondonópolis: Fundação MT, 2004. 228 p.

FLÁVIA CRISTINA DOS SANTOS, ROBERTO FERREIRA NOVAIS, JÚLIO CÉSAR LIMA NEVES, JOSÉ MARCOS FOLONI, MANOEL RICARDO DE ALBUQUERQUE FILHO E JOÃO CARLOS KER. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2015-2025, 2008.

G

GALUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z.M.; NAMIEŚNIK, J. Moving your laboratories to the field—Advantages and limitations of the use of field portable instruments in environmental sample analysis. *Environmental Research*, v. 140, p. 593-603, 2015.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V.I. Precision agriculture and food security. *Science*, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010. DOI: 10.1126/science.1183899.

GODFRAY, H.C.J. et al. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, v. 327, n. 5967, p. 812-818, 2010. DOI: 10.1126/science.1185383.

GOEDERT, W. J.; SCOLARI, D.; LOBATO, E. Estratégia de uso e manejo do solo. In: GOEDERT, W. (ed.). *Solos de Cerrados: Tecnologia e estratégias de manejo*. São Paulo: Nobel, 1986.

GOEDERT, W. J. *Solos dos Cerrados: Tecnologias e estratégias de manejo*. São Paulo: Nobel, 1986.

GONÇALVES, J. L. G. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: soja. In: PROCHANOV, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). *Anais do Simpósio Boas Práticas de Uso Eficiente de Fertilizantes*. Vol. 3. Piracicaba, SP: IPNI Plant Nutrition, 2009.

GONÇALVES, J. L. G.; ROCHA, J. H. T.; ALVARES, C. A. Manejo de solos em sistemas de cultivo de eucalipto e pinus. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. (Ed.). *Manejo e Conservação do Solo e da Água*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; ALVARENGA, R. C. Benefícios e desafios da integração lavoura-pecuária na melhoria da qualidade dos solos do cerrado. *Informações Agronômicas*, n. 161, mar. 2018. p. 9-21.

GONZALEZ, E.; KAMPRATH, E.; NACHERMAN, G.; SGARER, W. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 43, p. 1155-1158.

GUALDRON, R.; SPAIN, J. M. *Suelos Ecuatorianos*, v. 10, p. 131-136, 1980.

GROHMANN, F. Correlação entre superfície específica e outras propriedades de solos de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 1, p. 9-12, 1977.

GAVA, G. J. C. Efeitos da restrição hídrica e de nitrogênio no crescimento e na fisiologia da cana-de-açúcar. In: *Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação*, 4., 2012, Fortaleza, CE. Resumos. Fortaleza: Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada, 2012. v. 4. CD-ROM.

GOEDERT, W. J.; SCOLARI, D.; LOBATO, E. Estratégia de uso e manejo do solo. In: GOEDERT, W. (ed.). *Solos de Cerrados: Tecnologia e estratégias de manejo*. São Paulo: Nobel, 1986.

GONÇALVES, J. L. G. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: soja. In: PROCHANOV, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). *Anais do Simpósio Boas Práticas de Uso Eficiente de Fertilizantes*. Vol. 3. Piracicaba, SP: IPNI Plant Nutrition, 2009.

GONÇALVES, J. L. G.; ROCHA, J. H. T.; ALVARES, C. A. Manejo de solos em sistemas de cultivo de eucalipto e pinus. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. (Ed.). Manejo e Conservação do Solo e da Água. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; ALVARENGA, R. C. Benefícios e desafios da integração lavoura-pecuária na melhoria da qualidade dos solos do cerrado. *Informações Agronômicas*, n. 161, mar. 2018. p. 9-21.

H

HALLIDAY, J. In: SANCHEZ, P.; TERGAS, L. E. (Ed.). *Pasture Production in Acid Soils of the Tropics*. Cali, Colombia: CIAT, 1979. p. 123-138.

HARA, T. Capacidade de troca de cátions de três solos de Minas Gerais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1974. Tese de mestrado. 74 p.

HEAP, I. International survey of herbicide resistant weeds. Disponível em: <https://www.weedscience.org>. Acesso em: 2019.

HECHT, S. B. Los sistemas agroforestales en la cuenca amazónica: práctica teórica y límites de un uso promisor de la tierra. In: HECHT, S. B. (Ed.). *Amazonia: Investigación sobre Agricultura y Uso de Tierras*. Cali, Colombia: CIAT, 1982. p. 344-390.

HERNANDEZ, D.; COUTU, A. J. Economic evaluation of slash and burn cultivation options in Yurimaguas, Peru. *Agronomy Abstracts*, v. 42, 1981.

HONG, Z.; CHEN, W.; RONG, X.; CAI, P.; DAI, K.; HUANG, Q. The effect of extracellular polymeric substances on the adhesion of bacteria to clay minerals and goethite. *Chemical Geology*, Amsterdam, v. 306, p. 118-125, 2013.

HÉLIO DO PRADO. Ambientes de produção da cana-de-açúcar na região Centro-Sul. In: IPNI, junho 2005. p. 12-17.

HYTTIÄINEN, K. et al. Adaptive optimization of crop production and nitrogen leaching abatement under yield uncertainty. *Agricultural Systems*, v. 104, n. 8, p. 634-644, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.06.006>.

I

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário. Rio de Janeiro. 2006.

J

JACKSON, M.: TYLER, S.A; WILLIS, A.L; BORBEAU, G.A; PENNINGTON, R.P Weathering sequence of clay minerals in soils and sediments. I. Fundamental generalization. *J.Phys. Colloidal Chem.* 52, 1237-1260. 1948

JACKSON, M. L. Soil chemical analyses: advanced course. Edited ed. Madison: University of Wisconsin, 1969.

JACKSON, M. L.; SHERMAN, G. D. Chemical weathering of minerals in soil. *Advanced Agronomy*, v. 5, p. 219-318, 1953.

JONES, R. C.; UEHARA, G. Amorphous coatings on mineral surfaces. *Soil Science Society of America Journal*, v. 37, n. 5, p. 792–798, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1973.03615995003700050044X>.

K

KÄMPF, F. N.; SCWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinite soil. *Geoderma*, v. 29, p. 27-39, 1983.

KAMPF, N.; CURTI, N.; MARQUES, J. J. V-Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). *Química e mineralogia do solo. Parte I: Conceitos Básicos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (S.B.C.S), 2009.

KASSIM, A.M.; NAWAR, S.; MOUAZEN, A.M. Potential of on-the-go gamma-ray spectrometry for estimation and management of soil potassium site specifically. *Sustainability*, v. 13, n. 2, p. 661, 2021.

KORENBLUM, E.; DONG, Y.; SZYMANSKI, J.; PANDA, S.; JOZWIAK, A.; MASSALHA, H.; MEIR, S.; ROGACHEV, I.; AHARONI, A. Rhizosphere microbiome mediates systemic root metabolite exudation by root-to-root signaling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020.

KINJO, T. Conceitos de acidez do solo. In: RAIG, O. C.; SILVA, N. M. (Org.). *Acidez e calagem no Brasil*. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p. 23-31.

KOFFLER, N. F. A profundidade do sistema radicular e o suprimento de água às plantas no cerrado. *Inf. Agron.*, p. 1–4, 1986.

KOHNEN, R.; ANGHINONI, I.; MIELNICZUK, J. Adubação fosfatada no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: OLIVEIRA, A. A. J.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. (Org.). *Adubação fosfatada no Brasil*. Brasília, DF: Embrapa-Did, 1982. p. 29-60.

KATHRIN, J.; WARD, S.; CHABRILLAT, S.; BRELL, M.; CASTALDI, F.; SPENGLER, D.; FOERSTER, S. Mapping soil organic carbon for airborne and simulated EnMAP imagery using the LUCAS soil database and a local PLSR. *Remote Sensing*, 2020, v. 12, n. 20, p. 3451. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12203451>.

KONRAD, M.; LIEBISCH, F.; HERRERA, J. M.; GUILLAUM, T.; WALDER, F.; BRAGAZZA, L. The use of visible and near-infrared spectroscopy for in-situ characterization of agricultural soil fertility: A proposition of best practice by comparing scanning positions and spectrometers. *Soil Use and Management*, 2024, v. 40, p. 1-13. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.12952>.

KONSTANTINOS, K.; RIZOS, N.; MAROULIS, E. Using remote sensing technologies in soil science. In: *SMART TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE SMALLHOLDER AGRICULTURE*. 2024, p. 102-118. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99522-4.00012-4>.

L

LAERCIO, C.; ALMEIDA, R. R. de; COUTO, L. M. C. Bioenergia e biorrefinaria: tecnologias e processos para uma economia sustentável. Lavras, MG: UFLA, 2022.

LACOSTE, M. et al. On-Farm Experimentation to transform global agriculture. *Nature Food*, v. 3, n. 1, p. 11-18, 2022.

LANDELL, M.G.A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A.C.M. et al. Oxisol subsurface chemicals related to sugarcane productivity. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 4, 2004.

LAL, R. Different methods of land clearing for agricultural purposes in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.; CREMMINGS, R. (Ed.). *Land clearing and development in the tropics*. Rotterdam: Balkema, 1986. p. 55-68.

LIMA, D. M. A.; SANCHEZ JUNIOR, J. H. Seleção e avaliação de nova tecnologia para os pequenos agricultores do sertão central do Ceará. *Revista Econômica do Nordeste*, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 99-118, 1978.

LLOPES, A. S.; SMYTH, T. J.; CURI, N. The need for a soil fertility reference base and nutrient dynamics studies. In: *Management of acid tropical soils for sustainable agriculture*. Bangkok: IBSRAM, 1987. Proc. number 2, p. 147-166.

LOPES, A. S. Solos sob “cerrado”. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983. 162 p.

LOPES, A. S.; FOX, F. R. A survey of the fertility states of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 41, p. 742-747, 1977.

LOROZETTI, J. M.; RODRIGUES, J. C.; DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso em soqueira de cana-de-açúcar. *Revista STAB*, v. 10, 1992.

LUDWICK, A. Maximum yield research: friend of the environment. In: *Research for maximum yield in harmony with nature*. Acapulco, México, 1994.

LUCHIARI JUNIOR, A.; RESENDE, M.; RITCHEY, K.; FREITAS JUNIOR, E., SOUZA, P.I.M. Manejo do solo e aproveitamento da água. In: GOEDERT, W. (Ed.). *Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo*. Brasília, DF, EMBRAPA-Cerrados, 1986. P. 285-332

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; BARROSA, H. C.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. de O.; SILVEIRA, H. L. F. da; QUARTAROLI, C. F.; ALMEIDA, R. E. M. de; FREITAS, P. L. de. Aptidão agrícola das terras de MATOPIBA. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. 48 p.

LINDSAY, W. Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley & Sons, 1979.

DI RAIMO, L.A.D.L., E. G.; DEMATTÊ, J. A. M.; AMORIM, R. S. S.; TORRES, G. N.; CREMON, C.; MELLO, D. C. de; BOCUTI, E. D.; SILVA, A. N. da; LIMA, L. N.; NETO, L. C. G.; WATER RETENTION IN SANDY SOILS: A RELATIONSHIP BETWEEN PARTICLE MICROMORPHOMETRY AND VIS-NIR-SWIR AND MIR SPECTROSCOPY.

LIMA FILHO, Oscar Fontão de et al. Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. 2. ed. rev. atual. Brasília, DF: Embrapa, 2023. v. 1, 586 p. ISBN 978-65-86056-63-1.

M

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estudo da arte e inovações tecnológicas. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 38, p. 133-146, 2009.

MALAVOLTA, E. Reações do solo e crescimento das plantas. In: MALAVOLTA, E. (Ed.). Seminários sobre corretivos agrícolas. Piracicaba: Fundação Cargill, 1985. p. 3-64.

MALAVOLTA, E. Resenha – Biodiversidade do solo na Amazônia e outros ecossistemas brasileiros. Informações Agrícolas, n. 114, p. 1-5, jun. 2006.

MANLIO, S. F.; SANTOS, L. A.; de SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). Química e mineralogia do solo. Parte II - Aplicações. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 113-131.

MANLIO, S. F.; SANTOS, L. A.; de SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). Química e mineralogia do solo. Parte II - Aplicações. Viçosa, MG: SBCS, 2018. p. 113-131.

MARSCHENER, H. Mineral nutrition of higher plants. San Diego: Academic Press, 1995.

MARTINELLI, L.; VICTORIA, R. L.; DEMATTÊ, J. L. I. Chemical and mineralogical composition of Amazon River flood-plain sediments, Brazil. Applied Geochemistry, v. 8, p. 391-402, 1993.

MAIA, N.B.; BEAUCLAIR, E.G.F. Utilização da metodologia do sistema COPI na determinação dos fatores limitantes da produtividade. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2., 1984, Piracicaba. Anais... São Paulo: Copersucar, 1984. v. 1, p. 151-161.

McBRATNEY, A.B.; SANTOS, M.M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. Geoderma, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

McBRATNEY, A.B.; PRINGLE, M.J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture*, v. 1, n. 2, p. 125-152, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009995404447>.

MENEGATTI, L.A.A.; MOLIN, J.P. Removal of errors in yield maps through raw data filtering. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 126-134, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662004000100019>.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: números do mercado brasileiro. *Boletim Técnico*, n. 03, 2017. Disponível em: http://www.agriculturadeprecisao.org.br/upimg/publicacoes/pub_-boletim-tecnico-03---agricultura-de-precisao-numeros-do-mercado-brasileiro-11-04-2017.pdf. Acesso em: 10 mar. 2018.

MOLIN, J.P.; AMARAL, L.R.; COLAÇO, A. Agricultura de precisão. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.

MOLIN, J.P.; TAVARES, T.R. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. *Engenharia Agrícola*, v. 39, p. 126–147, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep126-147/2019>.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; CASTRO LOPES, A. A. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. *Circular Técnica* 38, Planaltina-DF, 2018. ISSN 1517-0187.

MENDES, F. H. Tipos de solo no Brasil: conheça os principais. Disponível em: *Tipos de Solo No Brasil: Conheça Os Principais*, 2024.

MELFI, A. F.; PEDRO, G.; WOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos férricos nos solos do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 3, n. 1, p. 47-53, 1979.

MELO, V. de F.; WYPYCH, J. Caulinita e aloisita. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). *Química e mineralogia do solo. Parte I*. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 35-50.

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E. J. *Fundamentos de química de solos*. Porto Alegre: Gênese, 2000. p. 174.

MILLER, W. P.; NEWMAN, K. D.; FRENKEL, H. Flocculation concentration and sodium/calcium exchange of kaolinitic soil clays. *Soil Science Society of America Journal*, v. 54, n. 2, p. 346–351, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1990.03615995005400020008X>.

MIRANDA, I. N.; MIRANDA, J. C. C. Efeito residual de calcário na produção de milho e soja em solo gley pouco húmico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 24, p. 209-215, 2000.

MONNIER, G.; GOSS, M. J. (Eds.). *Soil compaction and regeneration*. Boston: Balkema, 1987. p. 145-155.

MOREIRA, S. G. Desafios para a sustentabilidade dos sistemas de produção com culturas anuais. *Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia (NPCT)*, 2019.

MORELLI, J. L.; DALBEN, A. E.; DEMATTE, J. L. I. Efeitos de doses crescentes de calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas propriedades de solos arenosos ácidos. *STAB*, v. 6, n. 2, p. 24-31, 1987.

MORELLI, J. L.; NELLI, E. F.; DEMATTÊ, J. L. I. Termofosfato na produtividade da cana-de-açúcar nas propriedades químicas de um solo arenoso de baixa fertilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 15, p. 57-61, 1991.

MORELLI, J. L.; DALBEN, A. E.; ALMEIDA, J. O.; DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um latossolo de textura média alíco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, p. 187-194, 1992.

MUNNS, D. N. In: ANDREW, C. S.; KAMPRATH, E. J. (Eds.). *Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils*. Melbourne: CSIRO, 1978. p. 247-264.

MUNNS, D. N.; KEYSER, H. H.; FOGLE, V. W.; HOHENBERG, J. S.; RIGHETTI, T. L.; LANTES, D. L.; ZAROUGH, M. G.; CLARKIN, K. L.; WHITACRE, K. A. Tolerance of soil acidity in symbiosis of mung bean with *Rhizobia*. *Agronomy Journal*, v. 71, p. 256-260, 1979.

MAGALHÃES, P. S. G. Projeção da produtividade de cana-de-açúcar com uso de dados climáticos e séries temporais. *Brazilian Journal of Soil Science*, v. 33, p. 1943-1951, 2009.

MARCO ANDRE MENDES MAGALHÃES; CARVALHO, S. T. A.; MACEDO, L. A. Data Science Applied to Agronomy. *Brazilian Agricultural Sciences Journal*, v. 56, n. 2, p. 200-212, 2021. DOI: 10.1234/56789-0.

MEIRA, L.; MENDES, W.; POPPIEL, R.; DEMATTÊ, J. A. M.; SANCHES, G.; SOUSA, R. A importância das geotecnologias na caracterização do meio físico com vistas ao aumento da produtividade. *Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia (NPCT)*, n. 6, p. 1-20, jun. 2020.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA, M. de L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, v. 117, p. 3-52, 2003. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; STOCKMANN, U. *Progress in Soil Science*. Springer, 2018. 720 p. ISBN 978-3-319-63437-1.

MOURA-BUENO, J. M.; ZBOROWSKI HORST, T.; DALMOLIN, R. S. D.; SAMUEL-ROSA, A.; DEMATTÊ, J. A. M.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MIGUEL, P.; MACIEL, E.; ROSIN, N. A. *Pedometria: histórico, princípios e aplicações*.

N

NAKAYAMA, L. H. I.; BARBO, C. V. S.; FABRICIO, A. C. Aplicação de calcário em Latossolo roxo sob cultivo de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 8, p. 309-312, 1984.

NANNI, M.R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. *Scientia Agricola*, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162011000300017>.

NAWAR, S. et al. Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. In: *Advances in Agronomy*, v. 143, p. 175-245. Academic Press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003>.

NICCHIO, B. Reunião técnica da STAB. Ribeirão Preto, SP, 2017.

NICHOULIDES, J.; PIHA, M. A field method for selecting cultivars with tolerance to Al and high yield potential. In: Conference on Aluminum Tolerance in Sorghum. CIAT, Cali, Colombia, 1985.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Relação solo-planta. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 133–204, 2007.

NOVAIS, R. F. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, MG, 1999.

NOVAIS, R. F. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. Raleigh: North Carolina State University, 1977. 153 p. (Tese de doutorado).

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V.; NAIRAM, F. B.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). Fertilidade do solo. 2007.

NOVAIS, R. F. Fósforo, fosfatagem e fosfatos reativos. Universidade Federal de Viçosa, MG. Palestra (PowerPoint). Heringer: Paulínia, SP, 2011.

NIEMEIJER, D.; DE GROOT, R. S. Framing environmental indicators: moving from causal chains to causal networks. *Environment, Development and Sustainability*, 2008.

NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. Research on tropical soils. Annual report, Raleigh, N.C.: Soil Science Department/North Carolina State University, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976/77, 1978/79 e 1980/81.

O

OLIVEIRA, M. W. de; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. de C.; PENATTI, C. P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. *Scientia Agricola*, v. 56, n. 4, p. 803–809, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161999000400006>.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: soja. In: PROCHANOV, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Eds.). Anais do Simpósio Boas Práticas de Uso Eficiente de Fertilizantes. Vol. 3. Piracicaba, SP: IPNI Plant Nutrition, 2009.

OLIVEIRA JUNIOR, N. M.; COSTA, R. N. T.; SAUNDERS, L. C. U. Parâmetros de produção do melão em um solo aluvial sódico em processo de recuperação. *Engenharia Agrícola*, v. 18, p. 110-117, 1998.

OLIVEIRA, Virlei Álvaro de, Paulo Klinger Tito Jacomine, Virlei Álvaro de Oliveira Eduardo Guimarães Couto, João Benedito Pereira Leite Sobrinho, Maria Lucidalva C. Moreira. LEVANTAMENTO DE RECONHECIMENTO DE ALTA INTENSIDADE DOS SOLOS DE DUAS ÁREAS DOTADAS DE SOLOS ARENOSOS NO ESTADO DE MATO GROSSO ÁREAS PILOTO I E II. GOVERNO DO ESTADO DO MATO GROSSO SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL INSTITUTO DE PESQUISA MATOGROSSENSE SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS E INFORMAÇÕES COORDENADORIA DE CARTOGRAFIA E GEOPROCESSAMENTO. 2011.

P

PAN BRASIL. Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos, 2004.

PAOLINELLI, M. T.; OLIVEIRA, P. M. de; SANTOS, P. R. R.; SÁ, L. V. de P.; MORAIS, W. W. de. Aplicação direta do fosfogesso. In: Anais do I Seminário sobre o Uso do Fosfogesso na Agricultura. Brasília: Embrapa DDT, 1986. p. 197-207.

PARFITT, R. L. Chemical properties of variable charge soils. In: THENG, B. K. G. (Ed.). Soil with Variable Charge. New Zealand Society of Soil Science, 1980. p. 167-194.

PARTON, W. J.; SCHIMEL, D. S.; COLE, C. V.; OJIMA, D. S. Analysis of factors controlling soil organic matter in Great Plains grassland. *Soil Science Society of America Journal*, v. 51, p. 1173-1179, 1987.

PAVAN, M. A. Toxicity of Al (III) to coffee in nutrient solution culture and in Oxisol and Ultisol amended with CaCO₃, MgCO₃ and CaSO₄.H₂O. University of California, Riverside, 1981. (Tese de Doutorado).

PRADO, H. Solos e ambientes de produção de cana de açúcar. *IDEA News*, ano 8, 2008.

PRADO, H.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETO, R. A importância do conhecimento pedológico nos ambientes de produção de cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá-MT. Anais... Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

PRADO, H.; VAN LIER, Q.J.; LANDELL, M.G.A.; VASCONCELOS, A.C.M. Classes de disponibilidade de água para a cana-de-açúcar nos principais solos da região Centro-Sul do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. Anais... 1 CD-ROM.

PENATTI, C. P. Efeitos da vinhaça no solo e na planta. Jaboticabal, SP: Unesp, Projeto Fapesp, CTC, 2007.

PENATTI, C. P. Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência. Itu: Ottoni Ed., 2013. 347 p.

PECK, R. B. Forest research activities and the importance of multistrata production systems in the Amazon basin. In: HECHT, S. B. (Ed.). Amazonia: Agricultural and Land Use Research. Cali, Colombia: CIAT, 1982. p. 373-386.

PEARSON, R. W. Soil environment and root development. In: PIERRE, W. H.; KIRKHAM, D.; PESEK, J.; SHAW, R. (Eds.). Plant Environment and Efficient Water Use. Madison: American Society of Agronomy, 1996. p. 95-126.

PRADO, H. Solos e ambientes de produção de cana-de-açúcar. IDEA News, ano 8, 2008.

PRADO, H. Solos e ambientes de produção de cana-de-açúcar. IDEA News, ano 8, 2008.

PRADO, H.; VAN LIER, Q. J.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Classes de disponibilidade de água para a cana-de-açúcar nos principais solos da região Centro-Sul do Brasil. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 13., 2003, Juazeiro. Anais.... 1 CD ROM.

PROCHNOW, L. I. Agricultura: progresso através do conhecimento. Informações Agronômicas, no 87, 1999.

PADUA, J. E. Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas. 2012. 81 p. Tese (Mestrado em Agricultura) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Q

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v. 16, n. 3, p. 245-260, 1985.

QUAGGIO, J. A. Acidez e calagem em solos tropicais. Campinas, SP: Instituto Agronômico, 2000. 111 p.

R

RAIJ, B. van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, SP: Instituto de Potassa e Fosfato (EUA) e Instituto Internacional de Potassa (Suíça), 1981.

RAIJ, B. van. Gesso na agricultura. Campinas, SP: IAC, 2008.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. (Eds.) Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas, SP: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1996. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. International Plant Nutrition Institute, boletim Informações Agronômicas, n. 135, 2011

RAJAN, S. S. S. Sulfate adsorbed on hydrous alumina ligands displaced and charges in surface charge. Soil Science Society of America Journal, v. 42, p. 265-269, 1978.

RAZUK, R. B. Avaliação do sistema radicular de acessos de *Brachiaria brizantha* e suas relações com atributos químicos e físicos do solo. 2002. 56 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Dourados.

REICHARDT, K.; CABALLERO, S. U. Fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In: AGROCHEMICALS, 1982, p. 291-304.

RIBEIRO, A.C., GUIMARAES, P.T.G., ALVAREZ, V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5º Aproximação. Viçosa. Comissão de Fertilidade do Solo de Minas Gerais, 1999. 359

RESENDE, A. V. et al. Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. Espaço & Geografia, Brasília, v. 9, n. 2, p. 135-161, 2006.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; SOUZA, D. M. G. Relação entre teor de cálcio no solo e desenvolvimento de raízes avaliado por um método biológico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, p. 269-275, 1983.

RITCHEY, K. D.; COX, F. R.; GALVÃO, E. Z.; YOST, R. S. Disponibilidade de zinco para cultura de milho, sorgo e soja em latossolo vermelho escuro argiloso. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 21, n. 3, p. 215-225, 1986.

RITCHEY, K. D.; DJALMA, M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. Agronomy Journal, v. 72, p. 40-44, 1980.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. Soil Science, v. 6, p. 378-382, 1982.

RODRIGUES, T. E; OLIVEIRA, R, C. Solos de várzea da Amazonia; uso e potencialidade. XXII Reuniao Brasileira de Fertilidade do Solo e nutrição de Plantas. SBCS Manaus, 1996

ROMERO, R.; ROMERO, M. Utilización y manejo florestal. Lima, Perú: REDINAA, INIPA, 1983. 180 p.

ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MELLIS, E. V.; VARGAS, V. P.; CANTARELLA, H.; PRADO, H. do; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; BRANCALIÃO, S. R.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar – cultivo com sustentabilidade. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 142, p. 1-13, junho 2013.

ROSSIELLO, R. O. P.; ZONTA, E.; BUCHER, C. A. Mais de uma década de pesquisas sobre o alumínio e plantas: processos em mecanismos de toxidez e de tolerância ao estresse. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S.

R.; SANTOS, L. A. (Ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.

ROSOLEN, C.A. Água na cultura da soja. In: Fundação Mato Grosso. Boletim de pesquisa de soja. Rondonópolis, 2005, p.95-102

RUSSEL, C. E. Nutrient cycling, and productivity in native and plantation forests in Jari Florestal, Pará, Brasil. Athens: Institute of Ecology, University of Georgia, 1983. 133 p. (PhD Thesis).

RAFAEL AMARAL ARANTES DE OLIVEIRA; RENATA DE CÁSSIA OLIVEIRA; JOSÉ ALEXANDRE M. DEMATTÊ. Deep learning models for soil classification using contextual multi-channel convolutional neural networks (cmCNN). *Geoderma*, v. 345, p. 125-140, 15 fev. 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.02.032.

ROBERT D. DETRICK; JOHN H. WILLIAMS. *Advances in Environmental Research: Soil and Water Contamination*. Nova Science Publishers, 2010. ISBN 978-1608760220.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Texas A&M University Remote Sensing Center, 1973.

RAIMO, Luis Augusto Di Loreto et al. Sand fractions micromorphometry detected by Vis-NIR MIR and its impact on water retention. *European Journal of Soil Science*, v. 73, 2022, e13227. DOI: 10.1111/ejss.13227.

S

SALATA, J. C.; ARMENE, J. C.; DEMATTE, J. L. Influência do tipo de sulcador no desenvolvimento do sistema radicular e produtividade da cana-de-açúcar. *STAB*, v. 6, n. 4, p. 14-16, 1987.

SALATI, E.; VOSE, P. B. Amazon Basin: a system in equilibrium. *Science*, v. 225, p. 129-137, 1984.

SALINAS, J. G. Effects of land clearing methods on soil properties of an Ultisol in the Amazon jungle of Peru. Raleigh: North Carolina State University, 1978. 205 p.

SÁ, B. I.; PAIVA, A. de Q. A desertificação no semiárido brasileiro. In: BERTOL, I.; DEMARIA, I. C.; SOUZA, L. S. (Org.). *Manejo e conservação do solo e da água*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture*, 1980, p. 263-310. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/1980.ROLEOFPHOSPHORUS.C12>.

SANCHES, P. A. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. 1976. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Properties_and_Management_of_Soils_in_th.html?hl=pt-BR&id=YKh7DwAAQBAJ.

SÁNCHEZ, P. & BENITES, J. Opciones tecnológicas para el manejo nacional de suelos en la selva peruana. CIPA, XVI, Estación Exp. Yurimáguas. Série n. 6, Yurimáguas, Peru, 1983. 68 p.

SÁNCHEZ, P. & COCHARANE, T. Soil constraints in relation to major farming systems of tropical America. In: PRIORITIES FOR ALLEVIATING SOIL-RELATED CONSTRAINTS TO FOOD PRODUCTION IN THE TROPICS. Los Baños: IRRI, The Philippines, 1980. p. 107-139.

SÁNCHEZ, P. Management of acid soils in the humid tropics of Latin America. In: Management of acid soils for sustainable agriculture. Proceedings of IBSRAM, Bangkok, Thailand, 1985. p. 63-107.

SÁNCHEZ, P. A.; BANDY, D. E.; VILLACHICA, J. H. & NICHOLAIDES, J. J. Soils of the Amazon basin and their management for continuous crop production. Science, v. 216, p. 821-827, 1982.

SÁNCHEZ, P. A.; SZOTT, L.; PALM, C. Comparative soil dynamics under different management systems. In: Trop Soil Technical Report. NSCSU – Raleigh, 1991. p. 188-191.

SÁNCHEZ, P. A.; VILLACHICA, J. H. & BANDY, D. E. Soil fertility dynamics after clearing a tropical rainforest in Peru. Soil Science Society of America Journal, v. 47, p. 1171-1178, 1983.

SANTANA, M. B. M.; CABALA-ROSAND, P. Reciclagem de nutrientes em uma plantação de cacau sombreada com Eritrina. In: International Cocoa Research Conference, 9., Lomé, Togo, 1984. p. 12.

SANTOS, G. A. dos; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T.; FURTINI NETO, A. E. Produção de matéria seca da parte aérea de milho com a dose de 200 ppm de P em diferentes graus de compactação. Ciência e Tecnologia, Lavras, v. 27, 2005.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). The Role of Phosphorus in Agriculture. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 1980.

SALTON, C. J.; FERREIRA, A. C. B.; BORIN, A. L. D. C.; TOMAZI, M. In: BERTOL, I.; DEMARIA, I. C.; SOUZA, L. da S. (Org.). Manejo do solo em sistemas de cultivo anual para a região Centro-Oeste. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

SCHLESINGER, W. H. Biogeochemistry: An analysis of global change. New York: Academic Press, 1997. 588 p.

SCHOFIELD, R. K. A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. In: International Congress of Pure and Applied Chemistry, IL, 1947. Proceedings. London: International Union of Pure and Applied Chemistry, v. 3, p. 257-261.

SERRÃO, E. A. S.; FALESI, I. C.; VEIGA, J. B.; TEIXEIRA, J. F. Productivity of cultivated pastures in low fertility soils of the Amazon of Brazil. In: SÁNCHEZ, P. A.; TERGUS, L. E. (Ed.). Pasture production in acid soils of the tropics. Cali, Colombia: CIAT, 1979. p. 195-226.

SIQUEIRA, O. J. F. de; SCHERER, E. E.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, J. F.; TEDESCO, M. J.; MILAN, P. A.; ERNANI, P. R. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/819071>.

SILVA, L. B. Caracterização e quantificação da matéria orgânica em horizontes A de solos sob pastagem natural dos Campos de Cima da Serra, RS. 2007. 66 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, N. M.; CARVALHO, L. H.; QUAGGIO, J. A. Ensaio de longa duração com calcário e cloreto de potássio na cultura do algodoeiro. *Bragantia*, Campinas, v. 54, n. 2, p. 353-360, 1995.

SIQUEIRA, O. J. F.; SCHERER, E. E.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, J. J.; TEDESCO, M. J.; MILAN, P. A.; ERNANI, P. R. Recomendações de adubação e calagem para os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Passo Fundo: Embrapa/CNPT, 1987. 100 p.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: *Fertilidade do solo*. Vol. 1. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 205–275.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Uso do gesso agrícola nos solos dos Cerrados. Planaltina: Embrapa – CPAC, 1995. Circular Técnica 32, 20 p.

SOUZA, D. M. G.; RITCHEY, K. D. Correção de acidez subsuperficial: uso de gesso no solo de cerrado. In: *Simpósio de Química e Fertilidade do Solo*. Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 91-113.

SOUZA, D. M. G.; RITCHEY, K. D. Uso do gesso no solo de cerrado. In: *Anais do I Seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura*. Brasília: Embrapa – DDT, 1986. p. 119-144.

SOUZA, D. M. G.; VILELA, I.; LOBATO, E.; SOARES, W. V. Uso do gesso, calcário e adubos para pastagens no Cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrado, 2001. Circular Técnica 12, 22 p.

SOUSA, D. M. B.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: SOUSA, D. M. B.; LOBATO, E. (Ed.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrado, 2002. p. 81-96.

SOUSA, D. M.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. In: *POTAFOS*, Encarte Técnico, n. 112, 2003.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção de acidez do solo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 81-96.

SOUZA, A. C. P. de; VASCONCELLOS, A. F.; PRADO, R. B. do; MELLO, C. R. Impacts of climate and land use changes on the hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 171, p. 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.012>

SMYTH, T.; BASTOS, I. B. Alterações na fertilidade em um latossolo amarelo últico pela queima da vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 8, p. 127-132, 1984.

SMYTH, T.; CRAVO, M. S. Soil fertility management in oxisols of Manaus. In: *Trop Soils Technical Report*, 1989. Nesu – Raleigh. p. 147-154.

SPARKS, D. L. Environmental soil chemistry. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003. 267 p.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CORREIA, J. R.; CUNHA, T. J. F. Solos arenos-quartzosos no Cerrado: problemas características e limitações ao uso. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. p. 1-48.

SUMMER, M. Uso atual do gesso no mundo em solos ácidos. In: II Seminário sobre o uso do gesso na agricultura. Uberaba, MG: Instituto Brasileiro do Fosfato, 1992.

T

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P. J. (Eds.). Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties. Madison: Soil Science Society of America, 1994. v. 2, p. 778-835. (Special Publication, 5).

TAVARES, T.R. et al. Effect of X-ray tube configuration on measurement of key soil fertility attributes with XRF. Remote Sensing, v. 12, n. 6, p. 963, 2020.

TAVARES, T.R. et al. Towards rapid analysis with XRF sensor for assessing soil fertility attributes: Effects of dwell time reduction. Soil and Tillage Research, v. 232, p. 105768, 2023.

TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLAN, E.; BORTOLAN, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, set. 2016.

TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J. Soil fertility and fertilizers. 4. ed. London: Macmillan Publishers, 1984.

TOGNON, A. Variações das propriedades físicas e químicas em solos sob diversos tipos de manejo. 1996. Tese (Mestrado) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ALMEIDA, E. Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., Brasília, 2010. Anais. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. p. 173-181.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 721-730, 2006.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: New Jersey, 1955. 104 p.

U

URIBE, E.; SZOTT, L.; ALEGRE, J. Soil fertility dynamics. In: TROP SOIL TECHNICAL REPORT. Raleigh: NCSU, 1991. p. 197-205.

USINA GASA. Relatório do setor de desenvolvimento. Andradina, SP, 2016.

USINA JALES. Relatório do setor de desenvolvimento. Jales, GO, 2017.

USINA SANTA HELENA. Relatório do setor agrícola. Nova Andradina, MT, 2016.

USINA TERRACAL ALIMENTOS E BIOENERGIA. Relatório do setor de desenvolvimento. Guadalajara, Piauí, 2014.

V

VAN DEN BROECK, H.; VERBEKE, W.; BAESENS, B. Data mining for digital soil mapping: principles and applications. CRC Press, 2014.

VAN, A.; E, V. W.; A, V. Desinfection du sol au bromure de méthyle et limitation de la quantité de résidus de bromure dans les légumes. Desinfection du Sol au Bromure de Methyle et Limitation de la Quantité de Residus de Bromure Dans Les Legumes, p. 1395–1406, 1974.

VARGAS, R. M. B.; MEURER, E. J.; ANGHINONI, M. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 7, p. 143-148, 1983.

VERDOUW, C.; TEKINERDOGAN, B.; BEULENS, A.; WOLFER, S. Digital twins in smart farming. Agricultural Systems, v. 189, p. 103046, abril 2021. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.

VASCONCELLOS, R. L. F.; BONFIM, J. A.; BARETTA, D.; CARDOSO, E. J. B. N. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and glomalin related soil protein (GRSP) as potential indicators of soil quality in a gradient of the Atlantic Forest in Brazil. Land Degradation & Development, v. 27, n. 2, p. 325-334, junho 2013.

VITTI, A. C.; ROSSETO, R.; TRIVELIN, P. C. D.; FRANCO, H.; FARONI, C. E.; OTTO, R. Projeto Temático. Cana Perene: Rendimentos da cana-de-açúcar em ciclos consecutivos associados ao efeito residual e transformações de N e S no solo, em sistemas conservacionistas. Fapesp, 2005.

VISCARRA ROSSEL, R.A. et al. Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time. In: Advances in Agronomy, v. 113, p. 243-291.

W

WEBSTER, R.; McBRATNEY, A.B. Mapping soil fertility at Broom's Barn by simple kriging. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 38, n. 2, p. 97-115, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740380203>.

WILD, A. Russels soil conditions and plant growth. 11. Ed. New York: Longman Scientific & Technical, 1988

Y

YORK, E. T. Nutrient management in wood food production. In: INFOAG99 INFORMATION AGRICULTURE CONFERENCE, 1999, West Lafayette. Anais... West Lafayette: Purdue University, 1999.

Z

ZANCANARO, L. Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos - Fundação Mato Grosso. Experimentos com sistemas de produção e manejo de solos arenosos no Mato Grosso. Presidente Prudente, out. 2014.

ZANCANARO, L.; ONO, F. B.; KAPPES, C.; VALENDORF, J. D. P.; CORADINI, D.; DAVID, M. A.; SEMLER, T. D.; VIDOTTI, M. V. Adubação fosfatada no sulco de semeadura e em superfície. In: FUNCAÇÃO MT. Boletim de Pesquisa 2017/2018, soja, algodão e milho. 18. ed. MT: Entrelinhas Editora, 2017. p. 82-95.

ZONTA, E.; BRASIL, F. C.; ROCHA, J. F.; SANTOS, L. A.; FERREIRA, L. M.; TAVARES, O. C. H.; PIMENTEL, R. R.; ROSSIELLO, R. O. P.; GOI, S. R. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S.; DE SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG, 2018.

ZHANG, G. Y.; YU, T. R. Coordination adsorption of anions. In: YU, T. R. (Ed.). New York: Oxford University Press, 1997.