



**Universidade Federal de São Carlos**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**Curso de Engenharia Agrônoma**



**DENISE CAMPOS CARDOSO**

**USO DE ÍNDICES QUANTITATIVO E QUALITATIVO COMO  
MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO SOLO CULTIVADO  
COM CANA-DE-AÇÚCAR.**

**ARARAS - 2022**



**Universidade Federal de São Carlos**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**Curso de Engenharia Agrônoma**



**DENISE CAMPOS CARDOSO**

**USO DE ÍNDICES QUANTITATIVO E QUALITATIVO COMO  
MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO SOLO CULTIVADO  
COM CANA-DE-AÇÚCAR.**

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Agrônoma – CCA – UFSCar para  
a obtenção do título de Engenheira Agrônoma

Orientadora: Profa. Dra. Anna Hoffmann Oliveira

**ARARAS – 2022**

**Dedico esse trabalho aos meus pais, Sueli e Luiz, pelo apoio e amor incondicional.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas graças recebidas e por me guiar nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus pais, Sueli e Luiz e ao meu irmão, Arthur, por sempre acreditarem em mim e por todo incentivo, suporte, amor e cuidado que sempre me dedicaram.

Agradeço minha segunda família e amadas irmãs da República Gaia, pelo companheirismo, apoio, incentivo e por todos os momentos vividos e compartilhados. Vocês foram fundamentais na minha trajetória acadêmica e pessoal e estarão sempre em meu coração.

Agradeço à Universidade Federal de São Carlos, seu corpo docente, e demais funcionários, que me forneceram toda estrutura e conhecimento para que eu conseguisse chegar até aqui.

Agradeço em especial a minha orientadora Profa. Dra. Anna Hoffmann Oliveira, por aceitar me orientar, pela disposição, paciência, tempo e, principalmente, por todo conhecimento a mim transmitido.

Agradeço a Profa. Dra Adriana Cavaliere Sais, aos funcionários da prefeitura do *campus*, e aos técnicos do Laboratório de Fertilidade do Solo pelos materiais e informações fornecidas para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcio Roberto Soares e Prof. Dr. Douglas Roberto Bizari, por aceitarem fazer parte da banca examinadora do meu TFG.

Por Fim, agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização do presente trabalho.

**“O que vale na vida não é o ponto de partida  
e sim a caminhada. Caminhando e  
semeando, no fim terás o que colher.”**

**Cora Coralina**

## RESUMO

A transformação de sistemas naturais em sistemas agrícolas tende a causar prejuízos à qualidade do solo devido às formas de manejo empregadas para o cultivo, ocasionando assim a degradação do solo e perda do potencial produtivo fornecido pelo mesmo, o que acarreta em perdas de produtividade da cultura. Estratégias para monitorar a qualidade do solo e mitigar a degradação causada pelos sistemas de manejo são importantes. Para tanto, os índices de qualidade de solo são ferramentas que auxiliam na tomada de decisões. Pensando nisso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do solo cultivado com cana-de-açúcar no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (CCA – UFSCar) através de dois índices de qualidade do solo (IQS) quantitativo e visual, os quais foram baseados em dados físicos, químicos e morfológicos obtidos para cada quadra do *campus*. Para a avaliação foram considerados diferentes usos do solo (MATA, Área de proteção ambiental (APA) e cana de açúcar (CA)) e classes do solo (Latossolo Vermelho, Nitossolo Vermelho e Argissolo Vermelho). O IQS Quantitativo foi obtido com base nos seguintes indicadores: matéria orgânica, textura, CTC, condutividade hidráulica, fósforo, potássio, saturação por alumínio e pH, enquanto para o IQS Visual foram considerados os indicadores: cor, estrutura, consistência, presença de raiz e canais biológicos. Ambos os índices buscaram refletir a capacidade do solo em fornecer melhores condições para o crescimento de plantas. Foram então atribuídos pesos e notas para cada indicador de acordo com o potencial de crescimento vegetal. Por fim, as notas dos indicadores foram aplicadas a uma equação que fornece o índice final. A partir da classificação obtida em cada índice foi possível constatar que o uso do solo mata obteve a melhor nota para os dois índices avaliados, sendo esse o único ponto de correlação entre os mesmos, visto que cada índice teve um ranqueamento diferente dos usos do solo. A classe do solo também não foi um fator determinante para o desempenho do solo, pois solos de uma mesma classe não tiveram índices com valores aproximados. Para áreas de IQS que apresentam limitações, práticas conservacionistas como plantio em nível, adubação verde e plantio direto são recomendadas a fim de garantir maior conservação do solo e da água.

**Palavras-chave:** índice de qualidade do solo, avaliação visual do solo, avaliação quantitativa do solo, indicadores.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Quadras numeradas e respectivas áreas (ha) do CCA - UFSCar .... 29
- Figura 2.** Imagens de satélite para o CCA – UFSCar ao longo dos anos. .... 32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Quadras e respectivas classes de solo do CCA – UFSCar.....	30
<b>Tabela 2.</b> Denominações de uso do solo adotadas para os conjuntos de quadras do CCA – UFSCar.....	32
<b>Tabela 3</b> – Indicadores de qualidade do solo e seus pesos correspondentes às categorias para avaliação de IQS.....	33
<b>Tabela 4.</b> - Atributos físicos dos solos do CCA-UFSCar.....	34
<b>Tabela 5.</b> Atributos químicos dos solos do CCA-UFSCar.....	35
<b>Tabela 6</b> - Resultados quantitativos dos indicadores da APA aplicados aos pesos e notas conforme tabela 3.....	37
<b>Tabela 7.</b> Classificação do IQS Visual.....	38
<b>Tabela 8.</b> Classificação de tamanho das formas do solo.....	40
<b>Tabela 9.</b> Pontuação para estrutura do solo.....	40
<b>Tabela 10.</b> Pontuação para consistência do solo.....	41
<b>Tabela 11.</b> Resultados visuais dos indicadores da APA aplicados aos pesos e notas conforme tabela 13.....	42
<b>Tabela 12.</b> IQS Quantitativo dos diferentes usos do solo encontrados do <i>campus</i> do CCA – UFSCar.....	43
<b>Tabela 13.</b> IQS Visual dos diferentes usos dos solos encontrados do <i>campus</i> do CCA – UFSCar .....	47



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>14</b>
2.1. O solo e a cultura da cana-de-açúcar.....	14
2.2. Qualidade do solo .....	15
2.3. Indicadores de qualidade do solo.....	16
2.4. Índice de qualidade do solo.....	23
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
4.1. Área de estudo .....	28
4.2. Índices de qualidade do solo (IQS) .....	30
4.3. Método 1 – IQS Quantitativo .....	33
4.4. Método 2 – IQS Visual.....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
5.1. Método 1 – IQS Quantitativo .....	44
5.2. Método 2 – IQS Visual.....	48
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm crescido a preocupação com os efeitos das mudanças no uso da terra sobre os ecossistemas, especialmente em florestas tropicais, principalmente no que se refere à perda da biodiversidade de fauna e flora, e alterações no armazenamento de carbono do solo (PARRON, 2004). A substituição de ecossistemas naturais por culturas agrícolas e o emprego de sistemas de manejo para o cultivo provocam alterações no equilíbrio e nos atributos do solo e, muitas vezes propiciam sua degradação e perda do potencial produtivo desse solo (RODRIGUES, 2019). Para Carneiro (2009), as diversas interações entre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo controlam os processos e os aspectos relacionados a sua alteração. Assim, as variações desses atributos, em consequência do manejo e uso do solo, devem ser avaliadas tendo em vista a sustentabilidade do sistema.

A capacidade de funcionamento do solo, dentro de ecossistemas naturais ou manejados, sustentando a produtividade biológica, mantendo ou aumentando a qualidade ambiental e a promoção da saúde das plantas, animais e dos homens, é o que define a qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994). A avaliação dessa qualidade por meio de atributos do solo é complexa devido às variadas definições de um solo com qualidade para determinado uso, à multiplicidade de inter-relações entre fatores físicos, químicos e biológicos que controlam os processos e aos aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço (MELLONI et al., 2008).

Entre os diversos manejos que podem ser empregados em áreas cultivadas, as práticas que prezam pela manutenção da matéria orgânica (MO) do solo têm sido amplamente utilizadas, visto que essa influencia de forma benéfica diversos processos que ocorrem no mesmo. Por outro lado, o preparo do solo com práticas de mecanização intensivas ainda são muito adotadas e atuam nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo afetando, por exemplo, a matéria orgânica do solo, que anteriormente contida no interior dos agregados, com o revolvimento do solo passa a ser exposta e tem sua oxidação e redução do seu conteúdo favorecida (OLIVEIRA, 2016).

No caso da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), por exemplo, com a proibição da prática da queima dos canaviais, a colheita mecanizada passou a ser amplamente utilizada. No curto prazo, a queima tende a aumentar a disponibilidade de nutrientes

devido à mineralização da matéria orgânica, além de ser uma prática agrícola pouco onerosa para plantio e preparo do solo. Contudo, as temperaturas elevadas causam redução da matéria orgânica, da atividade e diversidade dos microrganismos importantes para a manutenção do solo, resultando no empobrecimento do mesmo em médio prazo (BORGHI et al., 2018). Além de afetar processos físicos, químicos e biológicos do solo de maneira direta, a prática das queimadas polui e deteriora a qualidade do ar e colabora com o aumento do efeito estufa (CAPECHE, 2012). O aumento da mecanização no manejo da colheita da cana, por outro lado, também deve ser visto com atenção. Esta prática aumenta o risco de compactação e degradação da estrutura do solo, devido à maior intensidade de tráfego com máquinas pesadas, prejudicando a qualidade do solo, refletindo no crescimento e desenvolvimento radicular da cultura e conseqüentemente reduzindo sua produtividade e, ou, encurtando o seu ciclo produtivo.

A cana-de-açúcar é uma gramínea originária do continente asiático e introduzida no Brasil pelos portugueses no ano de 1502, tornando-se rapidamente fonte de riquezas para o país. Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com 665.105 mil toneladas em uma área de 8.605 mil hectares para a safra 2020/21 (CONAB, 2020). Desse total, mais da metade é oriunda do Estado de São Paulo, que tem destaque na produção canavieira do país desde a década de 1950, sendo atualmente um dos principais setores da economia do estado (CAMARA; CALDARELLI, 2016).

No estado de São Paulo a ampliação dos canaviais vem ocorrendo em áreas impróprias aos cultivos anuais. Algumas regiões apresentam um aumento dos processos erosivos decorrentes da inexistência de um planejamento no uso da terra (CORRÊA et al., 2016). Um estudo realizado na cidade de Araras estimou uma taxa de perda de solo de 3,9562 e 14,8818 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> com o cultivo da cana-de-açúcar com corte mecanizado e queimada, respectivamente (TÔSTO et al., 2010)

No contexto brasileiro, as práticas de manejo adequadas aos diferentes usos e condições edafoclimáticas são pouco estudadas nas pesquisas sobre qualidade do solo (NICOLODI, 2019). O cultivo da cana-de-açúcar é altamente relevante no país e apresenta grande diversidade de produtos e subprodutos, como açúcar, etanol, energia, caldo de cana, cachaça, vinhaça, torta de filtro, bagaço, entre outros (MATOS; MARAFON, 2018). Sendo assim, a avaliação e o monitoramento da qualidade do solo, tendo em vista a mitigação da degradação do solo, são estratégias

essenciais na definição de sistemas de manejo ambiental, social e economicamente sustentáveis (CAVALIERI et al., 2011).

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. O solo e a cultura da cana-de-açúcar

Para a agricultura o solo tem a função de proporcionar condições para o crescimento das culturas, fornecendo às plantas suporte físico, nutrientes e água. Sendo assim, é importante conhecer as características intrínsecas de cada solo, pois os fatores edáficos serão relevantes para determinar os usos e o potencial produtivo da área (MAULE et al., 2001).

Para a cultura da cana-de-açúcar, o solo é um fator determinante no que diz respeito à produtividade da cultura, pois um bom desenvolvimento radicular oferece maior área a ser explorada, com aumento da capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, da longevidade e produtividade do cultivo. Portanto, é necessário o conhecimento dos fatores limitantes para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, bem como das opções de manejo que permitam mitigar ou eliminar tais fatores (DEMATTE, 2004).

A densidade do solo é um dos principais atributos que interferem no desenvolvimento do sistema radicular da planta. O tráfego de máquinas, veículos e implementos que é rotineiro nas áreas de plantio de cana-de-açúcar pode provocar um aumento da densidade do solo que, simultaneamente, reduz a macroporosidade, aeração, condutividade hidráulica e provoca aumento da resistência à penetração (VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

Para o desenvolvimento da cultura, a disponibilidade de água é imprescindível. O sistema radicular é o responsável pela captação da água que será aproveitada por toda a planta (VASCONCELOS; GARCIA, 2005). Assim, a profundidade é importante, sendo considerados ideais solos com profundidade maior que um metro, a fim de que as raízes possam explorar um maior volume. O solo deve apresentar boa capacidade de infiltração para que a planta absorva a água necessária e o excesso seja drenado (EMBRAPA, 2021).

Em relação ao potencial hidrogeniônico (pH), a cana-de-açúcar é bem tolerante e se desenvolve em solos que apresentam entre 4 e 8,5, sendo o ideal o pH aproximadamente 6,5 (EMBRAPA, 2021). Por se tratar de uma cultura semiperene, com ciclo superior a cinco anos, o sistema radicular se desenvolve em profundidade,

tendo assim uma relação com o pH, saturação por bases, teor de alumínio e cálcio (Ca), também nas camadas mais profundas do solo.

Em se tratando de aspectos nutricionais, absorção do sistema radicular e tolerância a elementos tóxicos, a variedade cultivada será um fator preponderante para o desenvolvimento da cultura. O teor de alumínio reduz o crescimento das raízes, variando com as espécies, cultivares e com o solo, principalmente quanto ao seu teor de cálcio, pois em solos deficientes deste nutriente as raízes tem seu crescimento comprometido. A toxicidade por alumínio provoca a fixação de fósforo em formas menos disponíveis, diminuindo a taxa de respiração, interferindo em reações enzimáticas e modificando a dinâmica de absorção e transporte de nutrientes, principalmente cálcio, magnésio e fósforo (VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

O sistema radicular da cana-de-açúcar é dividido em “raízes dos toletes” e “raízes dos perfilhos”. As raízes dos toletes são as primeiras a se desenvolverem e nascem a partir primórdios radiculares, sendo que sua função é promover o crescimento inicial das plantas. Já as raízes dos perfilhos começam seu desenvolvimento juntamente com a formação dos perfilhos, essas raízes são responsáveis pelo fornecimento de água e de nutrientes para as plantas. As raízes dos perfilhos podem atingir até 4,0 m de profundidade, mas são as raízes localizadas até 0,75 m de profundidade as responsáveis por fornecer água e nutrientes para a planta. Na fase de grande crescimento vegetativo da cultura, cerca de 50% do sistema radicular está localizado na camada de 0,2 m de profundidade, e 80% até a profundidade de 0,6 m (BARBOSA, 2016).

## **2.2. Qualidade do solo**

O solo é um recurso essencial para os ecossistemas e a vida humana, exercendo papel significativo na purificação da água, regulação da emissão dos gases do efeito estufa, para a produção de alimentos, combustíveis e fibras. A gestão sustentável dos solos é imprescindível para a preservação dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade, o que assegura à sociedade a segurança alimentar e o desenvolvimento agrícola, gerando benefícios socioeconômicos aos grandes e pequenos produtores rurais que dependem diretamente da conservação do solo (FAO, 2019).

Estudos recentemente divulgados apontam uma degradação moderada a forte em aproximadamente 33% dos solos do planeta, com perda anual de 75.000 milhões de toneladas devido, entre outros, às práticas de gestão não sustentáveis. As práticas de gestão sustentáveis dos solos são fundamentais para a adaptação às alterações climáticas e mitigação dos seus efeitos, ao combate à desertificação e promoção da biodiversidade, contribuindo para a redução da degradação causada pelas atividades antrópicas (FAO, 2019).

Devido à evidente degradação dos recursos naturais e respectivas preocupações com a sustentabilidade agrícola e com a conservação do solo, os estudos sobre a qualidade do solo começaram a ser discutidos nas décadas de 1980 e 1990 (NICOLODI, 2019). Foi publicado o relatório “Soil and water quality – an agenda for agriculture” (HATFIELD, 1995), que compreendia a qualidade do solo em virtude do seu papel em ecossistemas naturais e agroecossistemas, pois historicamente a qualidade deste recurso natural sempre esteve atrelada à sua produtividade. Desde então, o seu conceito é desenvolvido e sua aplicação no uso da terra tem tido diversas abordagens entre os cientistas (ARAÚJO et al., 2012).

Originalmente desenvolvido em países industrializados de clima temperado, o conceito de qualidade do solo continua a ser discutido internacionalmente sem, contudo, ter uma abordagem aprofundada no Brasil (NICOLODI, 2019). Atualmente, a maioria dos conceitos convergem para a qualidade do solo como a capacidade deste em funcionar dentro dos limites do ecossistema e interagir positivamente com o meio externo. Para a Sociedade Americana de Ciência do Solo (SSSA), a qualidade do solo se expressa na capacidade do mesmo funcionar, dentro de um sistema natural ou manejado, de forma a manter a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e suportar a saúde humana e habitacional (ARAÚJO et al., 2012). Já o termo “qualidades do solo” refere-se aos atributos inerentes do solo que são deduzidos das características do solo ou observações indiretas (por exemplo, compactabilidade, erodibilidade e fertilidade)” (SSSA, 2008).

### **2.3. Indicadores de qualidade do solo**

O uso de indicadores de qualidade do solo para a avaliação da sustentabilidade ambiental é de extrema relevância, embora seja complexo, devido à vasta quantidade de definições de um solo com qualidade para determinado uso, à multiplicidade de

inter-relações entre fatores físicos, químicos e biológicos que controlam os processos e aos aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço. Existe, atualmente, um esforço multidisciplinar em desenvolver métodos para a avaliação da qualidade do solo e do ambiente de influência humana, tentando traduzir os atributos relacionados à sustentabilidade, na forma de indicadores de qualidade do solo (MELLONI et al., 2008).

Normalmente a qualidade do solo é determinada por um conjunto de atributos físicos, químicos e biológicos que são representativos das características do solo, influenciando em suas várias funções. Para que seja possível indicar alterações na qualidade do solo por meio desses atributos, eles devem ser bem correlacionados com o processo dentro do ecossistema; sua aplicação deve ser fácil em condições de campo, com avaliação tanto de especialistas quanto do produtor; apresentar sensibilidade às variações de manejo e clima sem serem influenciados por alterações acidentais; e ser componente de uma base de dados (FREITAS et al., 2013). Para haver a quantificação dos aspectos da qualidade solo é preciso uma relação entre todos os seus atributos, sendo que um indicador isolado não é capaz de representar a qualidade do solo (FREITAS et al., 2013).

Entre os diversos atributos responsáveis pela qualidade do solo, as características físicas se destacam, já que estão envolvidas no suporte ao crescimento radicular; armazenamento e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividades biológicas. Textura, densidade do solo, resistência à penetração, porosidade, capacidade de retenção d'água, condutividade hidráulica e estabilidade de agregados são os principais indicadores físicos utilizados atualmente (ARAÚJO et al., 2012).

A textura do solo refere-se à distribuição das partículas em termos de tamanho. A escala de tamanho pode variar significativamente, desde cascalhos com diâmetro da ordem de centímetros, até partículas diminutas, como os coloides, cuja visualização não é possível a olho nu. O tamanho das partículas é de grande importância, pois ele determina a superfície que estas partículas expõem, sendo fator determinante para as propriedades de retenção de água e nutrientes (BRADY & WEILL, 2002). As partículas areia, silte e argila apresentam, respectivamente, diâmetros entre 2 e 0,02 mm; 0,02 e 0,002 mm; e inferiores que 0,002 mm. Os solos são classificados de acordo com a proporção destas três frações, sendo que o teor de argila em boa parte é responsável pela distribuição do diâmetro dos poros do solo,

determinando então a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção (REICHARDT, 1987).

A agregação das partículas primárias (areia, silte e argila) juntamente com os componentes minerais e orgânicos (calcário, sais, matéria orgânica, etc.) forma a estrutura do solo (CAPECHE, 2008). Segundo Bezerra et al. (2014) a estrutura do solo é dada pela disposição geométrica das partículas primárias e secundárias; as primárias são isoladas e as secundárias são conjuntos de partículas primárias reunidas por meio de agentes cimentantes, o que dá origem a agregados, que quando associados formam micro e macroagregados. Ferro, sílica e matéria orgânica são os principais agentes cimentantes. A textura e a estrutura do solo influenciam na quantidade de ar e de água disponíveis para as plantas. Conforme destaca Nicolodi (2019), a estrutura é o mais promissor dos indicadores físicos utilizados nas análises de qualidade do solo.

A estrutura pode ser classificada de acordo com sua forma, grau de desenvolvimento e tamanho. Sua forma se subdivide em: laminar, prismática, blocos e granular. A estrutura laminar é arranjada de forma que as dimensões horizontais são maiores que as verticais, dando uma aparência de lâminas. Ocorre com mais frequência em horizontes superficiais, podendo ser encontrada também em Argissolos e Planossolos, nos horizontes A, E ou C. A estrutura prismática está organizada de modo que sua dimensão vertical é maior que a horizontal, sendo mais comum em Nitossolos e Luvisolos. A estrutura em blocos possui igualdade em sua altura, largura e espessura, sendo comum em Argissolos, Nitossolos e Chernossolos. E por fim, a estrutura granular, onde as dimensões são aproximadamente iguais e com superfície arredondada, encontradas comumente em Latossolos (CAPECHE, 2008).

O tamanho da estrutura pode variar de 1 mm a vários centímetros, sendo classificado em muito pequeno, pequeno, médio, grande e muito grande. O mesmo é influenciado pelos tipos de minerais existente no solo, presença de sais, matéria orgânica, atividade biológica, textura, etc (SANTOS et al., 2005). O grau de desenvolvimento da estrutura diz respeito à coesão entre os agregados, ou seja, a força com que as partículas minerais e orgânicas estão unidas, podendo ser dividida em: sem estrutura (grão simples ou maciça); com estrutura (grau de desenvolvimento fraco, moderado ou forte) (CAPECHE, 2008).

A estabilidade dos agregados sofre variações de acordo com as características próprias de cada solo e com os sistemas de manejo adotados. O uso intenso de

implementos agrícolas no preparo do solo causa a ruptura do agregado, reduzindo de forma drástica a sua estabilidade. Devido a essa quebra dos agregados, a matéria orgânica presente em seu interior fica desprotegida, acelerando seu processo de decomposição, reduzindo a resistência do agregado e a qualidade do solo (FREITAS et al., 2013).

Considera-se um solo bem estruturado aquele que possibilita uma boa e rápida infiltração da água, evitando o acúmulo superficial e conseqüentemente o escoamento e a erosão do solo. Possibilita também o alcance da água no interior do solo, armazenando profundamente e disponibilizando para as raízes em situações de estiagem. Proporciona ainda um maior espaço poroso para as trocas gasosas do sistema radicular. Há a presença de poros grandes que garantem boa aeração, permitindo a atividade biológica de organismos, bem como favorecendo o crescimento do sistema radicular das plantas (CAPECHE, 2008).

A porosidade corresponde à fração volumétrica do solo ocupada com ar e/ou água, admitindo-se que os microporos sejam um reservatório de água e os macroporos sejam responsáveis pela infiltração de água no solo. A classificação entre micro e macroporo se dá de acordo o tamanho do diâmetro dos poros, os microporos tem diâmetro menor que 0,05 mm, já os macroporos tem diâmetro maior que 0,05 mm (USDA, 1972). Com o a compactação do solo, a macroporosidade tende a ser reduzida, o que restringe a infiltração de água, elevando os riscos de erosão (FREITAS et al., 2013).

A condutividade hidráulica de um solo é determinada pela capacidade em transmitir água, dependendo da geometria dos poros e das propriedades do fluido. A condutividade hidráulica é afetada pela densidade e viscosidade do fluido e características do solo como porosidade total, distribuição dos espaços porosos e a geometria desses poros (ARAÚJO et al., 2012). Quando o solo é saturado o valor máximo de condutividade hidráulica é atingido, denominando-se de condutividade hidráulica saturada (MESQUITA; MORAES, 2004). Segundo Bernardes (2005), manejos culturais que causam modificações na porosidade devido a pressões exercidas no solo, afetam negativamente a condutividade hidráulica, tanto na superfície quanto em maiores profundidades do solo.

A consistência de um solo é o fenômeno de forças físicas de coesão entre as partículas e a adesão das partículas com outros materiais, tudo isso variando conforme o grau de umidade em que o solo se encontra. Para uma descrição completa

da consistência do solo é preciso submeter a amostra a três estados de umidade padronizados: seco, úmido e molhado. A consistência do solo quando seco, é caracterizada pela pressão investida na massa do solo e sua dificuldade em se quebrar entre o polegar e o indicador. A consistência do solo quando úmido é caracterizada pela friabilidade, avaliando sua consistência ao tentar esboroar um torrão entre os dedos. A caracterização da consistência do solo quando molhado é dada pela plasticidade e pegajosidade. Na plasticidade é observada a capacidade do solo em mudar continuamente de forma em razão de uma força aplicada, e de manter a forma imprimida, quando essa força é suspensa. A pegajosidade é a propriedade do solo em aderir-se a outros objetos (SANTOS et al., 2005)

Segundo Vasconcelos et al (2010), quando seco, quanto mais dura a consistência de um solo mais difícil será a penetração de raízes, o preparo do solo pelo produtor é dificultado, pois caso venha a ser mobilizado há formação de grandes torrões, exigindo um maior número de operações. No estado de solo úmido a melhor situação encontrada é de solo friável, pois a resistência ao destorroamento é baixa, a capacidade de suporte de carga e resistência a compressão é alta, resultando em um mínimo esforço de operação do trator e melhor execução do serviço (CRUZ et al., 2011). Quando molhado, um solo plástico indica a incapacidade de o solo recuperar sua forma original uma vez que a ação de força é cessada, podendo causar a compactação do solo. Quando pegajoso o solo é muito aderente, dificultando o manejo do solo (VASCONCELOS et al., 2010).

A cor do solo é por vezes uma das características que mais chama atenção na análise do solo. Devido às diversas tonalidades do solo, muitas vezes é possível delimitar os horizontes de um perfil, bem como observar algumas condições de extrema importância como a drenagem, matéria orgânica, forma e conteúdo de ferro, fixação de fósforo e fertilidade em geral (RESENDE et al, 2002). Essa afirmação não se dá apenas na evidência de ser um atributo de fácil percepção, mas na constatação que a cor pode ser correlacionada com várias das características químicas, mineralógicas, físicas, permitindo tomar conclusões a respeito da natureza típica do solo e as condições químicas que os constituintes estão ou estiveram submetidos (EMBRAPA, 2008).

Horizontes de cor escura, normalmente indicam altos teores de húmus. Cores de solos vermelha e amarela comumente estão relacionadas com solos bem drenados e com altos teores de óxido de ferro, hematita no caso do vermelho e goethita no caso

do amarelo. Solos de coloração acinzentada são indicativos que os óxidos de ferro foram transformados, tendo sido o ferro removido em condições de oxi-redução, como geralmente acontece nos solos encontrados próximos a cursos d'água (LEPSCH, 2011). A nomenclatura das cores é dada através das chamadas tabelas de cores, sendo que a mais utilizada é a "Munsell Soil Color Charts". A cor do solo é determinada comparando a amostra em estudo com as cores presentes na carta de Munsell, considerando a combinação entre matiz, valor e croma. O matiz representa principalmente as proporções do amarelo e do vermelho, o valor indica as proporções de cinza (preto e branco) e o croma a pureza da cor, considerando amarelo, vermelho, preto e branco (PRADO, 2016).

O teor de matéria orgânica do solo (MOS) é um atributo que afeta simultaneamente as condições físicas e químicas do solo. A MOS é formada por plantas e animais que sofreram processos de decomposição por meio de ações de microrganismos, sendo que a vegetação é responsável pela maior parte de sua composição. A MOS atua no aumento da capacidade de troca catiônica do solo (CTC), o que favorece a disponibilidade de nutrientes às plantas, além de proporcionar um ambiente favorável à atividade da microbiota. Em solos estabelecidos em locais de vegetação natural, o teor de matéria orgânica apresenta um estágio de equilíbrio entre as adições de matéria orgânica decorrentes do sistema biológico ali atuante e as perdas por decomposição (ROSA, 2010).

Os atributos químicos indicadores da qualidade do solo fazem parte das avaliações de rotina da fertilidade. A capacidade do solo em reter íons que apresentem carga elétrica positiva (cátions) em condição permutável ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$ ) é chamada de capacidade de troca catiônica (CTC) (TEIXEIRA et al., 2017). A troca desses cátions em solo depende da existência de materiais ou substâncias que possuam cargas negativas nas superfícies das partículas. A matéria orgânica e os minerais de argila são os principais materiais que possuem propriedades de troca de cátions em solos tropicais. Em comparação com a fração mineral do solo, a CTC da matéria orgânica tem magnitude muito maior em solos tropicais, portanto, a presença de MOS é importante para uma CTC elevada, já que o principal mineral de argila presente nesses solos é a caulinita que possui baixa CTC (RAIJ, 2011).

A matéria orgânica do solo tem grande importância como fonte de nutrientes para os vegetais, estabilidade estrutural, retenção de água, fonte de energia para organismos heterotróficos, entre outros, sendo ela composta por cerca de 90% de

carbono (RESENDE; ROSOLEN, 2013). Assim, o carbono orgânico é um bom parâmetro para avaliar a qualidade do solo pois, em ambientes tropicais, se mostrando um componente essencial para o potencial produtivo.

Em solos tropicais, a acidez é um dos principais fatores limitantes da produção agrícola. Esse cenário é prejudicial às culturas, afetando diretamente o desenvolvimento das raízes, principalmente devido à toxidez por Al e deficiência de Ca (CAIRES, 2004). Dessa forma, o aumento do pH para disponibilidade adequada de nutrientes é necessária para ganhos de produção. Para essa correção é feita a calagem, que tem como principais efeitos a neutralização do Al e Mn, e mostra-se relevante também para o fornecimento de Ca e Mg como nutrientes (RAIJ, 2011).

A saturação por alumínio (m%) é medida referência para a ocorrência de alumínio a níveis tóxicos para as plantas. Em solos tropicais, devido às intensas chuvas e altas temperaturas, há uma rápida intemperização da rocha, tornando o solo muito intemperizado. O intenso intemperismo acarreta na rápida remoção de bases e silício dos minerais com acúmulo residual de óxidos de ferro e alumínio, a liberação de íons  $Al^{3+}$  é ampliada e conseqüentemente aumenta o valor de m% (RONQUIM, 2010).

Os nutrientes minerais essenciais às plantas, em geral absorvidos da solução do solo, são divididos em macronutrientes primários (nitrogênio, fósforo e potássio), macronutrientes secundários (cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel e zinco) (RAIJ, 2011).

Nas condições tropicais de elevado intemperismo, os minerais primários são decompostos e o solo torna-se rico em minerais secundários menos solúveis, como óxidos de ferro e de alumínio e argilominerais 1:1. Solos extremamente intemperizados como sob vegetação de cerrado apresentam deficiência nas formas disponíveis de macronutrientes e alguns micronutrientes, como cobre, zinco e boro (LEPSCH, 2011).

O nitrogênio é o nutriente em maior quantidade exigido pelas culturas. Sua presença se dá predominantemente de formas orgânicas no solo, em diversos compostos orgânicos existentes em plantas e em micro-organismos do solo. O húmus contém proteínas, aminoácidos livres, aminoaçúcares, e outros compostos nitrogenados não identificados (RAIJ, 2011).

O fósforo é um macronutriente de alta interação com o solo, fazendo com que as regiões tropicais apresentem deficiência desse elemento devido ao intemperismo

sofrido ao longo do tempo. No solo, a matéria orgânica cumpre um papel importante em relação ao fósforo, podendo ser fonte de 20% a 80% do total desse elemento (BATISTA et al., 2018). O potássio é o segundo macronutriente de maior teor nas plantas. O potássio é absorvido através da solução do solo pelas plantas na forma iônica  $K^+$ . (RAIJ, 2011).

O cálcio e o magnésio são elementos que ocorrem na forma catiônica  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em solos e minerais. Em solos tropicais o cálcio se perde por lixiviação e o que permanece no solo fica adsorvido aos coloides ou aprisionado na biomassa. O magnésio faz parte da estrutura dos minerais: ilita, vermiculita e montmorilonita. Quanto mais intemperizado o solo, menor a ocorrência desses minerais até que somente permaneça magnésio trocável adsorvido aos coloides do solo ou retido na vegetação (RAIJ, 2011).

#### **2.4. Índice de qualidade do solo**

A avaliação da qualidade do solo não é simples, por isso definir um índice representativo é de extrema relevância. Através dos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo é possível estabelecer índices confiáveis que se relacionem diretamente aos elementos do solo e suas variações na forma de manejo (MONTEIRO; PONCIANO, 2012).

O índice de qualidade do solo deve ser adequado para cada local, pois deve estar em consonância ao tipo e uso do solo, seus fatores de formação e funções exigidas do mesmo. Como exemplo podemos tomar a infiltração de água no solo, que não seria um indicador adequado para áreas de várzeas (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Portanto, o emprego dos atributos do solo dependerá da função para qual o índice de qualidade do solo está sendo gerado (KARLEN et al., 1997).

O índice de qualidade do solo é uma ferramenta que agrupa informações de fatores diversos do solo, de modo a quantificar a sua qualidade de uma forma mais simplificada. Esse índice pode ser obtido empregando um modelo ou expressão matemática que inclua os atributos considerados pelo levantamento de solos. Com base nesse índice é possível fazer o monitoramento do estado do solo, identificando as práticas de manejo mais adequadas, e buscar alternativas técnicas para mitigar ou até mesmo solucionar impactos identificados por meio dos atributos que pesam de forma negativa no índice de qualidade (CHAER, 2001).

Segundo Alvarenga et al. (2012), o método proposto por Karlen e Stott (1994) é um dos mais utilizados para determinação do índice de qualidade do solo. Esse método consiste em aplicar uma estrutura de cálculo em que as funções avaliadas como principais (acomodar a entrada de água; facilidade de transferência e absorção de água; resistência à degradação e sustentar o crescimento de plantas) são ponderadas conforme seu grau de importância para a determinação do índice. Chaer (2001) foi um dos pesquisadores a utilizar o método proposto por Karlen e Stott (1994), porém algumas adaptações foram feitas em seu estudo para que fosse quantificado o efeito de diferentes manejos na cultura do eucalipto sobre a qualidade do solo. A avaliação se fez por meio da determinação de indicadores químicos, físicos e biológicos associados às principais funções do solo relacionadas à sustentabilidade da atividade florestal (receber, armazenar e suprir água; armazenar, suprir e ciclar nutrientes; promover o crescimento das raízes; promover a conservação do solo).

Freitas et al. (2012) desenvolveu um trabalho estabelecendo índices de qualidade do solo como base na avaliação integrada de atributos físicos e químicos do solo aplicados para diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo. Os atributos considerados foram: densidade do solo; porosidade total; macro e microporosidade; condutividade hidráulica saturada; diâmetro médio geométrico dos agregados; resistência do solo à penetração; matéria orgânica do solo; soma de bases; saturação por alumínio; pH; cálcio trocável; magnésio trocável; capacidade de troca catiônica efetiva; potássio disponível; fósforo disponível; carbono orgânico total e estoque de carbono. Nesse estudo, a avaliação da qualidade do solo foi realizada com base no desenvolvimento de dois índices, um seguindo o modelo proposto para a determinação do índice de deterioração do solo (ISLAM; WEIL, 2000) e o outro conforme modelo proposto por Karlen e Stott (1994). Na referida pesquisa foi constatado que esses índices são ferramentas úteis que podem ser usadas como base para a tomada de decisão sobre o sistema de manejo em questão, uma vez que eles refletem a qualidade dos atributos dos solos estudados.

Nos Estados Unidos pesquisadores desenvolveram o método Soil Management Assessment Framework (SMAF), com objetivo de avaliar os impactos do uso da terra e práticas de manejo na qualidade do solo, aplicando o método em solos norte-americanos. O SMAF é um método quantitativo que utiliza a seleção de indicadores químicos, físicos e biológicos para compor a avaliação da qualidade do solo. O SMAF tem sido utilizado para avaliação de diversas situações e fatores que

incidem tanto na agricultura como em sistemas naturais. Nos Estados Unidos é amplamente empregado e também já foi testado em países como a África do Sul, Etiópia e Nepal. No Brasil o SMAF foi aplicado no ano de 2015 nas maiores regiões produtoras de cana-de-açúcar, com intuito de avaliar os efeitos da sequência de mudança de uso da terra associado à expansão da cana-de-açúcar (CHERUBIN et al., 2016). Para tanto, 3 locais foram selecionados para coletas de amostras representando três usos de terra: vegetação nativa, pastagem e cana-de-açúcar, de forma a representar a sequência de mudança de uso da terra mais comum no centro-sul do Brasil. Oito indicadores foram utilizados e empregados em curvas desenvolvidas pelo método SMAF e integrados em um IQS. O estudo demonstrou que o SMAF também é uma ferramenta eficiente para avaliação em solos tropicais. Foi constatado que solos sob vegetação nativa tinham potencial maior que solos de cana-de-açúcar que por sua vez tinha potencial maior que solos de pastagem. O potencial considerado por esse método está relacionado a metas de produtividade e proteção do meio ambiente (CHERUBIN et al., 2016).

Wang e Gong (1998) desenvolveram um índice de qualidade do solo quantitativo no qual foram selecionados 12 indicadores para aplicar o método: profundidade do solo, textura, inclinação do terreno, matéria orgânica, N total, N disponível, P total, P disponível, K total, K disponível, capacidade de troca catiônica e pH. Esses indicadores foram adotados tendo em vista refletir aspectos da qualidade do solo em relação ao crescimento das plantas. Os indicadores foram divididos em quatro categorias (Categoria I, II, III e IV), sendo a categoria I mais adequada e a categoria IV mais limitante para o crescimento vegetal. O método também designa pesos de acordo com sua importância para cada indicador. Tanto a categoria quanto os pesos foram atribuídos com base no conhecimento de pesquisas realizadas ao longo de muitos anos no local de estudo, neste caso a região sul da China.

Considerando metodologias qualitativas, a análise visual se destaca por ser considerada mais acessível e rápida. Bevilaqua (2017) ressalta que sua aplicação possibilitar estabelecer mais facilmente estratégias de planejamento agrícola e aprimoramento de sistemas de manejo e de preservação ambiental.

Uma das metodologias mais utilizadas nas últimas décadas, a “Visual Soil Assessment” foi desenvolvida na Nova Zelândia por Shepherd (2000). O método obtém os indicadores de forma simples, pois é realizado com base em comparações visuais do solo analisado com fotos referência dos solos disponibilizadas pelo autor

em seu guia. Por meio dessa comparação são atribuídas pontuações preestabelecidas para os seguintes parâmetros amostrados: estrutura e consistência do solo; porosidade do solo; cor do solo; número e cor das manchas do solo; contagem de minhocas; grau de desenvolvimento dos micros e macroagregados e grau de erosão do solo.

Niero et al. (2010) desenvolveu um estudo a fim de avaliar a sustentabilidade de práticas de manejo de solo por meio de avaliação visual da qualidade do solo. O experimento avaliou cultivos de graníferas, algodão, seringueira e mata nativa. Para tanto, foi aplicada a metodologia desenvolvida por Shepherd (2000) adaptada, utilizando os seguintes indicadores: estrutura, cor, porosidade, número de minhocas, mosqueado, camada compactada e cobertura do solo. Notas foram estabelecidas para a avaliação, sendo 0 (ruim), 1 (moderado) e 2 (bom). Essas notas foram ponderadas e receberam pesos diferentes para cada indicador. A soma da pontuação dos indicadores gerou um índice onde foi determinado a qualidade do solo: muito boa ( $>25$ ), boa ( $\geq 20 - 25$ ), moderada ( $15 - < 20$ ) e pobre ( $< 15$ ).

Diferentemente dos métodos desenvolvidos por Shepherd (2000) e Niero et al. (2010), que são métodos de fácil aplicação, Ball et al. (2015) desenvolveu um método mais trabalhoso, pois sua avaliação se dá em camadas mais profundas do solo, o que requer a abertura de trincheiras por meio de uma escavadeira mecânica. Nesse método, a avaliação é voltada principalmente para as modificações causadas à estrutura do solo pelo uso de maquinário nas camadas subsuperficiais. No referido estudo, o experimento foi realizado em campos sob cultivo mínimo e pastagem com pisoteio animal. Os seguintes atributos foram considerados: mosqueado, resistência do solo, porosidade visível, padrão e profundidade de penetração das raízes, tamanho e forma do agregado, e a atribuição da pontuação é realizada por meio de comparações com fotografias.

### 3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do solo cultivado com cana-de-açúcar no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (CCA – UFSCar) através de dois índices complementares quanto às propriedades consideradas: análises quantitativas dos indicadores químicos e físicos do solo; e análise qualitativa pela avaliação visual do solo. Os resultados visam, além de investigar possíveis correspondências entre os índices de qualidade do solo, avaliar o impacto do sistema de manejo sobre o solo e, respectivamente, embasar a adoção de manejos conservacionistas no *campus*.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

O Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (CCA - UFSCar) (22° 21' 28" Sul, 47° 23' 60" Oeste, altitude 640 m) está localizado no município de Araras, SP. A temperatura média anual é de 21,4°C, com mínima no mês de julho de 17,7°C e máxima no mês de fevereiro de 24,1°C. A precipitação anual é de 1.441 mm, com déficit hídrico entre os meses de abril e outubro (VALLADARES et al., 2008). A vegetação presente no município é classificada como Floresta Estacional Semidecidual, restando poucos fragmentos devido às ações antrópicas que devastaram a vegetação nativa com o passar do tempo (ALMEIDA et al., 2006) e alteraram o uso do solo.

O século XIX foi marcado pelo cultivo do café no Brasil. A área onde atualmente se encontra o CCA estava entre as fazendas produtoras até 1953, posteriormente foi ocupada com a cultura de cana-de-açúcar. A cultura foi amplamente estimulada com a criação do Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (PLANALSUCAR) em 1971. O programa, que tinha como objetivo a criação de instituições estatais para o desenvolvimento de pesquisa agropecuária visando a modernização da agricultura, instalou uma de suas coordenadorias regionais (Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA)) na área onde hoje é o *campus* de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (CCA – UFSCar). No IAA pesquisas com cana-de-açúcar foram realizadas até 1990, ano em que uma crise econômica foi responsável pelo encerramento do programa. Com a extinção do IAA e do PLANALSUCAR, os pesquisadores e servidores foram incorporados ao quadro da UFSCar. Em 1992, como prosseguimento das pesquisas desenvolvidas pelo PLANALSUCAR, foi implantado o Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (PMGCA) da UFSCar com o objetivo de desenvolver variedades de cana-de-açúcar melhoradas e adaptadas às diversas condições edafoclimáticas (UFSCAR, 2015).

Esta cultura é presente majoritariamente até os dias atuais em toda a área do *campus*, com exceção de pequenas áreas onde estão inseridas culturas olerícolas, eucalipto, mogno, áreas de pastagem e um fragmento de floresta estacional semidecidual (UFSCar, 2015).

Conforme o levantamento detalhado realizado por Lima Filho (2000), as seguintes classes de solo estão presentes no *campus*: Latossolo Vermelho, Nitossolo Vermelho e Argissolo Vermelho. A descrição dos solos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018) é apresentada a seguir:

- Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf): são solos formados por material mineral, com horizonte B latossólico logo abaixo do horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico. São profundos a muito profundos, em estágio avançado de intemperização e variam de fortemente a bem drenados. A matiz desses solos é de 2,5YR ou mais vermelho e, na maior parte dos 100 primeiros centímetros do horizonte B, saturação por bases < 50% e teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (pelo  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de  $180 \text{ g kg}^{-1}$  a <  $360 \text{ g kg}^{-1}$  de solo. Há também no *campus* a presença de Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd), que igualmente possui saturação por bases < 50%, porém sem os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  encontrados no Latossolo Vermelho Distroférrico.

- Nitossolo Vermelho Distroférrico latossólico (NVdf): são solos formados por material mineral, com presença de 35% de argila ou mais, inclusive no horizonte A. Apresenta horizonte B nítrico abaixo do horizonte A e horizonte B latossólico abaixo do horizonte B nítrico, até uma profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo. São solos cujo horizonte B expressa grau de desenvolvimento quanto a estrutura (blocos subangulares ou angulares ou prismática), associado à cerosidade. Apresentam matiz 2,5 YR ou mais vermelho, e saturação por bases < 50% e teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (pelo  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de  $150 \text{ g kg}^{-1}$  a <  $360 \text{ g kg}^{-1}$  de solo na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B. No *campus* também há presença de Nitossolo Vermelho Eutroférrico latossólico (NVef), do qual a única diferença para o anterior é a saturação por bases  $\geq 50\%$ .

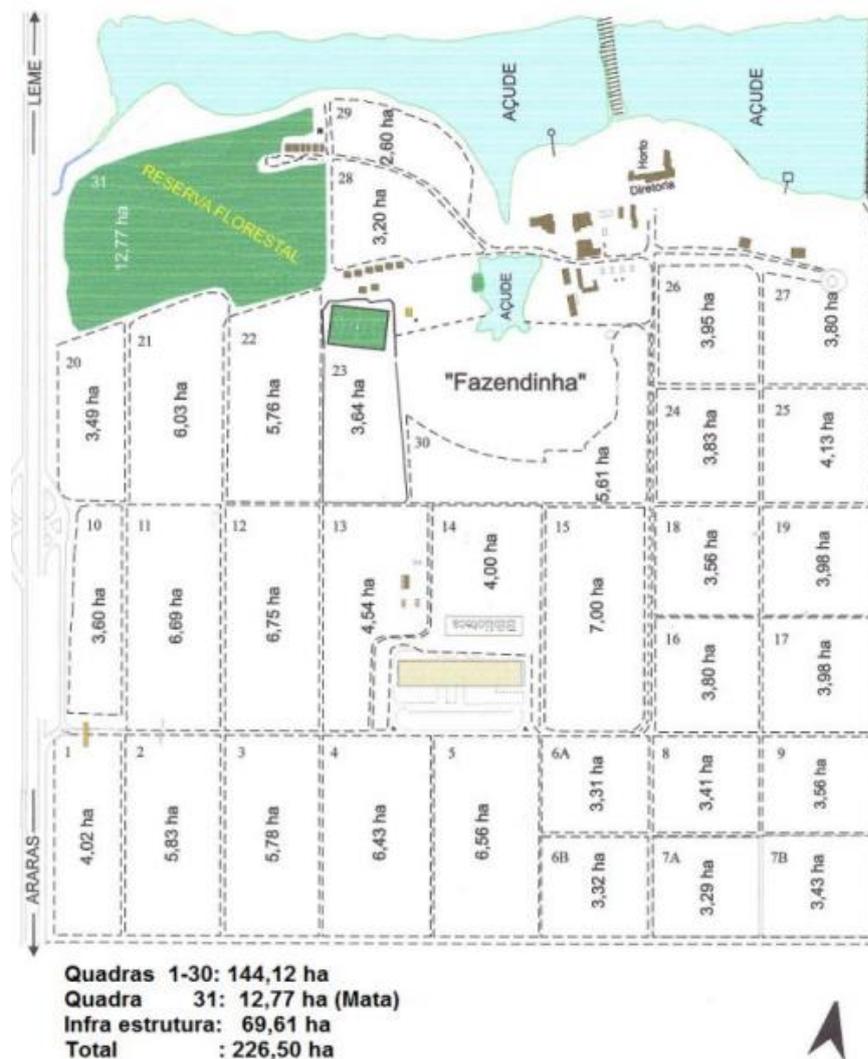
- Argissolo Vermelho Distrófico latossólico (PVd): são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural acima do horizonte B latossólico com profundidade de até 150 cm a partir da superfície do solo. A maioria desses solos apresenta acréscimo no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B. Pode-se notar visualmente a transição entre o horizonte A e Bt. A matiz desses solos é de 2,5YR ou mais vermelho e saturação por bases < 50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B.

Os materiais de origem são principalmente rochas sedimentares paleozoicas, como argilitos e siltitos, e intrusões de sill de diabásio datando do mesozoico.

## 4.2. Índices de qualidade do solo (IQS)

A qualidade do solo em relação à sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar foi analisada por meio de dois índices distintos. No método 1 (IQS Quantitativo), o IQS considera análises quantitativas dos atributos físicos e químicos do solo. Já no método 2 (IQS Visual), a análise do IQS é realizada a partir de indicadores visuais considerando as características morfológicas do solo. As informações pedológicas das classes de solo do CCA - UFSCar utilizadas neste estudo são provenientes do levantamento detalhado realizado por Lima Filho (2000).

O levantamento pedológico do CCA (LIMA FILHO, 2000) foi executado por quadras (Figura 1 e tabela 1), onde foram abertas trincheiras para a descrição morfológica dos perfis e coleta de amostras de solo para a realização de análises físicas e químicas dos solos classificados.



**Figura 1.** Quadras numeradas e respectivas áreas (ha) do CCA – UFSCar.

**Fonte:** Mapa gentilmente cedido pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana Cavaliere Sais (comunicação pessoal).

**Tabela 1.** Quadras e respectivas classes de solo do CCA – UFSCar.

Quadras	Solo
1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 5, 6A, 6B	Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf); textura argilosa/muito argilosa; A moderado; caulínítico – oxídico.
20, 21, 22, 23, 28, 29	Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico (NVdf); textura argilosa; A propeminente; caulínítico – oxídico.
30	Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico (NVef); textura argilosa; A chernozêmico; caulínítico.
31	Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico (NVdf); textura argilosa; A chernozêmico; caulínítico.
13, 14, 15	Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd); textura argilosa; A moderado; caulínítico; mesoférico.
7A, 7B, 8, 9, 16, 17, 18, 19	Argissolo Vermelho Distrófico latossólico (PVd); textura argilosa/muito argilosa; A moderado; caulínítico – oxídico; mesoférico.
24, 25, 26, 27	Argissolo Vermelho Distrófico latossólico (PVd); textura argilosa; A moderado; caulínítico; mesoférico.

**Fonte:** Levantamento pedológico detalhado do CCA - UFSCar (LIMA FILHO, 2000).

Com base em informações sobre o histórico de uso do solo no *campus* obtidas no “Projeto pedagógico do curso de graduação em Engenharia Agrônômica” (UFSCar, 2015) e imagens do mosaico do Google Earth disponíveis a partir do ano 2004, buscou-se traçar uma linha do tempo com imagens subsequentes de 2010, 2013, 2017, 2019 e 2021 (Figura 2). Foi constatada a constância do uso do solo no CCA no período, com a presença da cultura da cana-de-açúcar em todas as quadras, com exceção da quadra 30, onde há uma área de proteção ambiental (APA), e da quadra 31, que contém um maciço florestal. Portanto, neste estudo, as quadras de 1 a 29 foram denominadas como cana-de-açúcar (CA) seguido de um número que representa cada conjunto de quadrada. A quadra 30 foi denominada como APA e a 31 como MATA. Essa denominação encontra-se descrita na tabela 2.



**Figura 2.** Imagens de satélite para o CCA – UFSCar ao longo dos anos.

Fonte: Extraído de Google Earth.

**Tabela 2.** Denominações de uso do solo adotadas para os conjuntos de quadras do CCA – UFSCar.

Quadra	Solo	Uso do solo
1, 2, 3, 4	LVdf	CA1
10,11,12	LVdf	CA2
20, 21, 22, 23, 28, 29	NVdf	CA3
30	NVef	APA
31	NVdf	MATA
5, 6A, 6B	LVdf	CA4
13,14,15	LVd	CA5
7A, 7B, 8, 9, 16, 17, 18, 19	PVd	CA6
24, 25, 26, 27	PVd	CA7

\*CA: cana-de-açúcar; APA: Área de Preservação Ambiental.

As análises de solo realizadas por Lima Filho no ano 2000 são as únicas disponíveis até o momento que abrangem todo o *campus* de forma detalhada. Apesar de se tratar de um estudo realizado há mais de 20 anos, o uso desses dados no presente trabalho justifica-se pela impossibilidade de coleta e análise de solo entre o ano de 2020 e 2021 devido à pandemia do SARS-CoV2 (COVID-19), além da própria importância da aplicação e análise do método científico alvo deste estudo. Destaca-se ainda, a constância do uso do solo no *campus*, o qual não sofreu alterações significativas com o passar do tempo em relação as culturas cultivadas, permanecendo predominantemente com o cultivo de cana-de-açúcar (Figura 2).

#### 4.3. Método 1 – IQS Quantitativo

O IQS Quantitativo foi baseado na metodologia de Wang e Gong (1998) a partir da seleção de indicadores de qualidade do solo, tendo em vista refletir a capacidade do solo em desempenhar a função específica de crescimento das plantas. Os indicadores foram divididos em quatro categorias (I, II, III e IV). A categoria I é a mais

adequada para o crescimento vegetal; a categoria II é adequada para o crescimento vegetal, mas com pequenas limitações; a categoria III com limitações mais sérias do que a categoria II e a categoria IV apresenta limitações graves para o crescimento vegetal. As notas 4, 3, 2 e 1 foram atribuídas para as categorias I, II, III e IV, respectivamente, e estão vinculadas ao potencial de crescimento vegetal. Os pesos atribuídos, de acordo com sua importância para cada indicador, devem somar 100.

Os pesos, notas e classes dos indicadores foram definidos de acordo com Monteiro e Ponciano (2012), que utilizaram o método de Wang e Gong (1998) para as condições brasileiras ao avaliar a qualidade do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Os indicadores, pesos e notas selecionados estão dispostos na tabela 3.

**Tabela 3** – Indicadores de qualidade do solo e seus pesos correspondentes às categorias para avaliação do IQS Quantitativo.

Indicadores	Peso do indicador (W)	I	II	III	IV
MO (g dm <sup>-3</sup> )	19	> 30	> 20 – 30	10 – 20	< 10
Textura (% argila)	17	> 60	> 35 a 60	15 a 35	< 15
CTC (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	16	> 150	>100 -150	50 – 100	< 50
KS (mm h <sup>-1</sup> )	10	0,036 - < 3,6	3,6 - < 36	0,0036 - < 0,036 / > 36	< 0,0036
P (mg dm <sup>-3</sup> )	10	> 15	> 10 – 15	5 – 10	< 5
K (mg dm <sup>-3</sup> )	10	> 150	> 100 – 150	50 – 100	< 50
m (%)	9	< 10	10 – 20	> 20 – 45	> 45
pH	9	5,5 – 7,0	5,0 - < 5,5 / > 7,0 – 7,5	4,5 - < 5,0	< 4,5
Nota atribuída (I)		4	3	2	1

O IQS alcança valor máximo de 400 e mínimo de 100, sendo estabelecido através da seguinte equação:

$$IQS = \sum W * I \quad (1)$$

Onde: IQS = Índice de qualidade do solo

W = Peso dos indicadores

I = Nota das diferentes categorias

Os respectivos valores dos indicadores físicos e químicos dos solos do CCA - UFSCar são apresentados nas tabelas 4 e 5, respectivamente. Para a avaliação, considerou-se a profundidade mínima de 20 cm e, quando constatado que o horizonte superficial não atingia esse critério, o horizonte subsequente também passou a ser considerado.

**Tabela 4.** - Atributos físicos dos solos do CCA-UFSCar.

Uso do solo	Solo	Horizonte	Argila (%)	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	* KS (mm h <sup>-1</sup> )
CA1	LVdf	Ap	55	6	10	29	0,11
	LVdf	AB	64	5	9	22	0,030
CA2	LVdf	Ap	48	12	14	26	0,30
CA3	NVdf	Ap	49	14	23	14	0,26
APA	NVef	A	50	8	13	29	0,22
Mata	NVdf	A	50	5	12	33	0,22
CA4	LVdf	Ap	61	8	11	20	0,046
CA5	LVd	Ap	60	10	11	19	0,053
CA6	PVd	Ap	52	19	16	13	0,17
	PVd	AB	51	17	17	15	0,196
CA7	PVd	Ap	49	15	20	16	0,26
	PVd	AB	47	15	21	17	0,349

**Fonte:** Levantamento pedológico detalhado do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFSCar (LIMA FILHO, 2000). \*Parâmetro não disponível em Lima Filho (2000) e determinado a partir da equação de Dane e Puckett (1994).

**Tabela 5.** Atributos químicos dos solos do CCA – UFSCar.

Uso do solo	Solo	Hor.	pH	MO	P	K	m	SB	H+AL	AI	CTC
				(g dm <sup>-3</sup> )	(mg dm <sup>-3</sup> )	(%)	----- (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) -----				
CA1	LVdf	Ap	6,4	24	34	102	0,67	44	25	0,3	69
		AB	6,4	17	15	39,1	0,72	41	22	0,3	63
CA2	LVdf	Ap	6,3	30	8	51	0,50	59	28	0,3	87,3
CA3	NVdf	Ap	5,3	24	4	35	22,70	17	33	5	49,9
APA	NVef	A	7,2	30	8	63	0,63	78	19	0,5	96,6
Mata	NVdf	A	6	43	7	94	0,84	59	25	0,5	84,4
CA4	LVdf	Ap	6,5	16	1	20	1,26	23	18	0,3	40,5
CA5	LVd	Ap	4,9	19	1	31	19,41	22	55	5,3	76,8
CA6	PVd	Ap	6,3	30	5	8	0,60	49	31	0,3	80
		AB	5,6	21	3	15,64	3,33	29	42	1,0	71,4
CA7	PVd	Ap	5,9	27	2	27	1,63	48	36	0,8	83,7
		AB	5,7	19	1	23,46	1,29	38	29	0,5	66,6

**Fonte:** Levantamento pedológico detalhado do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFSCar (Lima Filho, 2000).

A seguir, são descritas as metodologias utilizadas na análise de cada indicador considerado.

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a metodologia indicada por Nogueira e Souza (2005), através do método da pipeta, que utiliza uma solução de NaOH como dispersante químico e agitação mecânica. A fração argila é separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte é calculado por diferença.

Com a determinação da textura foi possível estimar a condutividade hidráulica (KS) dos solos através da equação de Dane e Puckett (1994):

$$KS = 303,84 e^{(-0,144*Arg)}$$

Em que:

KS = condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ )

Arg = Argila (%)

As análises químicas foram realizadas de acordo com Rajj (1983). A determinação do pH foi feita com suspensão de solo em solução de cloreto de cálcio e a acidez total foi estabelecida empregando a técnica de solução tampão SMP. Para a determinação do alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) foi aplicado o método de extrato de cloreto de potássio. Os teores de P, Ca, Mg e K foram determinados a partir da extração com resina trocadora de íons. Para obter a capacidade de troca catiônica total (CTC) foi feito o somatório da acidez total com a soma de bases  $\text{CTC} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ . A saturação por alumínio foi determinada a partir da soma de bases e da concentração de alumínio trocável:

$$m = \frac{100 \times \text{Al}^{3+}}{(\text{SB} + \text{Al}^{3+})}$$

Onde,

m = Saturação por alumínio (%)

$\text{Al}^{3+}$  = concentração de alumínio trocável ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )

SB = Soma de bases ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )

A determinação da quantidade de matéria orgânica no solo se deu por colorimetria.

A seguir será demonstrado como o índice de qualidade do solo foi determinado através da equação (1). Para tanto, como exemplo serão utilizadas as análises químicas e física do uso do solo referente à APA. A tabela 6 demonstra como foram atribuídas as notas e pesos aos indicadores.

Quando aplicada a equação (1), temos:

$$\text{IQS APA} = (19 \cdot 3) + (17 \cdot 3) + (16 \cdot 2) + (10 \cdot 2) + (10 \cdot 2) + (10 \cdot 2) + (9 \cdot 4) + (9 \cdot 3) = 263$$

**Tabela 6** - Resultados dos indicadores da APA aplicados aos pesos e notas considerados para o IQS Quantitativo conforme tabela 3.

<b>Indicadores</b>	<b>Valor aferido para cada indicador na APA</b>	<b>Peso do indicador (W)</b>	<b>Nota atribuída (I)</b>
MO (g dm <sup>-3</sup> )	30	19	3
Textura (%)	50	17	3
CTC (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	96,6	16	2
KS (mm h <sup>-1</sup> )	0,22	10	2
P (mg dm <sup>-3</sup> )	8	10	2
K (mg dm <sup>-3</sup> )	63	10	2
m (%)	0,63	9	4
pH	7,2	9	3

#### 4.4. Método 2 – IQS Visual

O IQS Visual foi baseado no método Visual Soil Assessment (VSA) desenvolvido na Nova Zelândia por Shepherd (2000) e adaptado por Niero et. al (2010). Esse método consiste em atribuir notas 0 (pobre), 1 (moderado) ou 2 (bom), para cada atributo de qualidade analisado, por meio de comparação entre a amostra de solo com fotografias disponíveis no guia de campo do autor. A nota obtida é então multiplicada pelo peso do indicador que também está relatado no guia do autor. Os valores obtidos para cada atributo são então somados, resultando em um valor que representa o índice de qualidade do solo e pode ser classificado em pobre (menor que 10), moderado (entre 10 e 25) e bom (valores maiores que 25).

A adaptação ao trabalho de Shepherd (2000) por Niero et al. (2010) propõe uma alteração para a classificação visual, a qual será adotada no presente trabalho. Considerou-se, assim, quatro classes com os seguintes valores de índice: muito boa, maior que 25,00; boa, entre 20,00 e 25,00; moderada, entre 15,00 e 19,99; e pobre, menor que 15,00.

O IQS por meio de indicadores visuais foi estimado por Niero et. al. (2010):

$$IVQS = \sum W * I \quad (2)$$

Onde: IVQS = Índice visual de qualidade do solo

W= Peso dos indicadores

I = Notas atribuídas a cada indicador

A partir das informações apresentadas na descrição morfológica dos perfis de solo do CCA – UFSCar (LIMA FILHO, 2000), foram utilizados os seguintes indicadores de qualidade do solo: cor, estrutura, consistência, presença de raiz e canais biológicos. Pesos numéricos de 2 a 4 foram atribuídos aos indicadores, de acordo com a relevância da função para o adequado funcionamento do solo. Seguindo as diretrizes do trabalho referência, os indicadores estrutura e presença de raízes receberam peso 4, cor do solo e canais biológicos receberam peso 3 e consistência com peso 2. As notas atribuídas para cada indicador, segundo as avaliações realizadas visualmente, foram: 0 (pobre), 1 (moderado) ou 2 (bom).

A classificação quanto à qualidade do solo foi estabelecida conforme a tabela 7.

**Tabela 7.** Classificação do IQS Visual.

<b>Classificação Visual</b>	<b>Índice</b>
Muito boa	> 25,00
Boa	20 – 25,00
Moderada	15 – 19,99
Pobre	< 15,00

**Fonte:** Niero et al. (2010)

A metodologia referente à obtenção de cada indicador visual utilizado no presente trabalho é apresentada a seguir.

A cor do solo foi definida de acordo com a Carta de Munsell, observando o matiz, valor e o croma. Os perfis de coloração escura receberam nota 2, pois considerou-se que solos nessa tonalidade tenham maior teor de matéria orgânica, o que confere benefícios ao solo tanto do ponto de vista químico como físico. Os solos de coloração avermelhada indicam a presença de óxidos de ferro e Al, o que é resultante da elevada intemperização desses solos, indicando também ambiente bem drenados, portanto, receberam nota 1. Em relação à cor, a pior situação é relacionada

a cores claras, pois tendem a indicar áreas encharcadas, onde houve intenso processo de remoção do ferro, ou podem estar relacionadas a solos como elevado percentual de areia, em que normalmente apresentam reduzida capacidade de armazenamento de água e retenção de nutrientes. Portanto, esses solos receberam nota 0 (TEIXEIRA et al., 2009).

A estrutura do solo é classificada quanto à forma, tamanho e grau de desenvolvimento. As formas de solos foram descritas como granular, laminar e em blocos. A forma granular é referente a formação de estruturas arredondadas, característica de horizonte superficial rico em matéria orgânica, o que representa um bom atributo ao solo. Na forma laminar o arranjo das partículas se dá em torno de uma linha horizontal com lâminas de espessura variável, conferindo ao solo características de compactação, o que influencia de maneira negativa a qualidade do solo. Na forma em blocos as partículas estão arranjadas em forma de polígonos de tamanhos aproximados. Esse tipo de forma é comumente encontrado nos horizontes subsuperficiais (CAPECHE, 2008).

Na classificação de tamanho foram caracterizados como pequeno, médio e grande, segundo a tabela 8. O tamanho vai influenciar de diferentes maneiras cada forma do solo. Como exemplo, a forma granular de tamanho pequeno confere boa macro e microporosidade, já formas em blocos de tamanho pequeno tendem a reduzir a macroporosidade.

**Tabela 8.** Classificação de tamanho das formas do solo.

Tamanho (mm)	Forma	
	Granular e Laminar	Blocos
Pequeno	< 2	< 10
Médio	≥ 2 a ≤5	≥ 10 a ≤ 20
Grande	> 5	> 20

Fonte: IBGE (2007)

O grau de desenvolvimento caracteriza a estabilidade da agregação e foram determinados como fraco, moderado e forte. São denominados fracos quando pouco resistentes a pressão; moderado quando os agregados são bem formados e moderadamente resistentes à fragmentação, e forte quando resistentes e observáveis no perfil.

As pontuações para estrutura do solo foram atribuídas observando a interação entre os 3 fatores descritos, sendo que obtiveram 1 ponto aqueles que apresentam a característica mais benéfica ao solo, os que tiveram 0,5 ponto são aqueles que apresentam características intermediárias, e para aqueles que tem condições ruins foi atribuído 0 ponto, podendo ser verificadas na tabela 9. Valores < 1,5 receberam nota 0, para valores  $\geq 1,5$  a nota atribuída foi 1, valores  $\geq 2,5$  tiveram nota 2.

**Tabela 9.** Pontuação para estrutura do solo.

	Forma		Tamanho		Grau de Desenvolvimento		Pontuação Geral
	Pontos		Pontos		Pontos		
Granular	1	Pequeno	1	Fraca	0	2	
Granular	1	Pequeno	1	Moderada	0,5	2,5	
Granular	1	Pequeno	1	Forte	1	3	
Granular	1	Médio	0,5	Fraca	0	1,5	
Granular	1	Médio	0,5	Moderada	0,5	2	
Granular	1	Médio	0,5	Forte	0,5	2	
Granular	1	Grande	0	Fraca	0	1	
Granular	1	Grande	0	Moderada	0	1	
Granular	1	Grande	0	Forte	0	1	
Laminar	0	Pequeno	0	Fraca	0	0	
Laminar	0	Pequeno	0	Moderada	0	0	
Laminar	0	Pequeno	0	Forte	0	0	
Laminar	0	Médio	0	Fraca	0	0	
Laminar	0	Médio	0	Moderada	0	0	
Laminar	0	Médio	0	Forte	0	0	
Laminar	0	Grande	0	Fraca	0	0	
Laminar	0	Grande	0	Moderada	0	0	
Laminar	0	Grande	0	Forte	0	0	
Bloco	0,5	Pequeno	0	Fraca	0	0,5	
Bloco	0,5	Pequeno	0	Moderada	0	0,5	
Bloco	0,5	Pequeno	0	Forte	0	0,5	
Bloco	0,5	Médio	0,5	Fraca	0	1	
Bloco	0,5	Médio	0,5	Moderada	0,5	1,5	
Bloco	0,5	Médio	0,5	Forte	0,5	1,5	
Bloco	0,5	Grande	0	Fraca	0	0,5	
Bloco	0,5	Grande	0	Moderada	0	0,5	
Bloco	0,5	Grande	0	Forte	0	0,5	

Em relação à consistência, notas foram atribuídas de acordo com o comportamento apresentado em cada estado de umidade. Para a pior situação foi atribuída a nota 0, para uma situação intermediária 0,25 e 0,5 para a melhor condição. Definido os pontos para cada estado de umidade, realizou-se a análise combinada

entre esses estados a fim de determinar uma nota final para a consistência. Com o valor da combinação, para pontos  $\leq 0,75$  a nota atribuída foi 0, quando os pontos foram  $>0,75 - \leq 1,5$  a nota foi 1, e para pontuação  $>1,5$  a nota foi 2. A tabela 10 elenca a pontuação adotada conforme o comportamento apresentado pelo solo quando caracterizado pela situação referida.

**Tabela 10.** Pontuação para consistência do solo.

Seca		Úmida		Molhada			
Pontos		Pontos		Plasticidade	Pontos	Pegajosidade	Pontos
Duro	0	Firme	0	Não Plástico	0,25	Não Pegajoso	0,25
Ligeiramente Duro	0,25	Friável	0,5	Ligeiramente Plástico	0,5	Ligeiramente Pegajoso	0,5
Macio	0,5	Muito friável	0,25	Plástico	0	Pegajoso	0

As notas para os canais biológicos foram atribuídas de acordo com a presença ou ausência dos mesmos como descrito no levantamento. Quando relatado canais biológicos abundantes a nota atribuída foi dois, devido a importância da presença desses elementos para o solo. Segundo Silva (2006), a macrofauna existente no solo desempenha um papel fundamental no funcionamento do ecossistema, pois atinge vários níveis tróficos na cadeia alimentar do solo, afetando de maneira direta e indireta a produção primária. A macrofauna exerce influência sobre o ciclo de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes assimiláveis pelas plantas e também pode ser vetor de microrganismos simbióticos das plantas. As propriedades físicas do solo também podem ser influenciadas por meio da macrofauna, pois atividades desempenhadas principalmente por formigas, minhocas e larvas são responsáveis pela criação de galerias, ninhos e excrementos fecais, que atuam modificando as propriedades do solo e disponibilizando recursos para vida de outros organismos. Quando descritos como poucos canais biológicos a nota dada foi 1. Já quando relatado canais biológicos escassos ou a ausência dessa informação a nota atribuída foi 0.

Através das trincheiras abertas em cada quadra do *campus* foi possível avaliar a presença de raízes no perfil do solo de acordo com cada horizonte. Visualmente foi observada a quantidade das raízes nos horizontes do solo, que foram descritas como: abundantes, poucas ou escassas, onde nesse estudo foram atribuídas notas 2, 1 e 0, respectivamente. Segundo Vasconcelos e Garcia (2005) a quantidade e distribuição

das raízes tem influência direta na cultura da cana-de-açúcar, contribuindo para absorção de nutrientes disponíveis no solo, resistência a seca, capacidade de germinação, tolerância a movimentação de maquinário, etc.

A seguir será demonstrado como o índice de qualidade do solo visual foi encontrado através da equação (2). Para tanto, como exemplo serão utilizadas as análises químicas e física do solo referente à APA. A tabela 11 demonstra como foram atribuídas as notas e pesos aos indicadores.

**Tabela 11.** Resultados visuais dos indicadores da APA aplicados aos pesos e notas conforme tabela 13.

<b>Indicadores considerados para o IQS Visual</b>	<b>Peso dos indicadores (W)</b>	<b>Nota atribuída (I)</b>
Cor do solo	3	2
Estrutura	4	1
Consistência	2	0
Presença de raiz	4	2
Canais biológicos	3	0

Quando aplicada a equação (2) temos:

$$\text{IQS APA} = (3*2) + (4*1) + (2*0) + (4*2) + (3*0) = 18$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Método 1 – IQS Quantitativo

Quando observado cada horizonte individualmente, o maior IQS Quantitativo encontrado foi no CA1 horizonte Ap, seguido de Mata, esses dois usos do solo alcançaram mais de 60% do valor do índice. Para os usos do solo CA2, APA, CA1 horizonte AB, CA7 horizonte Ap, CA6 horizonte Ap e AB, os valores foram superiores a 50% do valor do índice. Os usos do solo CA4, CA7 horizonte AB, CA3 e CA5, não atingiram mais que 50% do valor do índice, sendo que os dois últimos (CA3 e CA5) obtiveram os piores índices do levantamento (tabela 12).

**Tabela 12.** IQS Quantitativo dos diferentes usos do solo encontrados do *campus* do CCA – UFSCar.

Uso do solo	Solo	Horizonte	IQS Quantitativo
CA1	LVdf	Ap	302
		AB	260
CA2	LVdf	Ap	272
CA3	NVdf	Ap	209
APA	NVef	A	263
MATA	NVdf	A	291
CA4	LVdf	Ap	234
CA5	LVd	Ap	204
CA6	PVd	Ap	262
		AB	252
CA7	PVd	Ap	252
		AB	233

Para este estudo os primeiros 20 cm da camada do solo foram avaliados, portanto, deve-se considerar que para o uso do solo CA1 a junção dos horizontes Ap

e AB interfere na determinação de um valor para o índice, pois enquanto o horizonte Ap atinge índice de 302 o AB atinge 260. O índice do horizonte Ap pode ser atribuído em razão dos níveis de P e K presentes de forma mais acentuada nesse solo do que os teores encontrados nos demais usos do solo (tabela 5), o que influenciou para a elevação do índice, demonstrando o quão importante é o manejo do solo para a cultura da cana de açúcar com a adição de fertilizantes químicos. De acordo com o Raij et al. (1997), para uma produção equivalente de cana-de-açúcar nas condições analisadas em relação ao P existente nesse solo, a aplicação de  $P_2O_5$  poderia ser 40% menor nesse uso do solo em relação aos outros.

O K também apresentou teor mais elevado no uso do solo CA1 horizonte Ap (tabela 5). Esse é o nutriente em maior quantidade exportado pela cultura da cana-de-açúcar e influencia em sua qualidade (REIS; MONNERAT, 2002), auxiliando a planta de diversas maneiras como em seu perfilhamento, fixação do nitrogênio, aumentando o teor de carboidratos, lipídeos, proteínas, promovendo o armazenamento de açúcar e amido (ROSSETTO; SANTIAGO, 2022). No horizonte AB é possível notar que há uma queda nos níveis de K e P (tabela 5), o que reflete diretamente para a queda do índice, demonstrando que os nutrientes estão presentes na camada superficial do solo e não atingem de forma uniforme a camada subsequente.

Após essa análise é possível determinar que considerando os 20 cm da camada do horizonte avaliado, o uso do solo Mata obteve o melhor índice nesse estudo (291). O principal indicador responsável por esse resultado é o teor de matéria orgânica presente no solo significativamente maior para esse uso (tabela 5) e, sendo esse o indicador com maior peso entre os demais (tabela 6), sobressaiu-se, portanto, em relação às classificações recebidas nos outros indicadores. De acordo com Melloni et al. (2008), a avaliação da qualidade do solo deve levar em conta a maior quantidade de indicadores possíveis, entre os quais recomenda-se a MO, que tem sido considerada um dos mais críticos e sensíveis indicadores da qualidade do solo, devido suas inúmeras participações no funcionamento de ecossistemas.

O elevado IQS obtido para Mata observado no presente trabalho é ratificado por Monteiro e Ponciano (2012) ao aplicar o método desenvolvido por Wang e Gong (1998) para determinar o IQS para as áreas de mata natural, para as áreas de cana-de-açúcar cultivada há 12 anos e para 50 anos de cultivo. Neste estudo, o maior IQS obtido foi o da área sob mata (310), seguido da área de cana com 12 anos de cultivo

(259) e o menor índice foi o da área de cana com 50 anos (251). Os autores atribuíram esta diferença aos teores elevados de matéria orgânica no solo da mata natural. Nos solos com 12 e 50 anos de cultivo de cana-de-açúcar foi observada uma diminuição de 37 % e 44 % do estoque de matéria orgânica, respectivamente, em relação à mata natural nos 20 cm superficiais do solo.

A condutividade hidráulica saturada (KS) obtida para os diferentes usos do solo, não apresentou grandes variações, ficando com valores entre 0,030 e 0,349 mm h<sup>-1</sup> (tabela 4). Isso se deu em razão da equação de KS ter como base a argila presente no solo. O teor de argila encontrado nesses solos, fica entre 47% e 64% (tabela 4). Medeiros et al. (2001) realizou a avaliação da KS em um Latossolo Vermelho de textura argilosa (teor de argila = 53%) de forma direta utilizando o permeâmetro de carga constante. Foram obtidas KS de 0,05 e 0,03 mm h<sup>-1</sup>, próximos à faixa de valores estimados no presente trabalho (tabela 4) com a equação de Dane e Puckett (1994), indicando uma correspondência entre o método direto e indireto.

Em trabalho realizado por Cherubin et al. (2016), um método desenvolvido nos Estados Unidos para a avaliação da qualidade do solo foi aplicado no Brasil com o objetivo de avaliar os impactos de diferentes tipos de vegetação (nativa, pastagem, cana-de-açúcar), a partir de indicadores químicos, físico e biológicos do solo. Foi constatado que solos sob vegetação nativa estavam funcionando a 87% de seu potencial, enquanto os solos de pastagem estavam funcionando a 70% e solos de cana-de-açúcar com 74% de sua capacidade potencial. O que corrobora os resultados obtidos no presente trabalho.

De acordo com os índices obtidos em cada uso do solo, para alguns locais do *campus* a cultura da cana-de-açúcar não encontra condições para alcançar completamente seu potencial produtivo. Essa situação se destaca para CA4, CA7 horizonte AB, CA3 e CA5, que não atingiram mais que 50% do valor do índice. Considerando apenas as classes de solos onde estão situados estes cultivos, respectivamente, LVdf, PVd, NVdf e LVd (tabela 2), verifica-se que estas constituem fator insuficiente para explicar tal desempenho, uma vez os solos bem avaliados (IQS > 50%) quanto ao uso (CA1 Ap/AB, Mata, CA2, APA, CA6 Ap/AB e CA7 Ap) foram, respectivamente, LVdf, NVdf, NVef, PVd e PVd (tabela 12). Para melhor embasar essa constatação, a obtenção de dados a respeito da produtividade da cana-de-açúcar em cada uso do solo seria de grande auxílio para confirmar esse cenário.

Nos usos de solo CA1, CA6 e CA7 foram avaliados o horizonte superficial e subsuperficial devido à profundidade. Nesses locais o horizonte superficial sempre obteve um índice maior que o subsuperficial. Levando esse ponto em consideração, pode-se sugerir que uma análise mais profunda desses solos é fundamental para a avaliação integrada dos seus índices uma vez que a cana de açúcar é uma cultura que alcança grandes profundidades.

A ausência de uma correlação entre o IQS e o fator classe do solo é, portanto, verificada a partir dos resultados observados em usos do solo com as mesmas classes, porém IQS discrepantes uns dos outros, não sendo identificada uma classe que se destacou positiva ou negativamente em relação ao índice. Como exemplo temos os usos do solo CA1, CA2 e Ca4 que possuem solo da classe LVdf e tiveram considerável disparidade entre seus índices, sendo eles respectivamente 302, 263 e 234. Para os usos do solo CA3 e MATA com classe de solo NVdf o cenário acima se repetiu, apresentando índice de solo 209 e 291 respectivamente. Os usos do solo CA6 e CA7 que tem classe do solo PVd foram os únicos que tiveram índices com valores aproximados.

Outra forma de avaliar um solo adequado para o plantio de cana de açúcar, é através dos ambientes de produção. Esse método, já consagrado, é amplamente utilizado no meio canavieiro desde 2007 e consiste em definir locais apropriados para o plantio de cana-de-açúcar através da combinação de clima, disponibilidade hídrica, CTC e classe de solo (CAVALCANTE; PRADO, 2010). Tendo como fator classificatório somente a classe de solo, segundo o método de ambiente de produção, entre as classes de solo encontradas no *campus* o Nitossolo Vermelho eutroférico teria a maior produtividade (> 96 Toneladas de Cana por Hectare (TCH)) sendo classificado como ambiente A, seguido do Latossolo Vermelho distrófico e Argissolo Vermelho distrófico com produtividade > 88 TCH (ambiente B), e do Latossolo Vermelho distroférico com produtividade > 84 TCH (ambiente C). O Nitossolo Vermelho distroférico não consta no método. Sendo assim a classificação com base nas classes de solo do método de ambiente de produção não está em concordância com a classificação por classes de solo encontradas nos índices de qualidade do solo por esse trabalho estudado.

## 5.2. Método 2 – IQS Visual

Os respectivos valores dos indicadores visuais dos solos do CCA-UFSCar são apresentados na tabela 13 e foram relacionados à tabela 7 para a sua classificação. O uso do solo Mata obteve o maior índice, sendo o único a ter a qualidade do solo classificada como muito boa. Os usos dos solos CA6 horizonte Ap, CA1 horizonte Ap, CA2, CA4, CA5, foram classificados com qualidade do solo boa. Para os usos dos solos APA, CA7 horizonte Ap e CA1 horizonte AB os índices foram equivalentes a qualidade do solo moderada. Receberam classificação de qualidade do solo pobre os usos dos solos, CA3, CA6 horizonte AB e CA7 horizonte AB.

**Tabela 13.** IQS Visual dos diferentes usos dos solos encontrados do *campus* do CCA – UFSCar.

Uso do solo	Solo	Hor.	Cor do solo		Estrutura		Consistência		Presença de raiz		Canais biológicos		Índice
			Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	
CA1	LVdf	Ap	3	2	4	1	2	2	4	2	3	0	22
		AB	3	2	4	0	2	1	4	2	3	0	16
CA2	LVdf	Ap	3	1	4	1	2	1	4	2	3	1	20
CA3	NVdf	Ap	3	1	4	0	2	0	4	2	3	1	14
APA	NVef	A	3	2	4	1	2	0	4	2	3	0	18
Mata	NVdf	A	3	2	4	2	2	0	4	2	3	2	28
CA4	LVdf	Ap	3	1	4	1	2	1	4	2	3	1	20
CA5	LVd	Ap	3	1	4	1	2	1	4	2	3	1	20
CA6	PVd	Ap	3	1	4	1	2	1	4	2	3	2	23
		AB	3	1	4	0	2	1	4	1	3	1	12
CA7	PVd	Ap	3	1	4	0	2	2	4	2	3	1	18
		AB	3	1	4	0	2	1	4	1	3	1	12

O uso do solo mata obteve o maior índice (28), alcançando nota máxima em todos os pontos avaliados, com exceção do indicador consistência que obteve a nota 0. Resultado semelhante foi obtido por Niero et al. (2009), ao avaliar visualmente a qualidade do solo através do estabelecimento de um índice. No estudo foram avaliados diferentes tipos de vegetação (granífera, algodão, seringueira e mata nativa), sendo o tratamento mata nativa o melhor avaliado, obtendo índice 27,75.

Entre os demais usos dos solos, o conjunto de notas atribuídas para os indicadores cor do solo, estrutura, consistência, presença de raiz e canais biológicos, não tiveram predomínio de notas altas ou baixas (Tabela 13).

Os usos do solo CA1 nos horizontes Ap e AB, APA e MATA obtiveram as melhores notas em relação a cor do solo (tabela 13). Nota-se, assim como no IQS Quantitativo, que as classes dos solos não foram preponderantes para atribuição das notas, pois solos de uma mesma classe não necessariamente receberam a notas aproximadas.

O indicador estrutura obteve nota máxima apenas no uso do solo MATA, nos demais usos dos solos, onde a cultura da cana-de-açúcar se mantém de forma consistente, pontuações elevadas não foram atingidas. Um estudo realizado por Silva et al. (2021), avaliou através do método visual Evaluation of Soil Structure (VESS) a estrutura do solo, tendo em vista obter resultados sobre a qualidade física do solo decorrente do tráfego de máquinas em cultivos de cana-de-açúcar em diferentes níveis de palha. Esse estudo demonstrou melhores resultados para maiores quantidades de palha sobre a superfície do solo, pois quanto maior a quantidade de palha menor será o contato do maquinário com o solo, minimizando a compactação e incidindo na qualidade estrutural do solo. Tendo em vista que o levantamento realizado no *campus* data do ano de 2000 e que nesse período a queima do canavial era muito empregada não dando espaço para técnica de plantio direto, e que o levantamento não faz referência à presença de palhada sobre o solo, os resultados de estrutura obtidos no presente estudo são condizentes com o estudo de Silva et al. (2021).

Em se tratando do indicador consistência, os usos dos solos CA1 horizonte Ap e CA7 horizonte Ap tiveram as notas mais altas (tabela 13). Como mencionado anteriormente, estudos indicam que fatores como consistência e estrutura do solo tem influência direta no desenvolvimento de raízes. No índice visual aplicado nesse estudo

essa evidência não foi confirmada, uma vez que as altas notas obtidas pelo indicador presença de raiz não foi de encontro as baixas notas atribuídas aos indicadores consistência e estrutura.

Todos os usos do solo receberam nota máxima no quesito presença de raiz, com exceção dos usos dos solos CA6 horizonte AB e CA7 horizonte AB, que receberam nota 1 (tabela 13). Além de se tratar de horizontes subsuperficiais a classe de solo também é um fator de igualdade entre esses dois usos do solo.

O atributo canais biológicos obteve melhores notas nos usos dos solos MATA e CA6 horizonte Ap (tabela 13). No uso do solo MATA esse resultado se sustenta uma vez que a biodiversidade é maior, a quantidade de matéria orgânica é mais proeminente nesse solo e que não existe o trânsito de maquinários pesados. Estudo realizado por Portugal (2005) buscou avaliar a resiliência da estrutura de um solo submetido a diferentes usos e manejos. Os ambientes estudados foram seringueira, laranjeira, pastagem degradada e mata, e a presença de canais biológicos foi um dos indicadores selecionados para a avaliação. Foi constatado a presença de canais biológicos abundantes nos ambientes com mata e seringueira, e moderada no ambiente com laranjeira, indicando ambientes com formação de estrutura ativa e processos biogênicos, já no ambiente com pastagem houve a presença de fraca atividade biológica, indicando um ambiente influenciado por processos físicos.

## 6. CONCLUSÃO

Com a aplicação dos métodos de IQS Quantitativo e Visual nota-se que a única relação entre os dois métodos se deu para o uso do solo MATA, que alcançou o melhor índice nos dois métodos. Os demais usos do solo ficaram em posições distintas no ranqueamento de cada método, não sendo possível fazer uma correlação entre eles.

Em ambos os métodos de IQS as classes de solos não foram determinantes nos resultados, pois solos de uma mesma classe não necessariamente alcançaram valores aproximados na avaliação individual dos índices.

Nesse estudo podemos identificar que o IQS Quantitativo compreende um número maior de indicadores para ponderação do que o IQS Visual, o que traz maior embasamento para os resultados do referido índice. Além disso, no IQS Quantitativo temos como base as análises laboratoriais realizadas, que fornecem resultados precisos. Já no IQS Visual existem fatores que podem interferir mais facilmente nos resultados obtidos, como a sensibilidade da pessoa que fará a avaliação, a iluminação e umidade das amostras.

Para melhor entendimento dos índices e possível escolha do mais adequado, informações sobre a produtividade alcançada na época em cada uso do solo seriam essenciais para a definição da melhor escolha. Portanto, propõe-se que sejam coletadas amostras atuais do solo para análise e a repetição da aplicação dos métodos, conjuntamente com acompanhamento da produtividade de cana-de-açúcar nos usos do solo avaliados, para que assim se estabeleça uma relação entre os Índices. Também é recomendado que a amostragem do solo seja realizada em maiores profundidades (aproximadamente 0,75 m), pois a cana-de-açúcar tende a explorar os horizontes subsuperficiais.

Por fim, principalmente nas áreas cujos IQS revelaram maior limitação, recomenda-se a adoção ou manutenção de práticas como: plantio em nível, rotação e adubação verde com espécies leguminosas (como soja e crotalária) em associação a plantio direto, de forma a adequar o ambiente para o cultivo. As práticas conservacionistas irão garantir maior conservação do solo e da água, e aproximar os solos mobilizados das áreas cultivadas às condições de equilíbrio presentes no solo sob mata nativa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, T.C.; TOLENTINO, R.; SAYEG, H.S.; RAYMUNDO, O. DIAGNOSTICO PRELIMINAR DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS da ÁREA DE MANANCIAL DO MUNICÍPIO de ARARAS, SP. **Biológico**, São Paulo, v.68, p. 839-843, 2006.

ALVARENGA, C. C. *et al.* Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSRA) na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1608-1619, 2012

ARAÚJO, E. A. de; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v.5, n.1, p. 187-206, 2012.

BALL B. C; BATEY T; MUNKHOLM L. J; GUIMARÃES R. M. L; BIOZARD H; MCKENZIE D. C; HARGREAVES P. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. **Soil & Tillage Research**, n. 148, p. 85–96, 2015.

BARBOSA, A. M. **O sistema radicular da cana-de-açúcar**. 2016. Disponível em < <http://alexandriusmb.blogspot.com/2016/12/o-sistema-radicular-da-cana-de-acucar.html>> Acesso em 20 de out. 2022

BATISTA, M.A.; INOUE, T.T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A.S. **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T.; FREITAS, P.S.L.; BERIAN, L.O.S.; GOTO, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá: EDUEM, 2018, p. 113-162

BERNARDES, R. S. **Condutividade hidráulica de três solos da Região Norte Fluminense**. 2005. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2005.

BEVILAQUA, L. J. **Avaliação visual da saúde de solos sob diferentes usos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agroecologia E Desenvolvimento Rural) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017.

BEZERRA, J. R. C. *et al.* **Cultivo do algodão irrigado. Sistemas de produção**. 3ª Edição. Embrapa Algodão, 2014. Disponível em: < [https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistema\\_sdeproducaolf6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaold=7717&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicold=1305](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistema_sdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaold=7717&p_r_p_-996514994_topicold=1305)> Acesso em: 04 mar. 2021.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13.ed. New Jersey, Pearson Education, 2002. 960p.

BORGHI, E. et al. Recuperação de pastagens degradadas. In: NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I.R. de (Eds.) **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 105-138.

CAIRES, E.F.; KUSMAN, M.T.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. & PADILHA, J.M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p.125-136, 2004.

CAMARA, M.R.G.; CALDARELLI, C.E. Expansão canavieira e o uso da terra no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 30, n. 88, p. 93-116, 2016.

CAPECHE, C L. **Impactos das Queimadas na Qualidade do Solo – Degradação Ambiental e Manejo e Conservação do Solo e Água**. In: II Encontro Científico do Parque Estadual dos Três Picos. 2012, Cachoeiras de Macacu-SP. Anais do II Encontro Científico do Parque Estadual dos Três Picos, São Paulo, 2012, p. 17-20.

CAPECHE, C. L. **Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos - Comunicado técnico 51, 2008.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. DE; REIS, E. F. DOS; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CAVALCANTE, E. P.; PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de Latossolos da região de Araxá - MG. **Nucleus**, Ituverava, v. 7, p. 115-124, 2010.

CAVALIERI, K.M.V.; CARVALHO, L.A. de; SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L.; TORMENA, A.C. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1541-1550, 2011.

CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

CHERUBIN, M. R; KARLEN, L. D; FRANCO, A. L.C; CERRI, C. E. P; TORMENTA, C. A. TORMENA; CERRI C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 215–226, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-Açúcar, Safra 2020/21**. v. 7, n. 3, 2020.

Corrêa, E.A.; Moraes, I.C.; Pinto, S.A.F.; Lupinacci, C.M., 2016. Perdas de solo, razão de perdas de solo e fator cobertura e manejo da cultura de cana-de-açúcar: primeira aproximação. **Revista do Departamento de Geografia USP [Online]** 32. DOI: 10.11606/rdg.v2i0.116671

CRUZ, J. C.; MAGALHAES, P. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; MOREIRA, J. A. A. (Ed.). **Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 338 p.

DANE, J. H.; PUCKETT, W. **Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHOD FOR ESTIMATION HYDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS, 1994, Riverside. University of California, 1994. p. 389-403.

DEMATTE, J. L. I. Manejo e conservação de solos na cultura da cana. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 8-17, 2004.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWAERT, B.A. (Eds). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Wisconsin: **Soil Science Society Americam**, 1994. p.3-21.

EBELING, A.G.; ANJOS, L.H.C.; PEREZ, D.V.; PEREIRA, M.G. & VALLADARES, G.S. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **Bragantia**, p.261-266, 2008.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas/solo>>. Acesso em: 02 mar. 2021.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Curso De Recuperação De Áreas Degradadas: A Visão Da Ciência Do Solo No Contexto Do Diagnóstico, Manejo, Indicadores De Monitoramento E Estratégias De Recuperação**. 2008. Disponível em < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/340067>> Acesso em 02 de mar. 2021

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. Brasília: Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. p. 412, 1999.

FAO - Food And Agriculture Organization. **Diretrizes Voluntárias para a Gestão Sustentável dos Solos**. Roma, 2019.

FREITAS, D. A. F., SILVA, M. L. N., CARDOSO, E. L., CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica** v.43, n.3, p. 417-428, 2012.

FREITAS, D.E.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; SILVA, M.A.; OLIVEIRA, A.H.; SILVA, S.H.G. **Physical Indicators of Soil Quality in Oxisols Under Brazilian Cerrado**. In: SORIANO, M.C.H. Soil processes and current trends in quality assesment. InTech, 2013. cap. 3, p. 87-110.

HATFIELD, J. L., "Soil and water quality: An agenda for agriculture : Committee on Long-Range Soil and Water Conservation, Board on Agriculture, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 1993," **Agricultural Water Management**, vol. 28(2), pages 179-180, 1995

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2007. **Manual Técnico de Pedologia** 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE. Disponível em < <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>> Acesso em 28 de nov 2020

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicators properties in Mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, n. 01, p. 69-78, 2000.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v.61, n.1, p.4-10, 1997

KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, p.53-72, 1994.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LIMA FILHO, S.A. **Levantamento Pedológico detalhado do Centro de Ciências Agrárias (CCA/Araras) da universidade federal de São Carlos (UFSCar)**. Araras, 2000.

MATOS, P. F.; MARAFON, G. J. **O setor sucroenergético no Brasil: efeitos e contradições**. In: Marafon, G.; Arias, L. Q.; Sánchez, M. A. orgs. Apresentação. In: Estudos territoriais no Brasil e na Costa Rica (online). Rio de Janeiro: EDUERJ, 2018, p. 41-59

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR., G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, v.58, n.2, p.295-301, 2001.

MEDEIROS, G. A. et al. Influência da compactação do solo sobre a condutividade hidráulica saturada para um solo argiloso. **Revista ecossistemas**, vol. 26, n. 2, p. 165-169, ago./dez. 2001

MELLONI, R.; MELLONI, E.G.P.; ALVARENGA, M.I.N.& VIEIRA, F.B. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, p.963-969, 2004.

MONTEIRO, A.C.G.; PONCIANO, N.J. Índice da qualidade do solo com cana-de-açúcar colhida crua e queimada. **InterSciencePlace**. v.1, p. 58-70, 2012.

NICOLODI, M. Qualidade do solo com vistas à agricultura conservacionista. In: BERTOL, I.; De Maria, I.C.; SOUZA, L.S. (Eds). **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Viçosa, MG: SBCS, 2019. 1355p.

NIERO, L.A.C.; DECHEN, S.C.F.; COELHO, R.M.; DE MARIA, I.C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1271-1282, 2010.

NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Vegetal, Nutrição Animal e Alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313p.

OLIVEIRA, J. R. S. **Qualidade de solo cultivado com cana de açúcar sob diferentes manejos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

PARRON, L.M. **Aspectos da ciclagem de nutrientes em função do gradiente topográfico em uma mata de galeria no Distrito Federal**. 2004. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PORTUGAL, A. F. **Resiliência da estrutura em Argissolo sob diferentes usos, na zona da mata de Minas Gerais**. 2005. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PRADO, H.; **Pedologia fácil: Aplicação em solos locais**: 5 ed. Piracicaba. 2016

RAIJ B. V. **Avaliação da fertilidade do solo**. Instituto da Potassa & Fosfato. p. 142, 1983.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. p.420

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo** 2.ed. Campinas: Fundação IAC, 1997. 285 p

REICHARDT, K. **A água nos sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987, p. 188

REIS, R.A.; MONNERAT, P.H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes (RJ-Brasil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p.67-372, 2002.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S.; CORRÊA, G.; KER, J. **Pedologia Base Para Distinção de Ambientes**: 4 ed. Viçosa – MG: Editora Neput, 2002. p. 338

RESENDE, T.M.; ROSOLEN, V. **Complementaridade das técnicas quantitativas e qualitativas nos estudos ambientais: o solo e o manejo como foco de pesquisa**.

In: MARAFON, G.J.; RAMIRES, J.C.L.; RIBEIRO, M.A.; PESSÔA, V.L.S. Pesquisa qualitativa em geografia: reflexões teórico conceituais e aplicadas. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2013, p. 473-484.

RODRIGUES, A. A. **Qualidade de solos em diferentes coberturas vegetais no bioma mata atlântica – ES**. 2019. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2019.

RONQUIM, C.S. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. EMBRAPA, Campinas, 2010.

ROSA, S.R. **Propriedades físicas e químicas de um solo arenoso sob o cultivo de Eucalyptus spp**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

ROSSETTO, R; SANTIAGO, A. D. **Árvore do Conhecimento Cana-de-açúcar: Correção e adubação**. 2022. Elaborado por AGEITEC. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao>>. Acesso em: 20 jun 2022.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, MG Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p. 100.

SHEPHERD, T.G. **Visual soil assessment. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country**. Horizons Regional Council, 2000. 84 p.

SILVA, F. L. R. et al. **Análise Visual Da Estrutura Do Solo Em Áreas De Cultivo De Cana-De-Açúcar**. ANAIS DO ENIC, 2021.

SILVA, F.R.; AQUINO, A.M.; MERCANTE, M.F.; GUIMARÃES, F. M. Macrofauna invertebrado do solo sob diferentes sistemas de produção em latossolo da região do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41(4), p. 697-704, 2006.

SSSA - Soil Science Society of America – **Glossary of Soil Science Terms**. Madison: 2008. 88p.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A. & TEIXEIRA, W.G.– **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, p. 573, 2017.

TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; MARTINS, G. C. **A Cor Do Solo: Interpretando As Cores Do Solo Com A Finalidade De Monitorar Processos De Recuperação Em Áreas**. Embrapa - Amazonia Ocidental. 2009 Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/195720/1/A-Cor-Do-Solo-Interpretando-as-Cores-Do.pdf>> Acesso em 03 set. 2021

TÔSTO, S. G.; PAIVA SOBRINHO, R.; ANDRADE, D. C. **Valoração ambiental da perda de solo na cultura da cana-de-açúcar sob colheita queimada e mecanizada no município de Araras, SP.** 2010. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL – SOBER, 48., 2010, Campo Grande, MS. Anais... Campo Grande, MS: ANPPAS/Iris, 2010.

UFSCAR - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. **Projeto pedagógico curso de graduação em engenharia agrônoma.** Araras, 2015.

USDA. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. **Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples.** Washington, DC, 1972. (USDA. Report, n. 1).

VALLADARES, G. S.; AVANCINI, C. S. A.; TÔSTO, S. G. **Uso e cobertura das terras do município de Araras.** Circular Técnica On-line ISSN 14-4182. EMBRAPA. Campinas, 2008

VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: ambientes de produção - desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. **Informações Agrônomicas**, São Paulo, v. 1, n. 110, p. 1-5, 2005.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, A. J. N.; OLIVEIRA, V. S.; SILVA, Y. A. B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.639-648, 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.743-755, 2009.

VIEIRA, L.; **Manual de morfologia e Classificação de Solos:** 2 Ed. São Paulo: Editora Agronomica Ceres, 1983.c

WANG, X. J.; GONG, Z. T. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. **Geoderma**, v. 81, p. 339-355, 1998.