

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Departamento de Física
Campus de Rio Claro

Vanir Dirley Partelli de Oliveira Leite

Transporte de CO₂ no Sistema Solo-Planta-Atmosfera

Rio Claro (S.P.) Brasil
2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Departamento de Física
Campus de Rio Claro

Transporte de CO₂ no Sistema Solo-Planta-Atmosfera

Autor: Vanir Dirley Partelli de Oliveira Leite

Orientador: Prof. Dr. Roberto Naves Domingos

Dissertação de Mestrado elaborado junto ao Programa de Pós-Graduação em Física como requisito para obtenção do título de Mestre na Área de Concentração em Física Aplicada.

Rio Claro
S.P. Brasil
2010

631.43 Leite, Vanir Dirley Partelli de Oliveira
L533t Transporte de CO₂ no Sistema Solo-Planta-Atmosfera /
Vanir Dirley Partelli de Oliveira Leite. - Rio Claro : [s.n.],
2010
101 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Roberto Naves Domingos

1. Física dos solos. 2. Cana-de-açúcar. 3. Efluxo de CO₂
do solo. 4. Radiação infravermelho. 5. Vibração molecular de
CO₂. 6. Mudanças climáticas globais. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Departamento de Física
Campus de Rio Claro

Transporte de CO₂ no Sistema Solo-Planta-Atmosfera

Vanir Dirley Partelli de Oliveira Leite

Dissertação de Mestrado elaborado
junto ao Programa de Pós-Graduação
em Física como requisito para obtenção
do título de Mestre na Área de Física.
Física Aplicada.

Prof. Dr. Roberto Naves Domingos – Orientador
IGCE – UNESP/RC

Prof. Dr. Alberto Ibáñez Ruiz
IGCE – UNESP/RC

Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori
Depto Eng. Química – UFSCAR/SC

Rio Claro, SP 31 de maio de 2010

Dedico

**À Deus pela força e segurança e,
às minhas filhas Grace e Mirela
pela paciência, confiança e amor.**

**“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor
mas lutamos para que o melhor fosse feito...
Não somos o que deveríamos ser, não somos o
que iremos ser, mas graças a Deus não somos o
que éramos...”**

Martin Luther King

“Sem a convicção de uma harmonia íntima do Universo, não poderia haver ciência. Esta convicção é, e continuará a ser, a base de toda a criação científica. Em toda a extensão dos nossos esforços, nas lutas dramáticas entre as velhas e as novas concepções, entrevemos a ânsia eterna de compreensão, a intuição inabalável da harmonia universal, que se robustece na própria multiplicidade dos obstáculos que se oferecem ao nosso entendimento”.

Einstein.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas, me suprir em todas as minhas necessidades, estar comigo nos momentos de conquista, alegria, felicidade e, por estar comigo todos os segundos da minha vida.

Ao meu pai Victorio (in memorian) e minha mãe Clarice, pelo amor, carinho, pela sólida formação dada em toda minha existência, pelo incentivo sempre para a continuidade nos estudos, meus eternos agradecimentos.

As minhas filhas Grace e Mirela e ao meu marido Renato pelo amor, carinho, compreensão nas alegrias, nas tristezas e nas ausências todos os adjetivos para agradecer.

Ao Prof. Dr. Roberto Naves Domingos, meu orientador, por ter-me recebido como sua aluna, pela paciência, amizade, incentivo, atenção e colaboração dispensada para a elaboração e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Gerson Antonio Santarine que se mostrou um grande amigo e apoiando com sugestões e incentivando para vencer esta etapa.

Aos professores Dr. Alberto Ibañez Ruiz e Dr. Dermeval José Mazzini Sartori pelas valiosas sugestões que em muito enriqueceram este trabalho.

A Profa. Dra. Deisy Piedade Munhoz, pelo ato solidário e cristão.

Ao Prof. Dr. Hari Mohan Gupta, pela amizade e aceitação para que eu fizesse parte deste curso, infelizmente pelos cumprimentos da lei da natureza não está presente fisicamente conosco, somente em nossos corações.

Ao Prof. Dr. Edson Denis Leonel, o amigo e excelente professor, sempre incentivando e apoiando para vencer os desafios da Física Estatística.

Ao Prof. Dr. Dimas Roberto Vollet e ao Prof. Dr Makoto Yoshida pelo apoio e confiança e permissão para a defesa do trabalho.

A todos os docentes e funcionários do Departamento de Física e do Centro de Estudos Ambientais (CEA) pela forma carinhosa, gentil com que sempre me trataram, e pela atenção que me deram nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. José Carlos Casagrande, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos SP. , que me acolheu e proporcionou muitas possibilidades para a coleta das amostras de campo, além de análise Química do Solo coletado e orientação sobre os resultados.

Ao amigo Leandro Xavier Moreno, pela participação efetiva na montagem do material utilizado nesta pesquisa, meu eterno agradecimento.

Aos amigos Carlos Egidio Santoro Vidal pelos desenhos técnicos e à Tabata Vidal pelo auxílio na elaboração dos gráficos e apoio técnico-gráfico na conclusão deste trabalho.

Ao Técnico do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos SP, Sr. Irlson que muito me ajudou nas coletas de amostras no Campus de Araras, SP.

Ao Técnico Allan do Departamento de Geologia – UNESP Rio Claro pela sugestão da forma de coleta de solo para evitar perda de CO₂.

Ao colega Alan Rodrigo Panosso do Departamento de Agronomia da UNESP – Jaboticabal SP, pela atenção dispensada no esclarecimento sobre a recalibração do LI-COR 840.

Aos meus amigos Edilson, Josiane e Renato pelo companheirismo e auxílio na caminhada deste curso.

Por fim, as outras pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram com este trabalho e aqui não são mencionadas, ficam meus agradecimentos.

RESUMO

A cultura de cana-de-açúcar no Brasil ocupa uma extensa área, devido a sua importância econômica e seu potencial na obtenção de bioenergia. É importante saber como esta cultura irá responder ao aumento previsto na concentração de gás carbônico (CO₂) atmosférico, uma vez que é um composto chave nos processos das mudanças climáticas globais. Sabendo que esse gás é emitido tanto pelas folhas como pelas raízes das plantas e difundido pelo solo, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia para a quantificação de CO₂ de solo em condições de laboratório para simular as situações de campo em ambiente controlado. A abordagem utilizou 15 frascos de vidro com capacidade para 2,8 L, fechados com sistema de válvulas para entrada de ar e saída de CO₂ acoplados a um analisador de gases LI-COR 840. O experimento também envolveu coleta de solos em área de Latossolo Vermelho Distroférico típico de textura argilosa, com cultura de cana-de-açúcar em três localidades, sendo uma área coberta com palhada e plantas adultas, outra área arada e gradeada com colmo em brota e outra área desnuda em descanso após colheita de soja. Estas amostras foram peneiradas com malhas de 2,5 mm e 5 mm e secas na sombra ao ar livre num período de 25 dias. Em cada frasco foi acondicionado 1300 g de solo por 20 dias para verificar a atividade do solo em formação de CO₂, que foi medida pela câmara respirométrica a qual possui leitor ótico de raios infravermelho não dispersivo, capaz de medir CO₂ ativo por vibrações moleculares. Os dados obtidos no sistema demonstraram formação de um valor médio de 483,85 ppm de emissão de CO₂, valor este que condiz com o meio natural quando isento de vegetação.

Palavras-chave: Física dos solos. Cana-de-açúcar. Efluxo de CO₂ do solo. Radiação infravermelha. Vibração molecular do CO₂. Mudanças climáticas globais.

ABSTRACT

The cultivation of sugar cane in Brazil occupies a large area due to the economic importance of this crop and its potential for bioenergy. It is important to know how the crop will respond to the increase in the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, since this gas is a key component in the processes of global climate change. This gas is emitted by both the leaves and the roots of plants and distributed throughout the soil. The objective of this study was to develop a methodology for the measurement of CO₂ from soil in laboratory conditions to simulate field situations in a controlled environment. The approach used 15 glass bottles with a capacity of 2.8 L, closed with a valve system for air intake and CO₂ output coupled to a gas analyzer LI-COR 840. The study also involved collection of soil in the area of Hapludox clayey, with growing sugar cane in three locations and an area covered with straw and adult plants, another area plowed and fenced with sprouts and in stem other denuded areas at rest after soybean harvest. These samples were sieved with meshes of 2.5 mm and 5 mm and dried in the shade outdoors in a period of 25 days. In each vial, samples were taken each day for 20 days consisting of 1300 g of soil to verify the activity of soil formation of CO₂, which was measured by the respiration chamber, which has an optical reader of non-dispersive infrared rays, capable of measuring CO₂ by active molecular vibrations. The data obtained in the system showed the formation of an average of 483.85 ppm of CO₂ emissions, a figure that matches the natural environment when free of vegetation.

Keywords: Sugar cane. Soil Physics. Soil CO₂ Eflux. Molecular vibration of CO₂. Infrared radiation. Global climate change.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Representação de níveis quânticos de energia | 23 |
| Figura 2 – Espectro eletromagnético e classificação das regiões espectrais | 25 |
| Figura 3 – Níveis de energia vibracional de uma molécula diatômica | 29 |
| Figura 4 – Representação da vibração de uma molécula diatômica | 29 |
| Figura 5 – Modelo de vibração de dois corpos | 30 |
| Figura 6 – Modos normais de vibração de uma molécula de CO ₂ | 34 |
| Figura 7 – Modos de vibração de moléculas triatômicas lineares, CO ₂ | 35 |
| Figura 8 – Modos de vibração da molécula de água | 37 |
| Figura 9 – Vista interna do LI-COR 840 | 39 |
| Figura 10 – Esquema do banco ótico do LI-COR 840 | 39 |
| Figura 11 – Ciclo hidrológico | 45 |
| Figura 12 – Sistema de radiação Terra/Atmosfera | 50 |
| Figura 13 – Variação de temperatura em função do tempo | 52 |
| Figura 14 – Emissões de gases de efeito estufa | 55 |
| Figura 15 – Mudanças do sistema climático em função do tempo | 56 |
| Figura 16 – Campus de Ciências Agrárias de Araras – UFSCAR | 64 |
| Figura 17 – Local de coleta das amostras de solo | 65 |
| Figura 18 – Q1 Solo sem cobertura de soja após colheita de soja | 66 |
| Figura 19 – Q5 Solo preparado com colmos em brota | 67 |
| Figura 20 – Q10 Solo com cobertura vegetal (palhada), planta adulta | 67 |
| Figura 21 – Esquema do dispositivo de Coleta de solo | 68 |
| Figura 22 – Solo em processo de secagem | 72 |
| Figura 23 – Sistema: reservatório de solo para medição de liberação CO ₂ | 73 |
| Figura 24 – Sistema de armazenamento de solo para medida de CO ₂ | 74 |
| Figura 25 – Compressor de ar com conector de mangueira | 75 |
| Figura 26 – Medição de CO ₂ com o analisador de gases LI-COR 840 | 75 |
| Figura 27(a) – Representação espacial da quantificação de CO _{2(g)} e H ₂ O _(v) | 78 |
| Figura 27(b) – Representação plana da quantificação de CO _{2(g)} e H ₂ O _(v) | 78 |
| Figura 28(a) – Concentrações de CO _{2(g)} emitido pelo solo | 79 |
| Figura 28(b) – Concentrações de H ₂ O _(v) emitido pelo solo | 79 |

| | |
|--|-----|
| Figura 29 – Relação entre o fluxo de $\text{CO}_{2(g)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ e valores médios de cada tipo de solo | 80 |
| Figura 30 – Valores médios de $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ para os três tipos de solo | 81 |
| Figura A1 – Esquema de montagem do coletor de amostra de solo | 99 |
| Figura A2 – Representação da parte lateral do coletor de amostra de solo | 100 |
| Figura A3 – Representação da base e do dispositivo de fixação do coletor de amostra de solo | 101 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Distribuição percentual média de gases da atmosfera terrestre | 51 |
| Tabela 2 – Principais gases causadores do efeito estufa | 51 |
| Tabela 3 – Análise físico-química das amostras de solo | 69 |
| Tabela 4 – Medidas de emissão de CO _{2(g)} e H _{2O(v)} do solo | 77 |
| Tabela 5 – Média aritmética das medidas de emissão de CO ₂ e H _{2O} do solo | 77 |
| Tabela A1 – A região do Infravermelho | 96 |
| Tabela A2 – Conversão de unidades de medida no infravermelho | 97 |
| Tabela A3 – Bandas de vibração no infravermelho de CO ₂ | 98 |

LISTA DE SIGLAS

Amcham – Câmara de Comércio Americana
CCL – Complexo de captação de luz
CERs – Certificado de Emissões Reduzidas
CO₂ – dióxido de carbono / gás carbônico
CONAB – Companhia Nacional de abastecimento
COP – Conferência das partes
COP 15 – 15ª Conferência das Partes
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CQNUMC – Convenções Quadro das Nações Unidas em Mudanças Climáticas
DOU – Diário Oficial da União
FBDS – Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável
GEEs – Gases do Efeito Estufa
IAF – Índice de área foliar
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IR – infra red / raio infravermelho / radiação infravermelha
MDL – Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MDL – Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
NDIR – Radiação infravermelha não dispersiva
ONU – Organização das Nações Unidas
ppm – parte por milhão
ppt – parte por trilhão / mili mol
RECE – Relatório especial sobre Cenário de Emissões
UNFCCC – Convenções-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| RESUMO | i |
| ABSTRACT | ii |
| LISTA DE FIGURAS | iii |
| LISTA DE TABELAS | v |
| LISTA DE SIGLAS | vi |
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 OBJETIVOS | 21 |
| 2.1 Objetivos gerais | 21 |
| 2.2 Objetivos específicos | 21 |
| 3 REVISÃO DE LITERATURA | 22 |
| 3.1 Introdução | 22 |
| 3.2 Luz e o espectro eletromagnético | 23 |
| 3.3 Interação da matéria com a radiação eletromagnética | 24 |
| 3.4 Mecânica dos sistemas moleculares: absorção de radiação Infravermelha | 27 |
| 3.4.1 Excitação de moléculas pela radiação no infravermelho | 27 |
| 3.4.1.1 Espectro infravermelho do dióxido de carbono | 33 |
| 3.4.1.2 Espectro infravermelho da água | 36 |
| 3.5 Analisadores de gases clássicos | 37 |
| 4 PLANTAS | 40 |
| 4.1 Introdução | 40 |
| 4.2 As plantas e o dióxido de carbono | 40 |
| 4.2.1 Fotossíntese: comparação fotossintética entre o sistema C ₃ e C ₄ | 41 |
| 4.2.2 Cana de açúcar e emissão de dióxido de carbono | 43 |
| 4.3 As plantas e a água | 44 |
| 4.4 Solo | 47 |
| 5 AQUECIMENTO GLOBAL E MERCADO DE CARBONO | 49 |
| 5.1 Efeito estufa | 49 |
| 5.2 Convenções climáticas no mundo | 53 |
| 5.2.1 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) | 54 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2 Protocolo de Quioto | 58 |
| 5.2.3 O Brasil e o Protocolo de Quioto | 60 |
| 5.2.4 COP 15 | 61 |
| 6 MATERIAIS E MÉTODOS | 63 |
| 6.1 Área experimental | 63 |
| 6.2 Condições experimentais | 66 |
| 6.2.1 Análise química do solo | 68 |
| 6.2.2 Procedimentos | 71 |
| 6.2.2.1 Coleta de amostras de solo | 71 |
| 6.2.2.2 Montagem do sistema para medição de dióxido de carbono | 72 |
| 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 76 |
| 7.1 Análise da Emissão de CO ₂ e vapor de água em relação a granulometria do solo | 82 |
| 7.2 Análise quanto à presença e intensidade de vegetação no solo | 83 |
| 8 CONCLUSÃO | 85 |
| 9 RECOMENDAÇÕES | 87 |
| 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 88 |
| ANEXO A | 96 |
| ANEXO B | 98 |
| ANEXO C | 99 |

1 INTRODUÇÃO

As plantas, animais e microrganismos que vivem em uma área e que constituem uma comunidade biológica, estão interligados por uma complexa rede de relações funcionais que inclui o meio ambiente no qual existem (REICHARDT, 1985).

Estas relações funcionais entre organismos vivos e o conjunto de componentes físicos, químicos e biológicos interdependentes e o meio ambiente, constitui o ecossistema. A biosfera, extraordinariamente pequena em relação às dimensões do planeta Terra mas a única forma de vida conhecida no universo, pode ser considerada como um ecossistema.

Sabe-se que, aproximadamente, 400 milhões de anos com o desenvolvimento vegetal a atmosfera foi enriquecida com o gás oxigênio, gás nitrogênio, gás argônio, gás carbônico e vapor de água, que se manteve inalterada por séculos nesse sistema fechado com a ajuda das plantas, animais e microrganismos, que usam e retornam esses gases para o sistema, lembrando a lei de conservação de massa de Lavoisier, “Nada se cria, tudo se transforma”.

O sistema Água-Solo-Planta-Atmosfera, como parte da biosfera, está sujeito a leis e princípios impostos pela natureza.

Do ponto de vista do homem, ele é o fornecedor das substâncias inorgânica, o produtor de seus alimentos e o decompositor que permite fechar o ciclo (REICHARDT, 1985).

Estima-se que a população de Homo sapiens foi de 5 milhões há 8000 anos passados, chegando a 1 bilhão em 1850. Vê-se claramente que, neste período, existia um equilíbrio perfeito entre o homem e a natureza (REICHARDT, 1985).

Hoje, a população mundial estimada em aproximadamente 6,5 bilhões de habitantes humanos (IBGE, 2007), é o fundamento de uma série de ameaças ao planeta. Entre estes destacam-se as mais variadas fontes de poluição ambiental, que provoca um afastamento do equilíbrio dinâmico que, na maioria das vezes, pode ser considerado irreversível (IBGE,2007).

O sistema Água-Solo-Planta-Atmosfera, sofre uma influência típica do homem através da poluição atmosférica, assunto que remete à questão do aquecimento global, provocada pelo aumento do chamado efeito estufa, responsável pelas mudanças climáticas que no momento é a “estrela” na mídia, devido ao Protocolo de Quioto. No entanto apesar desse interesse, poucos compreendem, efetivamente, o que tudo isto significa e as suas consequências para a vida na Terra.

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a queima de combustíveis fósseis transfere para a atmosfera do planeta 5,5 bilhões de carbono/ano, grande parte em forma de gás carbônico. Além disto, tem-se mais 1,6 bilhões de toneladas de carbono que chegam anualmente à atmosfera devido às queimadas e desmatamentos. Desse total de gases estufa, 3,2 bilhões de carbono/ano ficam acumulados na atmosfera e 2 bilhões são absorvidos pelo oceano. Agora, para fechar este balanço, resta saber para onde estão indo 1,9 bilhões de toneladas de carbono.

O dióxido de carbono (CO₂) encontra-se atualmente na atmosfera numa quantidade de cerca de 350 ppm (partes por milhão), pois este valor vem sendo acrescido anualmente, devido à queima de combustíveis fósseis, desmatamentos, queimadas e uso inadequado da terra. Entretanto, as quantidades na atmosfera e na vegetação terrestre são aproximadamente a mesma, porém são muito pequenas comparadas com as quantidades na crosta terrestre e dos oceanos.

Para isso se faz necessário mensurações em ecossistemas distintos, como Floresta, Cerrado, Pastagem e Solos de Exploração Agrícola merecendo destaque a cultura da soja e da cana-de-açúcar. A plantação de soja ocupa hoje no Brasil, 22,5 milhões de hectares, destinadas para extração de óleos, biodiesel, tintas, vernizes e outras aplicações menos comuns (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2008)

A cana-de-açúcar tornou-se monocultura em muitas regiões e, de acordo com dados da CONAB (2008), a área plantada no Brasil neste ano foi de 7,01 milhões de hectares. Para o ano de 2010 mais 60 milhões de hectares, distribuídos em 16 estados, foram liberados pelo governo para serem explorados com cana-de-açúcar e visando minimizar os riscos de perda em função de adversidades climáticas é indicado a melhor época de plantio para cada região (DOU, 24/11/2009).

Com estas medidas realizadas serão feitas considerações de como ecossistemas tão heterogêneos se comportam na emissão de CO₂ para atmosfera.

Uma função comum a todos os ecossistemas terrestres é a sua capacidade de emitir ou sequestrar carbono. Diante desta proposição é preciso saber se uma cultura tão vasta de cana-de-açúcar é um sorvedor ou emitante de carbono para atmosfera. A intervenção artificial, isto é, o preparo do solo na agricultura causa um impacto ainda desconhecido, mas já explorado por grupos de pesquisadores preocupados em desvendar o impacto do preparo do solo para as diferentes culturas. De acordo com as pesquisas do Físico NEWTON LA SCALA JUNIOR, que coordena o estudo na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da UNESP, em Jaboticabal, o solo utilizado na agricultura passa a ser um emissor de CO₂ principalmente quando está livre de vegetação, na época de chuvas, aguardando novo plantio. “Coisas como o uso de enxada rotativa, a velocidade do trator, a velocidade das pás, tudo isso afeta a ação do solo na emissão do CO₂” e acrescenta, “As estimativas vão desde a algo próximo de zero a até o correspondente a 40% de toda a atividade industrial”; diz NEWTON LA SCALA JUNIOR, à folha de São Paulo (2005). Um destes entendimentos é o monitoramento da respiração do solo e outros parâmetros que possam ter correlação com os mesmos, de modo a quantificá-los e relacioná-los.

Assim pode-se verificar quais as interações físicas, químicas e biológicas entre o solo, plantas e atmosfera, e suas conseqüências para as mudanças climáticas do globo quando se substitui as florestas por pastagens e culturas agrícolas.

O artigo da revista Exame (11 novembro de 2009), afirma que o Brasil está se preparando para ocupar um papel de destaque nos novos tempos devido o domínio de tecnologias, como a de bioenergia, com destaque para o etanol, e diz “[...] além de não ser poluente, também permite o seqüestro de carbono da atmosfera, durante o cultivo da cana-de-açúcar”.

Especialistas discutem a importância de não só levar uma meta para Copenhague, como acima de tudo cumpri-la, pois o Brasil tem tradição em deixar idéias boas no papel. (PORTAL EXAME, 2009)

Diante do exposto a importância de um trabalho integrado da Biologia, Química e Física Aplicada, são entendidas como suporte para uma tecnologia avançada, ao contrário da investigação básica. A revolução técnico-científica modificou radicalmente o papel que a ciência desempenha na vida da sociedade e, conduz a humanidade a uma reorganização e aperfeiçoamento de todos os domínios da produção, e como consequência torna muito atual o problema da proteção do meio ambiente.

A física aplicada tem como princípio conceitos básicos das ciências físicas que enxerga o ser vivo ocupando um lugar no espaço, em um meio ambiente no qual interage e relaciona o uso de princípios científicos em aparelhos e destaca uma combinação de fatores como a motivação e a atitude dos investigadores e a natureza das relações para com a tecnologia ou a ciência que pode ser afetada pelo seu trabalho.

Com o avanço das pesquisas em bioenergia a partir da cana-de-açúcar e o crescimento das áreas ocupadas por esta gramínea, justifica a intenção deste trabalho em colaborar para minimizar as mudanças climáticas no Planeta Terra e, oferecer sugestões e dados para incansáveis pesquisas que irão se desenvolver para garantir um futuro mais limpo e equilibrado.

O desenvolvimento de metodologia para quantificação de CO_2 de solo em condições de laboratório é para facilitar o manejo controlado simulando situações de alterações climáticas, umidade do solo, intensidade luminosa, medidas do processo fotossintético, dentre outras variáveis simulando as situações de campo em ambiente controlado.

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de estudos sobre a emissão de gases de efeito estufa em solo canavieiro que hoje ocupa uma extensa área no Brasil tendo como uma das finalidades a bioenergia e, gerar informações científicas para propor alternativas para futuros trabalhos interdisciplinares que possa embasar programas de proteção sócio-ambiental de tal forma a melhorar a sustentabilidade da cadeia produtiva do Etanol em âmbito regional, nacional e internacional baseadas nas diretrizes do desenvolvimento sustentável.

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema para a quantificação de CO₂ no solo de cultivo de cana-de-açúcar pelo método de absorção de radiação infravermelha em condições de laboratório.

2.2 Objetivos Específicos

1- Desenvolver a metodologia para a quantificação de CO₂ de solo em condições de laboratório, para direcionar futuras pesquisas simulando as situações de campo em ambiente controlado;

2- Quantificar pelo método de absorção de infravermelho a emissão de CO₂ trocado na preparação e uso do solo para fins de cultivo de cana-de-açúcar nos sistemas de solo desnudo com palhada de soja, solo preparado mecanicamente com cana em brota e solo com cana em fase de corte, relacionando a granulometria do solo e a emissão de CO₂ e vapor de água;

3- Auxiliar na compreensão de sequestro de carbono e o impacto na produtividade das culturas de cana-de-açúcar (gramínea tropical) de grande importância econômica e a sua contribuição às mudanças globais;

4- Desenvolver a integração entre linhas de pesquisas visando o fomento primordial da área de física aplicada integrada a outras áreas do conhecimento mediante o fortalecimento de uma visão holística que é fundamental para discussão dos problemas ambientais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Introdução

A Terra emite energia como qualquer outro corpo aquecido e, a quantidade de energia que o planeta absorve e libera devem ser iguais para que a temperatura se mantenha constante (BAIRD, 2002).

Essa energia é proveniente principalmente do Sol e a quantidade máxima de energia situa-se na região da luz visível de comprimento de onda entre 0,40 μm e 0,75 μm , isto é, de 400 nm a 750 nm. Além desta, a Terra recebe também energia da região de raios infravermelhos (IR) situada entre 0,8 μm e 3 μm (800 nm a 3000 nm).

De toda energia recebida do Sol pelas camadas superiores da atmosfera, cerca de pouco mais que a metade é IR e o restante é luz visível (BAIRD, 2002).

Essa energia emitida se situa na região do infravermelho – infravermelho térmico, apresentando comprimentos de onda que variam de 4 μm a 50 μm .

Alguns gases presentes no ar podem absorver temporariamente luz infravermelha térmica de comprimentos de onda específicos, como o CO_2 que após absorção de IR o reemite em todas as direções, de modo completamente aleatório.

O entendimento detalhado do mecanismo de absorção de luz com ênfase principal no comportamento dos gases presentes na atmosfera em relação à absorção dos raios IR é de grande importância para o desenvolvimento deste trabalho. Este capítulo tem a finalidade de descrever, de modo detalhado, tais tópicos, com ênfase nas vibrações moleculares e os diferentes tipos de vibrações.

O desenvolvimento teórico utilizado como referência para o entendimento deste item está detalhada em ALMEIDA (2002).

3.2 Luz e o espectro eletromagnético

O trabalho de Einstein, Planck e Bohr indicou que, em muitos aspectos, a radiação eletromagnética poderia ser considerada como uma corrente de partículas (ou quanta) nos quais a energia, E , é dada pela equação de BOHR, como segue:

$$E = h\nu \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s) e ν é equivalente à frequência clássica (STUART, 2005; NETO, 2004).

Processos de mudança, incluindo aqueles de vibração e rotação associado a espectroscopia no infravermelho, pode ser representada em termos de níveis de energia quantizada discreta E_0, E_1, E_2, E_3 , etc., como mostra a figura 1.

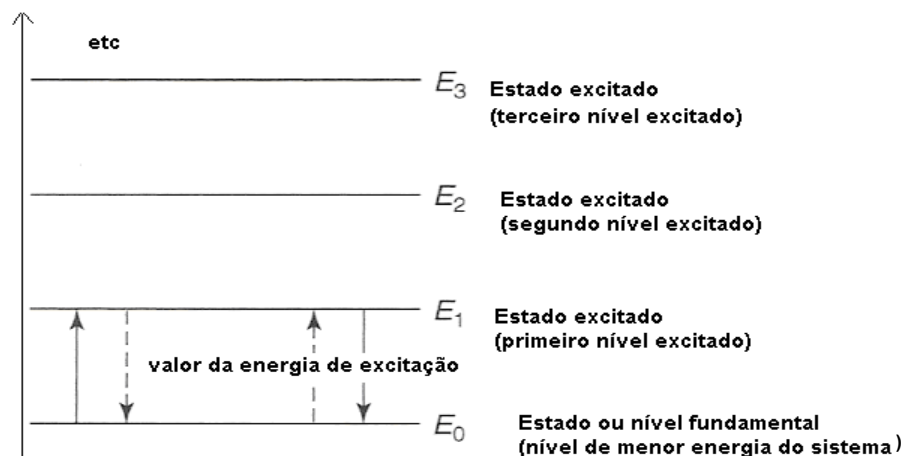


Figura 1 – Representação de níveis quânticos de energia (STUART, 2005; NETO, 2004, adaptada)

Segundo Bohr a energia de um elétron é quantizada, isto é, é restrita a determinados valores, com emissão de energia descontínua (NETO, 2004).

Sempre que um átomo ou molécula interage ocorre emissão ou absorção de energia e, em cada caso, segue exatamente uma certa quantidade de energia ($E_1 - E_0$ ou $E_2 - E_1$) representada pela equação:

$$\Delta E = E_1 - E_0 \quad (2)$$

Então:

$$\Delta E = h\nu \quad (3)$$

Assim, a frequência de emissão ou absorção de radiação para uma transição entre a energia do estado E_0 e E_1 é dada por:

$$\nu = \frac{E_1 - E_0}{h} \quad (4)$$

Associados com a captação de energia de absorção quantizada algum mecanismo de desativação ocorre e o átomo ou molécula retorna ao seu estado original.

Associados com a perda de energia por emissão de um quantum de energia ou fóton, algum mecanismo de excitação ocorre e o elétron tende a voltar à órbita primitiva (mais estável). Ambos os mecanismos associados são representados pelas linhas pontilhadas na figura 1.

3.3 Interação da matéria com a radiação eletromagnética

A mecânica clássica descreve o comportamento dos objetos em termos de duas equações. Uma afirma que a energia total é constante na ausência de forças externas e a outra expressa a resposta das partículas em decorrência das forças que atuam sobre elas (ATKINS; PAULA, 2002). Todavia, quando se aplica ao movimento de partículas muito pequenas essas leis apresentam falhas que acabam amparadas pela mecânica quântica. A essência das soluções corresponde a três tipos de movimentos: translação, vibração e rotação, pois são as formas das moléculas armazenarem energia. Em consequência, a quantização da energia aparece como resultado natural da equação de ondas e das condições impostas a ela (SOLOMONS, 1986; ATKINS; PAULA, 2002).

As moléculas na fase gasosa efetuam movimento de translação e a energia cinética contribui com a energia interna das partículas. As moléculas também têm energia cinética de rotação, e as transições podem ser observadas através de espectros (MOORE, 1976; SOLOMONS, 1986; ATKINS; PAULA, 2002).

Nas vibrações as moléculas também armazenam energia, e as transições entre os estados de vibração se manifestam nos espectros de infravermelho (ATKINS; PAULA, 2002).

A figura 2 resume as frequências, comprimentos de onda e números de onda da radiação nas diversas regiões do espectro eletromagnético e, também, aponta o tipo de excitação molecular pertinente e característico de cada região.

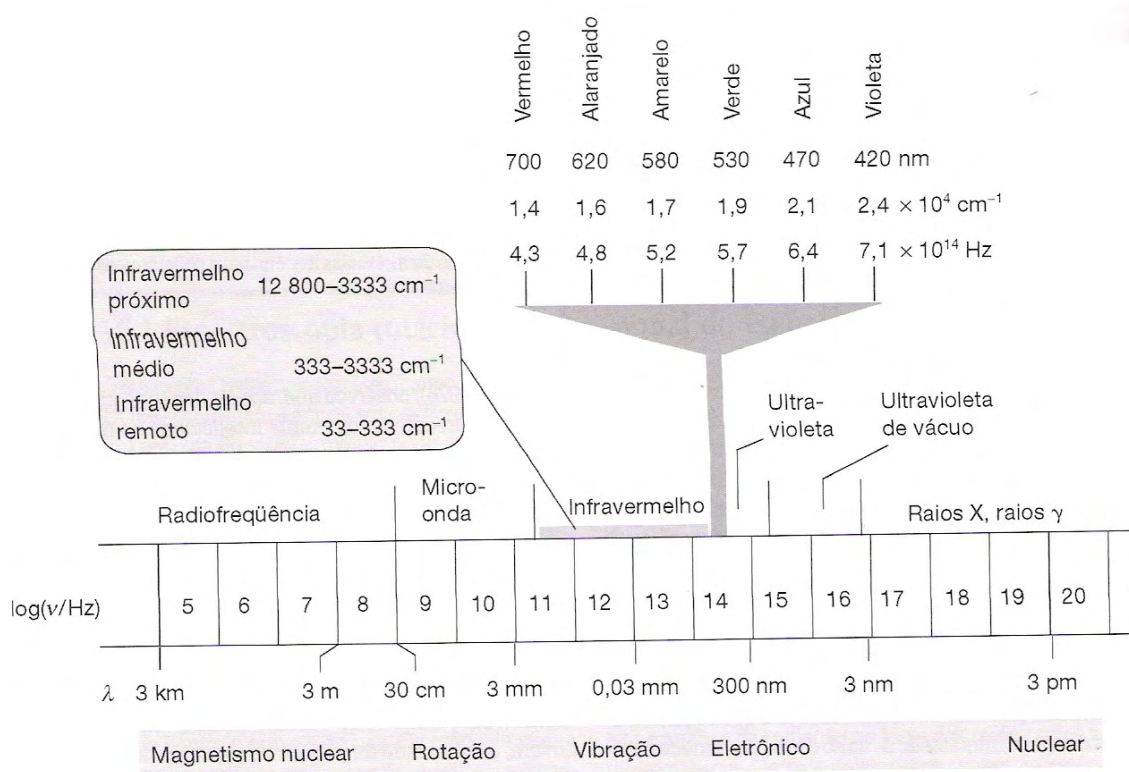


Figura 2 – Espectro eletromagnético e classificação das regiões espectrais (ATKINS; PAULA, 2002, p. 198)

Segundo NETO (2004), se um sistema material for submetido à influência de luz ou, de uma maneira mais geral, de radiação eletromagnética, ele pode reagir de várias formas: ser transparente à radiação, refleti-la (refração ou dispersão) ou absorvê-la.

A forma de transparente não apresenta interação de radiação com a matéria. Refletir apresenta uma forma de interação “mecânica” da radiação com o sistema, desprovida do componente físico-químico. A absorção é a forma que define a interação físico-química e a estrutura microscópica da matéria.

Substituindo E_0 por M_0 e E_1 , E_2 , E_3 , etc. por M^* : ao absorver radiação, o sistema passa do seu nível energético fundamental (M_0) para um nível energético excitado (M^*); a energia de excitação é igual a quantidade de energia associada ao fóton absorvido ($E = h\nu$, onde h = constante de Planck e ν a frequência da radiação eletromagnética), logo:



Uma vez absorvida a radiação, a energia correspondente se distribui pelas partes do sistema transformando-o em um novo sistema. Essas mudanças ocorrem devido às variações das coordenadas de espaço e tempo das partes da molécula criando uma nova ordem mecânica no sistema.

Do ponto de vista termodinâmico, estes estados são instáveis e tendem a voltar rápido ao seu estado fundamental estável. A excitação pela radiação eletromagnética se estende de picossegundos a não mais que milissegundos. Esse processo de “volta” é denominado de relaxamento ou relaxação.

O fenômeno do relaxamento resulta de uma combinação de fenômenos elementares. Nos fenômenos elementares mais comuns, a energia em excesso da molécula excitada pode ser:

a) Transferida a outras moléculas que com ela se choquem, sob a forma de energia cinética que corresponde ao fenômeno de aquecimento do sistema,

b) Acumulada no próprio sistema sob forma de energia química, em uma nova estrutura molecular estável, resultante de transformação da primeira, que corresponde aos fenômenos envolvidos com a fotoquímica,

c) Devolvida ao meio ambiente na forma de energia radiante, de menor energia que a radiação que a excitou corresponde aos fenômenos de fluorescência e fosforescência.

3.4 Mecânica dos sistemas moleculares: absorção de radiação infravermelho

A radiação na região do infravermelho é baseada nas vibrações moleculares (figura 2) e os diferentes tipos de vibrações entre átomos ocorrem de acordo com suas ligações interatômicas.

A radiação não tem energia suficiente para causar a excitação de elétrons, mas faz com que os átomos vibrem em torno das ligações covalentes que os unem. As vibrações são quantizadas e, quando ocorrem, os compostos absorvem energia infravermelha em determinadas regiões do espectro que causa rotações das moléculas e estas absorções dão origem aos espectros rotacionais (SOLOMONS, 1986). A energia necessária para excitar uma molécula a seus níveis vibracionais de maior energia é maior que a correspondente para excitar níveis rotacionais que, por sua vez, é maior que a necessária para excitar os níveis de translação (NETO, 2004). Então, em cada nível vibracional, ou em cada estado ou configuração vibracional de uma molécula podem existir diversos níveis ou estados rotacionais.

3.4.1 Excitação de moléculas pela radiação no infravermelho

A radiação do infravermelho é conhecida como radiação de calor. Este fenômeno se caracteriza pelo fato de seus fótons terem energia compreendida entre 0,1 e 37 kcal.mol⁻¹. Também, por ser um sistema de ondas que caminham em linha reta à velocidade de 3.10⁸ m.s⁻¹, pode ser caracterizada pelo seu comprimento de onda e pela sua frequência.

No anexo A encontra-se a tabela A1 que mostra os limites do infravermelho nas várias grandezas e unidades comumente utilizadas para representá-lo e a tabela A2 de expressões de conversão entre elas.

A excitação de moléculas pela radiação do infravermelho pode ser observada na figura 3, que mostra que a qualquer valor de energia da molécula correspondem dois valores de distâncias interatômicas – uma “distância curta”, d_c , e uma “distância longa”, d_l . As duas posições representam o estado da molécula, pois esta vibra de uma para a outra e de volta indefinidamente, no estado fundamental e no estado excitado como representado de maneira mais clara na figura 4.

Outra característica a ser ressaltada é o ponto de coordenadas E_{\min} , d_e , que corresponde ao valor mínimo de energia e ao valor da distância interatômica de equilíbrio descrita pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg:

$$\Delta E \times \Delta x \cong h \quad (6)$$

o produto da incerteza no valor da energia de uma partícula pela incerteza no valor da posição é da ordem do valor da constante de Planck ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s).

Quando aplicado ao sistema de dois átomos, através da mecânica quântica, os níveis de energia permitidos para um oscilador harmônico são da forma:

$$E_{vib} = (n + \frac{1}{2})h\nu_0 \quad (7)$$

n pode assumir o valor zero ou qualquer valor inteiro e ν_0 é a frequência com que o sistema vibraria se as equações clássicas fossem usadas e é dada pela expressão:

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (8)$$

Nesta expressão, k é o módulo de Rigidez (constante de força) da ligação e μ a massa reduzida do sistema, definida pela expressão:

$$\frac{1}{\mu} = \sum_i \frac{1}{m_i} \quad (9)$$

onde m_i é a massa da partícula i .

No estado fundamental ($n = 0$) o valor da energia é $\frac{1}{2} h\nu_0$ e o sistema vibra com frequência ν_0 .

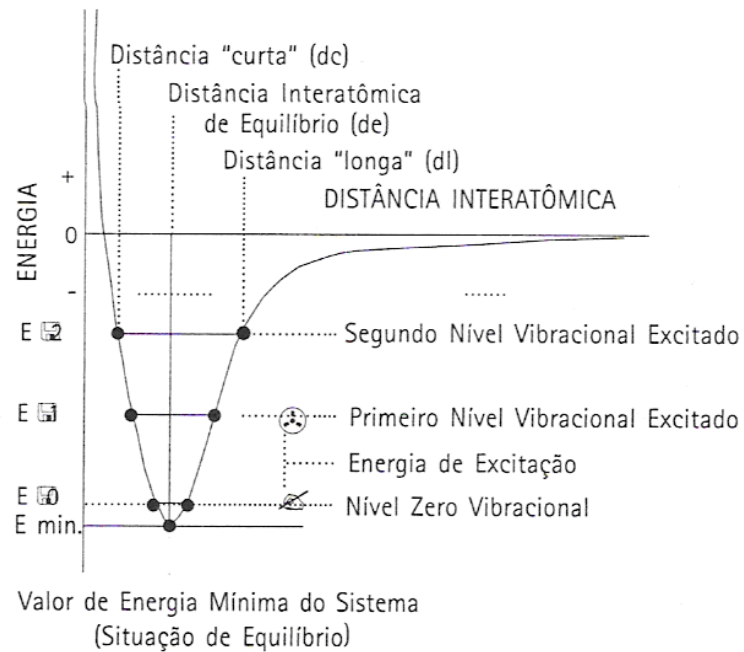


Figura 3 – Níveis de energia vibracional de uma molécula diatômica (NETO, 2004, p.356)

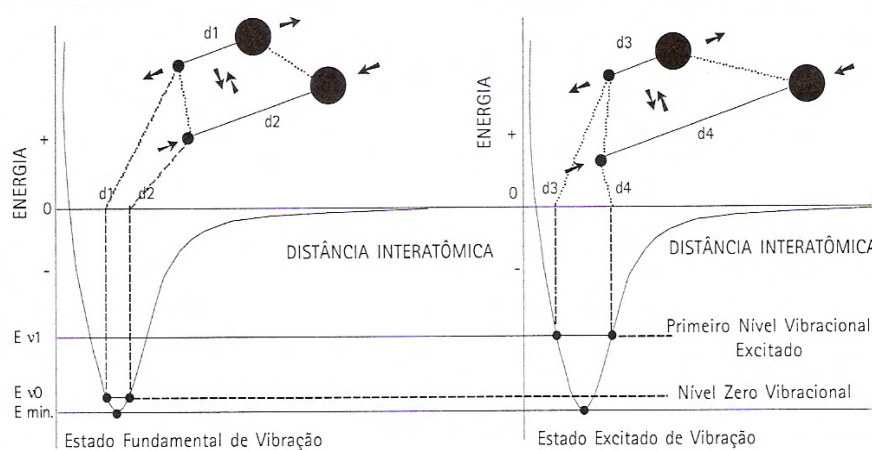


Figura 4 – Representação da vibração de uma molécula diatômica (NETO, 2004, p.358)

A relação da frequência de absorção da radiação eletromagnética estimulante com a natureza dos átomos e ligações de uma molécula é descrita pela

lei de Hooke proposta para sistemas macroscópicos (oscilador harmônico) – “em um sistema vibrante, a força de restauração é proporcional ao afastamento dos corpos do seu ponto de equilíbrio”.

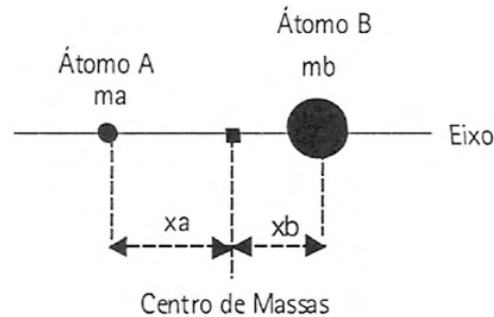


Figura 5 – Representação de vibração de dois corpos (NETO, 2004, p.360)

A figura 5 mostra que o processo de vibração de dois corpos pode ser representado em função de um sistema de eixos coordenados. O “centro de vibração” do sistema é o seu centro de massas, que é caracterizado pela expressão:

$$m_A x_A = m_B x_B \quad (10)$$

lembrando que:

m_i = massa do átomo i ,

x_i = distância do centro do átomo i ao centro de massas do sistema.

Se X_A for a distância de equilíbrio do átomo A (em relação ao centro de massa) e se em dado instante a distância x_A for diferente de X_A , segundo a lei de Hooke uma força de restauração se estabelece (em busca de equilíbrio) proporcional ao afastamento ($x_A - X_A$), então, se

$$F_A = -k (x_A - X_A) \quad (11)$$

sendo, F_A = força de restauração que atua sobre A,

k = constante de proporcionalidade, também denominada de rigidez, módulo de rigidez ou constante de força de restauração do sistema.

Aplicando a terceira lei de Newton (a uma força corresponde uma aceleração),

$$F_A = m_A d^2 x_A / dt^2 \quad (12)$$

Pode-se escrever,

$$m_A (d^2 x_A / dt^2) = -k(x_A - X_A) \quad (13)$$

ao mesmo tempo que,

$$m_B (d^2 x_B / dt^2) = -k(x_B - X_B) \quad (14)$$

considerando que:

$$m_A x_A = m_B x_B$$

$$x_A + x_B = x \text{ (distância interatômica em um instante t),}$$

$$X_A + X_B = X \text{ (distância interatômica de equilíbrio),}$$

$$\left(\frac{1}{\mu}\right) = \left(\frac{1}{m_A}\right) + \left(\frac{1}{m_B}\right) \text{ (}\mu \text{ é a massa reduzida do sistema),}$$

tem-se que,

$$(d^2 x / dt^2) = -(k / 2\mu)(x - X) \quad (15)$$

se

$$d^2 x = d^2 (x - X) \quad (16)$$

substituindo

$$d^2 (x - X) \quad (17)$$

tem-se,

$$(x - X) = A \sin (2\pi \nu t + \phi) \quad (18)$$

onde A = amplitude da vibração;

ϕ = ângulo de fase;

ν = frequência de vibração;

porém,

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\pi} \times \frac{k}{\mu} \quad (19)$$

Segundo NETO (2004), para haver absorção de radiação é necessário que a frequência de vibração do sistema material seja a mesma que a do fóton correspondente.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (20)$$

Reescrevendo,

$$\bar{\nu} [cm^{-1}] = 4,1208 \sqrt{\frac{k [dyn/cm]}{\mu [mol \cdot g]}} \quad (21)$$

onde: ν = número de ondas por centímetro da radiação excitante (cm^{-1});

$$4,1208 = N^{1/2} / 2\pi c;$$

c = velocidade da luz ($2,998 \cdot 10^{10}$ cm/s);

k = módulo de rigidez constante de força de ligação (dyn/cm);

μ = massa reduzida do sistema (mol-grama),

N = número de Avogadro ($6,0254 \cdot 10^{23}$ moléculas/ mol).

Esta expressão mostra que a frequência de absorção depende da natureza dos átomos, através da massa reduzida do sistema e da ligação entre eles, através de seu módulo de rigidez. Prevê de um modo simples, o valor da absorção de uma ligação quando um de seus átomos é substituído por um isótopo (apresenta massa diferente, mas mesmo módulo de rigidez)

$$\bar{\nu} / \bar{\nu}' = (\mu / \mu')^{1/2} \quad (22)$$

onde:

$\bar{\nu}'$ = frequência de absorção de um par de átomos de uma ligação;

$\bar{\nu}$ = frequência de absorção da mesma ligação em que um dos átomos foi substituído por um isótopo;

μ' = massa reduzida do sistema original;

μ = massa reduzida do sistema com o isótopo substituído.

Para absorver luz IR, a molécula deve apresentar um momento dipolar durante algum estágio da vibração, deve existir uma diferença na posição na molécula entre seu centro de carga positiva ou seu núcleo e o centro de carga negativa de sua nuvem eletrônica em algum ponto durante o movimento (BAIRD, 2002).

Este fato explica que aparelhos construídos para medir dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera através de IR são eficientes, pois para absorver luz IR, a molécula deve apresentar uma mudança na magnitude do momento dipolar durante algum estágio da vibração. Em moléculas diatômicas homonucleares, como os gases mais abundantes na atmosfera o O_2 e o N_2 , têm momentos dipolares igual a zero durante todo o tempo de sua vibração de estiramento e nos átomos livres como Argônio os centros de carga coincidem.

Em molécula poliatômica as vibrações dos átomos são, em geral, muito complexas, podendo ser obtidas por combinações lineares de um número reduzido de simples vibrações independentes, denominadas vibrações normais ou modos normais de vibração (BRISTOTI; NICOLA, 1980).

A radiação não tem energia suficiente para causar a excitação de elétrons, mas ela faz com que os átomos vibrem em torno das ligações covalentes que os unem. As vibrações são quantizadas e, quando elas ocorrem, os compostos absorvem energia infravermelha em determinadas regiões do espectro que causa rotações das moléculas e estas absorções dão origem aos espectros rotacionais (SOLOMONS, 1986).

Uma molécula poliatômica não necessita de um momento dipolar permanente para exibir um espectro vibracional no infravermelho, mas qualquer vibração que emita ou absorva radiação deve causar uma mudança no momento dipolar (MOORE, 1976).

3.4.1.1 Espectro Infravermelho do Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO_2) é uma molécula linear que não possui dipolo permanente, apresenta quatro modos normais de vibração: estiramento simétrico,

estiramento assimétrico, estiramento anti-simétrico e vibração de deformação angular, conforme o esquema mostrado na figura 6:

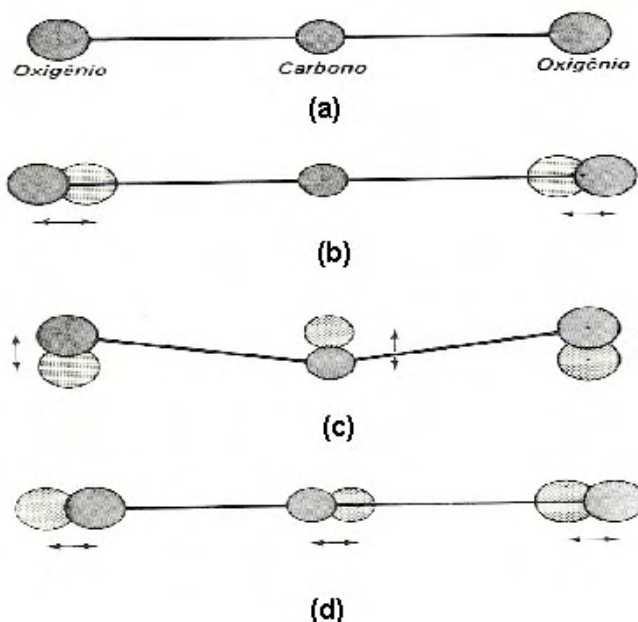


Figura 6 – Modos normais de vibração de uma molécula de CO₂ (MOORE, 1976, p. 686)

6.a. Molécula de CO₂ linear e simétrica – possui 4 modos de liberdade vibracionais.

6.b. Vibração de estiramento simétrico – os átomos da molécula vibram ao longo do eixo internuclear de uma maneira simétrica.

6.c. Deformação angular – a vibração dos átomos é perpendicular ao eixo internuclear.

6.d. Estiramento assimétrico – os átomos vibram ao longo do eixo internuclear de maneira assimétrica.

O estado vibracional da molécula é descrito por três números quânticos, ν_1 , ν_2 e ν_3 , onde ν_1 denota o número do quanta vibracional no modo de estiramento simétrico, ν_2 o do modo de deformação angular e ν_3 o de estiramento assimétrico.

A vibração de estiramento simétrica ou deformação axial simétrica – neste modo, o átomo de Carbono (C) é solicitado simultaneamente pelas forças simétricas, e o movimento continua indefinidamente (ATKINS; PAULA, 2002), não pode causar

uma mudança no momento dipolar e, portanto, esta frequência é inativa no infravermelho, isto é, durante o movimento vibratório no qual as distâncias entre C–O estendem-se e encurtam-se de maneira sincronizada, não ocorre em momento algum qualquer diferença na posição entre os centros de cargas positivas e negativas, que situam-se precisamente no núcleo central. Consequentemente a molécula não pode absorver IR (MOORE, 1976; BAIRD, 2002).

A vibração de estiramento anti-simétrica – neste modo, os dois átomos de Oxigênio se deslocam simultaneamente em um mesmo sentido, oposto ao do deslocamento do átomo de Carbono, causa uma mudança no momento dipolar, dando origem a uma banda de absorção fundamental em 2349 cm^{-1} (ATKINS, 2002; MOORE, 1976; BAIRD, 2002).

Estiramento assimétrico – a contração de uma das ligações C–O ocorrer quando a outra está se expandindo, ou vice-versa, de modo que durante o movimento os centros de carga não coincidem necessariamente e é, portanto, ativa no infravermelho (MOORE, 1976; BAIRD, 2002).

Na deformação angular a vibração dos átomos é perpendicular ao eixo inter-nuclear causando uma mudança de momento dipolar quando os três átomos afastam-se a partir de uma geometria colinear, seus centros não coincidem dando origem a uma banda de absorção fundamental em 667 cm^{-1} , sendo, portanto, ativa no infravermelho (MOORE, 1976; BAIRD, 2002).

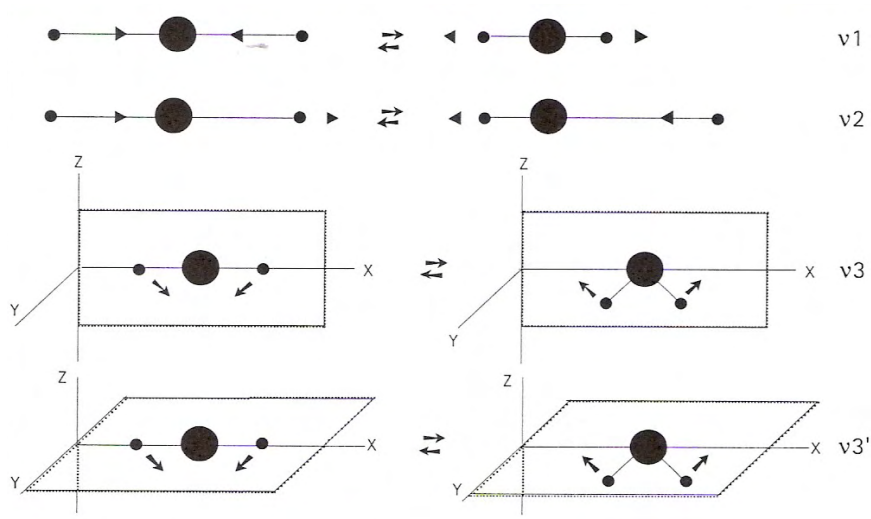


Figura 7 – Modos de vibração de moléculas triatômicas lineares, CO₂ (NETO, 2004, p. 364)

O espectro infravermelho de CO₂ apresenta além das bandas de absorção fundamentais muitas bandas de combinação e de overtone, mas estas possuem intensidades menores que a fundamental apresentando vibrações inativas na região do infravermelho. Algumas dessas bandas pode ser consultadas na tabela A3 do Anexoll.

A capacidade das moléculas de CO₂ absorver luz IR numa curta faixa de frequência, em vez de apenas a uma única frequência, ocorre porque além da vibração da molécula alterada pelo fóton infravermelho quando absorvido, ocorre também uma variação na energia rotacional da molécula em torno de seu próprio eixo.

Para o CO₂ absorção máxima de luz na região do infravermelho térmico ocorre no comprimento de onda de 15 µm, que corresponde à frequência de 2×10^{13} ciclos por segundo (Hertz); a absorção ocorre nesta frequência particular devido a vibração de deformação angular da ligação O = C = O. Este gás também absorve fortemente a luz IR com comprimento de onda de 4,26 µm, que corresponde a uma frequência de 7×10^{13} ciclos por segundo da vibração de estiramento antiassimétrico do O = C = O (MOORE, 1976).

3.4.1.2 Espectro Infravermelho da água

A água participa diretamente de numerosas reações química que ocorrem na matéria viva. Reações de hidrólise, condensação e em vários processos metabólicos na interconversão de hidratos de carbono, além de solvente para dissolver ou para transportar outras substâncias no interior das plantas.

A água está presente não só na matéria viva, mas também em materiais não vivo e apresenta uma propriedade importante que é a evaporação. A água evapora para o ar de qualquer superfície úmida, seja de lagos, rios, mares, plantas, solo, etc.

Este vapor de água é formado por moléculas de água de fórmula molecular H₂O (triatômica como o CO₂) não-linear e, portanto, sensível ao IR.

Segundo NETO (2004), a molécula de água apresenta três possíveis modos de vibração todos ativos no infravermelho, são: vibração axial simétrica e assimétrica e vibração angular. Estes modos de vibração estão representados na figura 8.

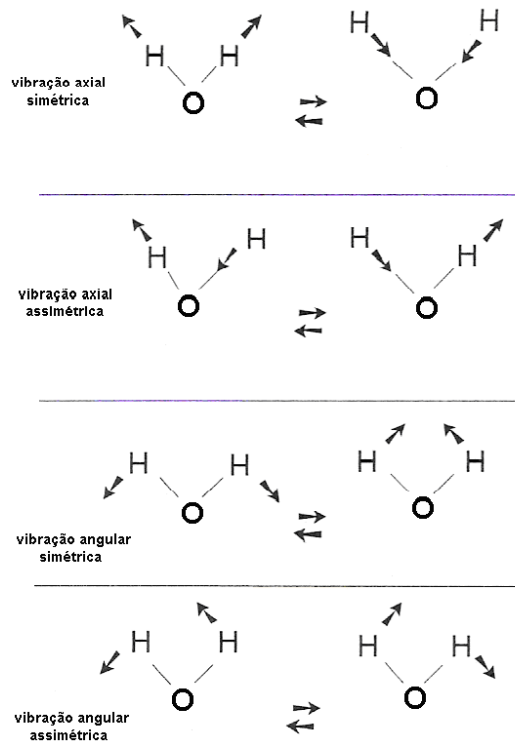


Figura 8 – Modos de vibração da molécula de água (NETO, 2004, p.365, modificado)

3.5 Analisadores de gases clássicos

As análises tradicionais dos gases que provocam efeito estufa consistem em dosar: CO_2 , CO , HC – hidrocarbonetos totais, NO , NO_2 , ou NO_x , que geralmente designam a soma: $(\text{NO} + \text{NO}_2)$, e O_2 (DIRECTIVA 97/68/CE. PARLAMENTO EUROPEU) .

Os aparelhos utilizados para analisar os gases causadores de efeito estufa permitem geralmente medir concentrações volumétricas de gases secos ou úmidos.

Aparelhos no infravermelho próximo fornecem resultados rapidamente. A região espectral do infravermelho próximo encontra-se entre 780 e 2500 nm ($4000 - 14300 \text{ cm}^{-1}$) (CIENFUEGOS; FREDDY, 2000).

Os aparelhos dotados de espectro infravermelho oferecem as maiores possibilidades de análise dos constituintes dos gases da atmosfera, do solo e da água.

Características do aparelho LI-COR 840 – utilizado nos ensaios para avaliação de CO_2 e H_2O

O LI-COR 840 é um aparelho fabricado pela companhia LI-COR (LI-840-97, LI-COR, NE, USA) de radiação infravermelha não dispersiva (NDIR). É um analisador de gases com base em um único percurso óptico e um duplo sistema de detecção de onda infravermelha. O ar entra com o auxílio de uma bomba que é conectada à “porta de entrada de ar” e atravessa o percurso óptico e sai através da “porta de saída”.

Os sensores de pressão e termostato são controlados pela banda óptica que oferecem estabilidade durante o tempo e as mudanças de pressão. Esse analisador de gases apresenta filtros ópticos de banda estreita que permitem a medição de CO_2 e H_2O simultaneamente através de radiação infravermelha não dispersiva, em um único caminho e limitam o espectro em uma faixa de comprimento de onda, onde a interferência de outros gases é a menor possível.

A sensibilidade ao vapor d'água é de $< 0,1 \text{ ppm}$ de $\text{CO}_2 / \text{H}_2\text{O}$ ppt e a bancada óptica fornece gama de medição de CO_2 entre 0-3000 ppm (parte por milhão, ou micromol/mol) e H_2O no intervalo de medição de 0-80 ppt (partes por mil ou milimol/mol) (MANUAL LICOR-840 acesso em 12/02/2008).

Este aparelho foi utilizado para ensaios com solos preparados da forma descrita no item 6.2.2.2 apresentou praticidade para uso em laboratório devido ao tamanho e sensibilidade.

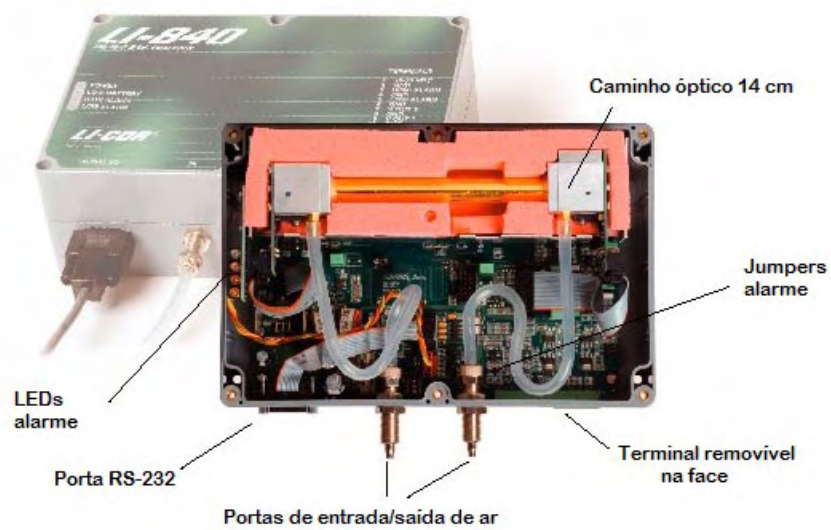


Figura 9 – Vista interna do LI-COR 840: aparelho de radiação infravermelha não-dispersiva (http://www.licor.com/env/Products/GasAnalyzers/li840/840_manual.jsp, acesso em 12/02/2008)

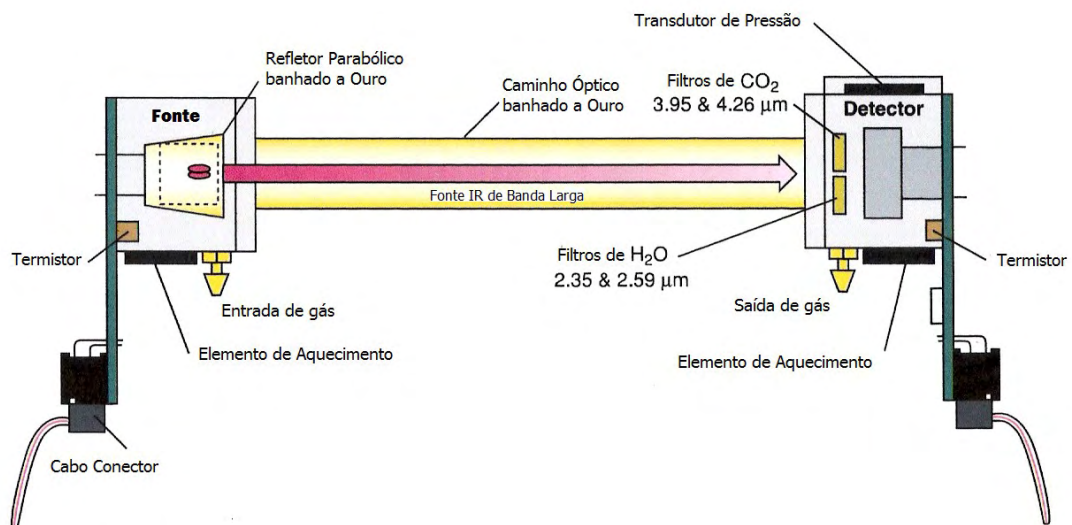


Figura 10 – Esquema do banco óptico do LI-COR 840 (http://www.licor.com/env/Products/GasAnalyzers/li840/840_manual.jsp, acesso em 12/02/2008)

4 PLANTAS

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é descrever como a troca de gases entre as plantas e o ambiente, facilita a fotossíntese e a respiração.

A água e o gás carbônico usados na fotossíntese produzem a seiva elaborada que é distribuída para todo o corpo da planta para mantê-la viva.

Estudos de comparação fotossintética entre os sistemas C₃ e C₄, revela que a cana-de-açúcar de metabolismo C₄ absorve um volume representativo de CO₂ do ambiente trazendo uma certa tranquilidade na expansão de sua cultura em relação a emissão de CO₂ para a atmosfera como “contribuição” para o aquecimento global.

Solo rico, água em abundância, luz e o calor do sol são exigências para o crescimento de uma planta (OVERBEEK, 1970).

As plantas são formadas por compostos inorgânicos relativamente simples sob a forma não dissociada ou dissociada (cátions e ânions), que são absorvidos do solo pelas raízes ou através de órgãos aéreos, como as folhas (MEYER *et al.*, 1983; KERBAUY, 2008)

4.2 As plantas e o dióxido de carbono

A importância de estudos envolvendo o CO₂ e as plantas vem da necessidade de avaliar o impacto do aumento global da concentração desse gás na atmosfera, sobre as plantas na Terra (KERBAUY, 2008).

O dióxido de carbono (CO₂) o gás oxigênio e o vapor de água entram principalmente pelos estômatos e em condições diferentes, saem das plantas para a atmosfera, podendo ser pelas folhas ou pelas raízes. Essa difusão depende da temperatura, isto é, quando aumenta a temperatura aumenta a difusão desses gases.

A concentração de CO₂ se altera com a função da taxa fotossintética, e os efeitos da luz é o sinal mais importante no controle dos movimentos estomáticos.

MANSFIELD *et al.* (1990) propuseram que as células-guarda (célula que controlam as aberturas de pequenos poros do complexo estomático) podem ficar mais ou menos túrgida com o aumento ou diminuição da concentração de CO₂ devido às condições do ambiente. No escuro, o fechamento das células-guardas pode ser atribuído ao acúmulo de CO₂ respiratório dentro da folha.

Segundo KERBAUY (2008), estudos baseados em análises fotobióticas e metabólicas com concentração de CO₂ constante mostraram que a resposta da abertura estomática à luz branca é parcialmente inibida por um inibidor do transporte de elétrons da fotossíntese. Quando as plantas foram submetidas luz vermelha, e a luz azul, faixa de espectro que mais favorece a fotossíntese, houve uma substancial abertura dos estômatos. Observou-se que a luz azul em condições naturais é importante para a abertura dos estômatos antes do amanhecer.

Do ponto de vista ecofisiológico, a resposta à luz azul antecipa a necessidade de CO₂ atmosférico favorecendo a abertura estomática, para uma fotossíntese ativa.

A resposta dos estômatos à luz vermelha foi indireta, pois ocorre acúmulo de sacarose sintetizada a partir da fixação do CO₂ fotossintético nas células-guardas (TALBOTT; ZEIGER, 1998).

Na ausência de água “estresse hídrico”, os estômatos fecham parcialmente, dificultando a entrada de CO₂. Esse fenômeno limita a taxa fotossintética, prejudicando o crescimento e o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das plantas e, conseqüentemente, a produção agrícola e a manutenção da qualidade de ecossistemas naturais.

4.2.1 Fotossíntese: comparação fotossintética entre os sistemas C₃ e C₄

O impacto do ambiente sobre a fotossíntese é de grande interesse nos dias atuais, compreender como a fotossíntese responde a fatores ambientais como luz, concentrações de CO₂ no ambiente e na temperatura.

A fotossíntese ocorre em escala gigantesca em nosso planeta. Estima-se que 2×10^{11} toneladas de matéria orgânica sejam produzidas anualmente resultante do metabolismo fotossintético do carbono (LAWLOR, 1987 *apud* KERBAUY, 2004).

A formação de moléculas orgânicas tem início com a reação de fixação de CO_2 atmosférico, catalisada por uma enzima denominada ribulose bifosfato carboxilase oxigenase (rubisco), que desencadeia uma rede de reações bioquímicas que geram os carboidratos, as proteínas e os lipídios que sustentam as plantas e os demais seres vivos, inclusive os seres humanos (MANN, 1999 *apud* KERBAUY, 2004).

O processo fotossintético ocorre através de ciclos que envolvem interações complexas e cada um é crítico em sua própria forma.

Para a discussão deste trabalho, será abordada apenas a comparação dos mecanismos C_3 e C_4 associados não só à eficiência fotossintética, mas também sobre o desempenho das plantas em diferentes condições ambientais

A fotossíntese consiste em dois processos acoplados. Um de caráter fotoquímico e compreende a absorção de luz e o transporte de elétrons e o outro é bioquímico com a captação de CO_2 e retém a energia absorvida a partir da luz.

A captação da luz é efetuada pelo Complexo de Captação de Luz (CCL), através de uma proteína a qual as clorofilas se associam e maximiza a energia absorvida. Moléculas de água são quebradas e os elétrons dos átomos de hidrogênio entram para o processo de transporte de elétrons. Os CCL acoplados a uma série de proteínas transferem os elétrons e adicionam prótons ao (Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato) NADP transformando-o em NADPH. Neste processo ocorre também a formação de Adenosina Trifosfato (ATP) que juntamente com o NADPH serão usados num ciclo semi-aberto de reações químicas denominado Ciclo de Calvin (KERBAUY, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2006).

Este ciclo utiliza o Carbono do CO_2 para alongar moléculas, produzindo açúcares que será utilizada para a produção de amido no cloroplasto e outra parte será descarboxilada (perderá o equivalente a uma molécula de CO_2) reiniciando o ciclo.

O CO_2 entra na planta através dos estômatos é capturado por um complexo enzimático (RUBISCO) altamente sofisticado que fecha o ciclo de carboxilação.

Existem dois caminhos de carboxilação. Um deles tem início com um composto de 3 carbonos e por isso é chamado de C_3 . Plantas como soja utilizam a via C_3 para a fotossíntese.

Algumas plantas, principalmente gramíneas como a cana-de-açúcar desenvolveu um sistema complementar à via C_3 denominada de via C_4 .

Este sistema permite à folha o armazenamento de ácidos com 4 átomos de carbono antes de serem captados pela RUBISCO. Este mecanismo causa um aumento espetacular na concentração de CO_2 na bainha vascular da planta tornando o sistema fotossintético mais eficiente e um gerenciamento melhor da abertura estomática, processo fundamental no controle da transpiração foliar prevenindo a perda de água (KERBAUY, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2006).

Comparando o rendimento quântico (equivale ao número de mols de CO_2 absorvido pelo número de quanta de energia captado), as plantas C_4 tem desempenho constante em temperaturas que variam entre 10 – 40 °C, as C_3 apresentam eficiência entre 20 – 30 °C (CHRISPEELS; SADAVA, 1996).

As plantas C_3 funcionam bem entre 400 a 500 $\mu\text{mols de fótons.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, e as plantas C_4 funcionam em intensidades maiores que 2000 $\mu\text{mols de fótons.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, condições que lhes conferem a resistência em regiões mais áridas do planeta (TAIZ; ZEIGER, 2006).

Em resumo, a fotossíntese das plantas C_4 é substancialmente mais eficiente do que a das plantas C_3 em ambientes quentes e intensamente iluminados. As bases fisiológicas centrais desta adaptação são o mecanismo concentrador de CO_2 presente na fotossíntese C_4 , inibidor da fotorrespiração, bem como as temperaturas ótimas mais elevadas de suas principais enzimas.

4.2.2 A Cana-de-açúcar e a emissão de CO_2

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene. O rendimento econômico da cana-de-açúcar é dado pela produção de sacarose (o componente mais valioso), além de açúcares não redutores utilizados para formar o melaço e também a fibra, que pode ser utilizada como fonte de energia para a própria usina. O processamento

industrial da cana é também destinado a produção de álcool, para utilização como combustível e a partir daí, toda a álcoolquímica.

Os processos de bioconversão de energia são mais efetivamente influenciados pelos fenômenos ambientais: luz (intensidade e quantidade), concentração de CO₂, disponibilidade de água e nutrientes e temperatura. O aumento de irradiância eleva a taxa fotossintética, ocorrendo a saturação acima de 0,9 cal/cm²/minuto. A elevação do CO₂ da atmosfera aumenta a capacidade fotossintética, sendo que vento em velocidade moderada eleva a fotossíntese por aumentar a disponibilidade de CO₂ às plantas; com baixa velocidade do vento, há depressão na fotossíntese, ao redor do meio do dia (MAGALHÃES, 1987).

Sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C₄, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora. Entretanto, esta alta atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa.

A grande capacidade da cana-de-açúcar, para a produção de matéria orgânica, reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciado pelo Índice de Área Foliar (IAF). Além disso, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em elevadas produções de matéria seca.

O processo de fotossíntese da cana absorve um volume de CO₂ equivalente ao da queima do álcool e do bagaço. Como consequência, a redução líquida na taxa de emissão de CO₂ é da ordem de 2,46t de CO₂ equivalente por m³ de etanol consumido (SUAREZ, 2009).

4.3 As plantas e a água

As plantas bem como todos os seres vivos precisam de água para sobreviver.

As plantas mais comuns são formadas de mais de 90% de água; entretanto, sabe-se que em condições de verão temperado normal, um metro quadrado de

vegetação transpira, aproximadamente, 2 litros por dia (WINTER, 1976; SUTCLIFFE, 1980; KERBAUY, 2008).

A precipitação é a principal fonte de água para as plantas além de caracterizar nas diferentes partes do mundo, a exploração agrícola com os diferentes tipos de culturas (WINTER, 1976).

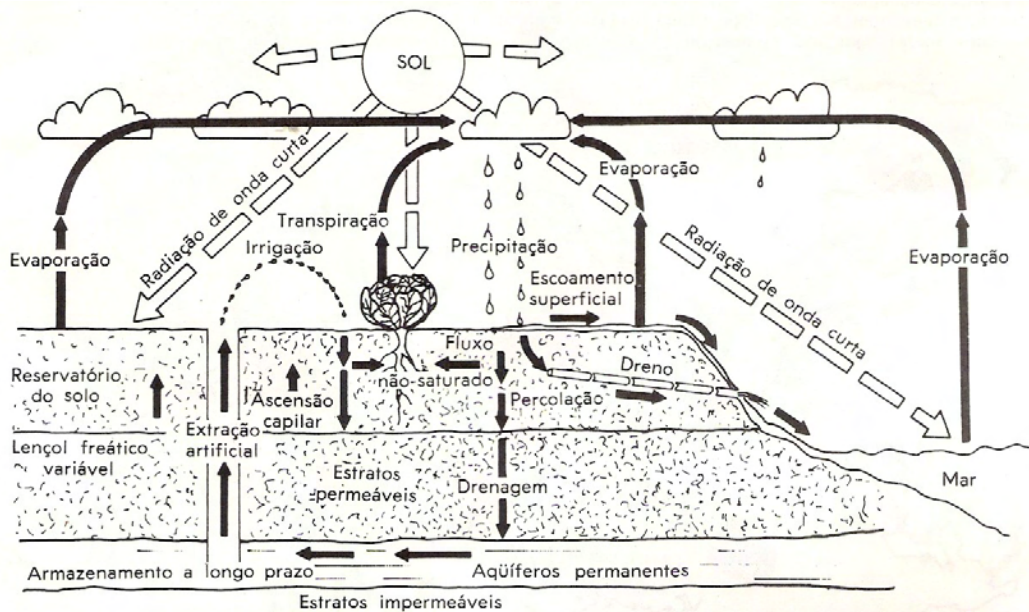


Figura 11 – Ciclo hidrológico (WINTER, 1976, p.6)

A água atinge o solo principalmente como chuva; uma parte é armazenada no próprio solo, outra parte é drenada através de seu perfil para as camadas mais profundas e, uma vez estando o solo já saturado, outra parte pode fluir através da superfície para drenos e rios. Da água no solo, uma fração evapora através de sua superfície e outra é absorvida pelas raízes das plantas e evaporada ou transpirada para a atmosfera através de suas folhas. Essa circulação da água da atmosfera para o solo e seu retorno à atmosfera compreende o ciclo hidrológico como mostra a figura 11 (WINTER, 1976).

Do ponto de vista agrícola, um dos mais importantes parâmetros do tempo é o poder evaporativo do ambiente que determinar quanta água foi perdida do sistema solo/planta.

As plantas, de maneira geral, obtêm a maior parte da água, para suprir suas necessidades, pelo sistema radicular disperso no solo e pela superfície de suas folhas.

A profundidade do solo explorado pelos sistemas radiculares varia de acordo com a espécie de planta, o tipo de solo e a presença ou ausência de um lençol freático (WINTER, 1976; SUTCLIFFE, 1980).

As moléculas de água apresentam uma grande diferença de eletronegatividade, o que faz a molécula ser fortemente polar e essa polaridade provoca uma interação entre as moléculas. Esse fenômeno facilita a subida da água até o topo de árvores de dezenas de metros de altura, indo até as folhas e através dos estômatos tem lugar à evaporação.

No interior das células vegetais, a água interage com proteínas dando estabilidade às organelas, às membranas e às enzimas, além de ser um excelente solvente para substâncias iônicas e para moléculas como açúcares, proteínas que contém também grupos polares (OVERBEEK, 1970; TAIZ; ZEIGER, 2004).

Na maioria das plantas terrestres, a água é continuamente perdida para a atmosfera e absorvida do solo.

Segundo TAIZ E ZEIGER (2004), são três os fatores principais que contribuem para o potencial hídrico (Ψ_w) celular: concentração (efeito de soluto, Ψ_s), pressão (Ψ_p) e gravidade (Ψ_g).

O potencial hídrico de soluções é escrito pelo somatório:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \quad (23)$$

O potencial do soluto ou potencial osmótico (Ψ_s) representa o efeito dos solutos dissolvidos no potencial hídrico e a mistura de solutos e água aumenta a desordem do sistema e, portanto, reduz a energia livre da água.

A pressão hidrostática ou potencial de pressão (Ψ_p), a pressão hidrostática positiva é responsável pela pressão de turgor (intracelular) e, a pressão hidrostática negativa (intercelular) é responsável pelo movimento a longa distância na planta.

A gravidade (Ψ_g) faz com que a água mova-se para baixo. O componente gravitacional em relação ao transporte de água celular é desprezível comparado ao potencial osmótico e à pressão hidrostática (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Nesse caso a equação (23) pode ser simplificada como:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p \quad (24)$$

indica, portanto, o crescimento celular, fotossíntese e produtividade de cultivos.

As células vegetais atingem equilíbrio de potencial hídrico, com o ambiente local das mesmas absorvendo ou perdendo água, o que resulta em mudança no Ψ_p celular acompanhado por pequenas mudanças no Ψ_s celular.

“A água na planta pode ser considerada como um sistema hidráulico constante, conectando a água do solo ao vapor de água na atmosfera” (TAIZ; ZEIGER, 2004, p.92).

4.4 Solo

Os solos se formam da ação de cinco fatores: clima, natureza dos organismos, material de origem, relevo e idade.

O solo é uma mistura complexa de materiais inorgânicos e orgânicos, contendo normalmente uma rica variedade de organismos vivos e mortos, incluindo-se bactérias, fungos, ambos uni e multicelulares, moluscos, insetos, anelídeos e animais superiores; o solo fornece apoio e suporte para as grandes plantas que dele extraem água e nutrientes (WINTER, 1976; BRAGA *et al.*, 2002).

A espessura da camada do solo varia de acordo com o tipo de região e sua classificação pedológica. A distribuição indica a origem do solo, o qual é formado pelo intemperismo de rochas, ajudado pelo crescimento e decaimento de materiais de plantas e animais.

Solos minerais consistem principalmente em partículas de rochas com somente uma proporção pequena de matéria orgânica, enquanto turfas, solos orgânicos e terras pretas se constituem principalmente de matéria orgânica com pouca mistura mineral (WINTER, 1976; BRAGA *et al.*, 2002).

Os solos são classificados de acordo com sua composição e derivação geológica. Os estágios de sucessão por meio bióticos e abióticos formam os “horizontes do solo”.

O manejo do solo, principalmente a aração pode alterar o horizonte do solo e a prática de manejo incorreta pode torná-lo estéril.

A textura ou a granulometria do solo, explica a drenabilidade, a permeabilidade e a aeração de um solo e, portanto, a proporção água-ar (WINTER, 1976; BRAGA *et al.*, 2002).

Atividades agrícolas que envolvem o manejo do solo com preparo mecânico têm afetado a dinâmica da emissão de CO₂ (REICOSKY; LINDSTROM, 1993; ROCHETTE; ANGERS, 1999; PRIOR *et al.*, 2000; BAYER *et al.*, 2000; LA SCALA JÚNIOR *et al.*, 2001), as operações mecanizadas são grandes responsáveis pela compactação do solo provocando a resistência do solo à penetração e dificultando o crescimento radicular (STOLF, 1991), o fenômeno está relacionado com o tráfego de máquinas e em grau de umidade favorável à compactação (SERAFIM *et al.*, 2008).

Assim o consumo de água por culturas agrícolas se refere apenas à água perdida pela transpiração das plantas ou pela evaporação da superfície do solo.

As plantas exigem certos níveis de oxigênio na atmosfera do solo, consumindo O₂ e desenvolvendo CO₂. Devido a este fenômeno o solo possui concentração menor de O₂ e maior de CO₂ em comparação com a atmosfera sobre o solo.

Quando chove ou quando irrigado, a entrada de água no espaço poroso do solo expulsa dele certa quantidade de gases que são repostas com a evaporação ou drenagem do solo.

Na cultura de cana-de-açúcar grande quantidade de CO₂ livre na atmosfera é absorvido pela planta e se concentra na bainha vascular tornando a fotossíntese mais eficiente e assim previne a perda de água e torna-se mais resistente à variação de temperatura.

5 AQUECIMENTO GLOBAL E MERCADO DE CARBONO

Atualmente o aumento do aquecimento global é talvez, o impacto ambiental que mais tem preocupado a humanidade.

O aumento gradativo da temperatura média global traz previsões catastróficas entre elas destacam-se: elevação do nível dos oceanos e a consequente inundação de cidades litorâneas e as mudanças no clima.

Infelizmente tais previsões podem se tornar realidade caso não haja uma tomada de consciência de toda a humanidade.

Como estímulo para mitigação de emissão de gases de efeito estufa projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), apresentados por empresas de qualquer porte e quando aceitos podem trocar por créditos de carbono que são adquiridos em mercado de carbono ou em fundos que negociam esses papéis.

Neste capítulo são apresentados: o balanço de radiação na Terra, as consequências do aquecimento global e as discussões e medidas estabelecidas nas convenções climáticas como: Conferência das Partes (COP), Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e Protocolo de Quioto.

5.1 Efeito Estufa

Ouve-se previsões de que o “efeito estufa” afetará o clima em todo o mundo ao longo do século XXI e nos séculos seguintes.

O termo “efeito estufa”, significa que a temperatura média global do ar aumentará de vários graus como resultado do aumento da quantidade de gás carbônico (CO₂) e de outros gases na atmosfera (BAIRD, 2002).

Este fenômeno natural existe independente da ação antrópica, isto é, a energia solar atinge a superfície terrestre e é reemitida para a atmosfera, onde é absorvida por traços de gases que não deixam que o calor escape e assim, mantém o Planeta Terra aquecido, fato que pode ser observado na figura 12.

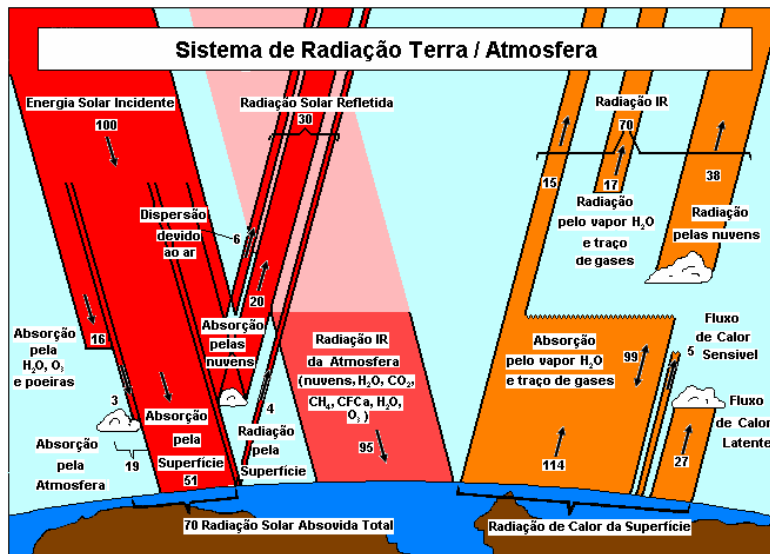


Figura 12 – Sistema de radiação Terra / Atmosfera (KRUPA, 1997, modificado)

Mostra o balanço de radiação na terra e os fluxos de energia que são absorvidos e refletidos, pela superfície e pela atmosfera terrestre. A energia responsável pelo efeito estufa é representada pelas ondas longas que são aprisionadas por traços de gases.

Caso não houvesse o efeito estufa, a Terra seria cerca de 33 °C mais fria, pois atualmente a sua temperatura média é de 15 °C e o solo terrestre irradia energia na forma de radiação eletromagnética, na faixa do infravermelho, com distribuição espectral próxima a de um corpo negro a 18 °C, que seria a temperatura da atmosfera sem o efeito estufa (TOLENTINO; ROCHA, 1998).

Hoje um fenômeno que preocupa os cientistas ambientais é o efeito estufa intensificado que é o aumento da concentração de gases traços no ar, que absorvem luz infravermelha térmica, resultando em uma maior quantidade de infravermelho refletida o que causaria o aumento da temperatura média da superfície além dos 15 °C.

A atmosfera terrestre é formada muitos gases, sendo os principais apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição percentual média de gases da atmosfera terrestre (BAIRD, 2002; TOLENTINO; ROCHA, 1998; BRAGA *et al.*, 2002).

| Gases | (%) |
|----------------------------------|------------|
| Nitrogênio (N ₂) | 78,084 |
| Oxigênio (O ₂) | 20,946 |
| Argônio (Ar) | 0,934 |
| Gás Carbônico (CO ₂) | 0,033 |

Entretanto, processos naturais e processos provocados pelo homem alteram a concentração de alguns traços de gases, como os agentes causadores de efeito estufa (GEE).

Tabela 2 – Principais gases causadores do efeito estufa (dados com base em: BRAGA *et al.*, 2002; BAIRD, 2002; KRUPA, 1997; CONAMA, 1990).

| Gás | Fontes antrópicas | Fontes Naturais | Tempo de vida na atmosfera | Concentração Média na atmosfera | Taxa de aumento anual (atual) | Contribuição relativa ao efeito estufa antrópico |
|----------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| Gás Carbônico (CO ₂) | Combustíveis fósseis, queima de biomassa, desmatamento | Balanço na Natureza | 50 a 200 anos | 379 ppm (ano 2005) | 0,5% | 60% |
| Metano (CH ₄) | Cultivo de arroz, pecuária, combustíveis fósseis, queima de biomassa | Terrenos Alagados | 10 anos | 1750 ppb | 0,9% | 15% |
| Nitroso (N ₂ O) | Fertilizantes, conversão do uso da terra | Solos e Florestas Tropicais | 150 anos | 312 ppb | 0,3% | 5% |
| Clorofluorcarbonetos (CFCs) | Gás refrigerantes, aerossóis, processos industriais. | ----- | 60 a 100 anos | 533 ppb | 4%* | 12% |
| Ozônio (O ₃) | Hidrocarbonetos (com NOx), queima de biomassa. | Hidrocarbonetos | semanas a meses | 25 / 26 ppb | 0,5% a 2,0% | 8% |
| Vapor de H ₂ O | Conversão do uso da terra, irrigação, e todas relacionadas acima. | Evapotranspiração | Dias | 1,3% | Não se aplica | Não se aplica |

As concentrações dos GEE na atmosfera não são constantes, pois possuem tempo de vida e quantidades emitidas diferentes.

Os principais agentes do efeito estufa no passado foram o dióxido de carbono - CO₂ (responsável por cerca de um quarto) e a água - H₂O (responsável por dois terços do efeito) (BAIRD, 2002). A partir da revolução industrial, o aumento da população e conseqüentemente a demanda de alimentos e demais necessidades de sobrevivência implicou na diversificação e na multiplicação dos agentes do efeito estufa.

O aquecimento global (aumento da temperatura média do planeta) é a intensificação do efeito estufa causado pelo aumento da emissão dos GEEs resultantes da geração de energia, dos processos industriais, dos transportes e dos desmatamentos. A figura 13 mostra a evolução da temperatura média do planeta nos séculos XIX e XX, onde observa-se que houve uma variação de 0,6 °C.

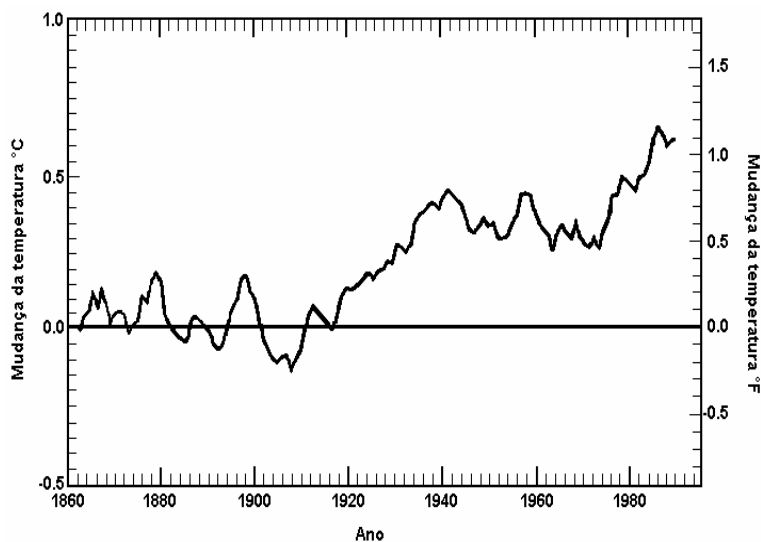


Figura 13 – Variação da temperatura em função do tempo (adaptado de BNDES e MCT, 1999)

Observa-se na figura 13 que a temperatura média da Terra iniciou seu aumento a partir de 1870 com a Revolução Industrial, sendo que a partir de 1910 o aumento foi mais representativo devido ao aumento da industrialização, do uso de combustíveis fósseis, da demanda por mais energia e a devastação das vegetações nativas.

KRUPA (1997) observa que a concentração de CO₂ na atmosfera terrestre aumentou de 180 ppm antes da revolução industrial para 350 ppm nos dias atuais.

Com as evidências dos impactos sobre o planeta, cientistas e ambientalistas, desenvolveram discussões sobre o aquecimento global, colocando o assunto para ser discutido na agenda das Organizações das Nações Unidas – ONU.

5.2 Convenções Climáticas e o Mundo

Em 1972 em Estocolmo, foi realizada a primeira conferência da ONU para discutir as alterações ambientais. Após dezesseis anos foi realizado um encontro em Toronto, Canadá, onde classificaram as mudanças climáticas com um potencial inferior apenas a uma guerra nuclear. Em 1990, foi publicado um informe sobre a situação das emissões de gases causadores do efeito estufa, denominado IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Em 1992, no Rio de Janeiro, procurando formas de estabilização das emissões de GEEs, mais de 160 países assinaram a Convenção Quadro das Nações Unidas em Mudanças Climáticas – CQNUMC.

Nesta convenção ficou estabelecido:

– o princípio de responsabilidade comum e diferenciada, isto é, todos devem ser comprometidos com a proteção do clima, mas as nações industrializadas devem atuar primeiro,

– criação da Conferência das Partes – COP, órgão cuja função é promover e revisar a implementação de medidas de mitigação, divulgar trabalhos científicos e verificar atividades dos programas de mudanças climáticas.

Em 2002, em Johannesburgo, foi realizada a Convenção Rio + 10, destacou-se a ausência dos Estados Unidos e as incertezas sobre o futuro dos tratados já firmados.

5.2.1 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), nasceu em 1988, é um órgão composto por delegações de 130 governos para prover avaliações regulares sobre a mudança climática. As delegações são divididas em 3 grupos:

- O grupo de trabalho I é responsável de avaliar os aspectos científicos do clima e das mudanças do clima,

- O grupo de trabalho II avalia a vulnerabilidade socioeconômica e dos ecossistemas em consequência s da mudança do clima e as opções para se adaptar,

- O grupo de trabalho III é responsável pelas análises das emissões de GEEs, das consequências socioeconômicas das medidas e da mitigação climática.

Os grupos são responsáveis por produzir informações científicas em três relatórios que são divulgados periodicamente desde 1988. Os relatórios são baseados na revisão de pesquisas de 2500 cientistas de todo o mundo.

O primeiro relatório foi lançado em 1990, o segundo em 1995, o terceiro em 2001 e o quarto em 2007.

O primeiro relatório em 1990 afirmou que as mudanças climáticas representam uma ameaça e sugeriu a criação de um tratado internacional para solucionar os problemas. O segundo relatório, em 1995 diz que “o balanço das evidências indica nítida influência do homem sobre o clima através das 10 emissões de GEEs” (IPCC, 1995). No terceiro relatório, em 2001 é afirmado que as atividades humanas são as principais causadoras do forte aquecimento global observado nos últimos 50 anos. Os dados reunidos no IPCC serviram para mostrar ao mundo a necessidade de reduzir a emissão dos GEEs. Os trabalhos e as evidências apresentadas levaram a criação de ações de mitigação e de um instrumento legal

que obrigasse os países a diminuírem suas emissões. A figura 14 mostra a necessidade de ação urgente principalmente nos Estados Unidos e China.

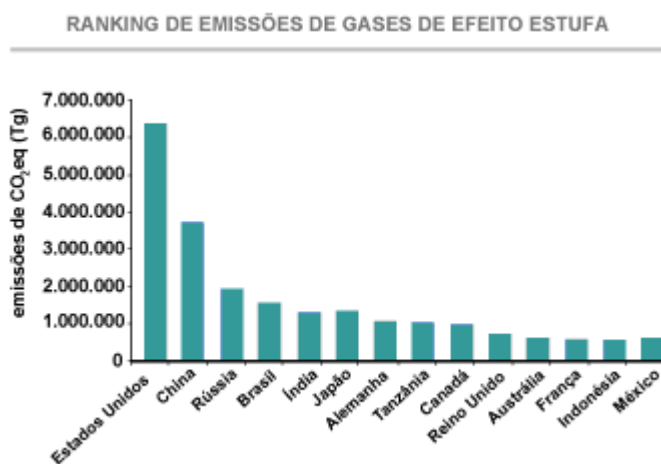


Figura 14 – Emissões de gases de efeito estufa (Fonte: Perguntas e respostas sobre aquecimento global, IPAM, 2008, acessado em 02/08/2009)

Em síntese o primeiro relatório de 2007, divulgado em 2 de fevereiro afirma que os cientistas têm 90% de certeza que a influência antropogênica é responsável pelo aumento de temperatura do planeta.

O segundo relatório foi divulgado dia 6 de abril e abordou os impactos das mudanças climáticas sobre países e ecossistemas, com um capítulo dedicado apenas à América Latina, com detalhes sobre o Brasil.

Em 4 de maio em Bangcoc, Tailândia, divulgam a principal conclusão da terceira parte do relatório de 2007: O aumento das emissões de gases de efeito estufa pode ser detido com custos relativamente baixos. O documento, produzido por centenas de cientistas de diversos países, aponta que, para evitar mudanças desastrosas no clima global, a temperatura média do planeta não poderia subir mais do que 2 °C. O problema é que, para isso, seria preciso reduzir as emissões de CO₂ entre 50% e 85% até 2050.

– Brasil e o IPCC

Em fevereiro de 2007 o IPCC divulgou os resultados do seu Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do planeta, chamado de IPCC-AR4 (ALLEY *et al.*, 2007).

Neste relatório, o IPCC observa que partes da Amazônia podem virar savana, e entre 10% e 25% da floresta poderia desaparecer até 2080. O órgão concluiu que existe uma possibilidade de 50% de que a maior floresta tropical do mundo se transforme parcialmente em cerrado. Há riscos também para o Nordeste brasileiro, onde até 75% de suas fontes de água podem desaparecer até 2050. Os manguezais também podem ser afetados pela elevação do nível da água.

A emissão continuada de GEEs poderia causar um aquecimento, induzindo assim, mudanças no sistema climático durante o século XXI.

Analisando o gráfico do Terceiro relatório e utilizado no Quarto relatório tem-se que as estimativas mais prováveis de aumento da temperatura da superfície consideram os cenários extremos de altas emissões (A2) e de baixas emissões (B2). A estimativa mais otimista (B1) indica um aumento de 1,8 °C e a mais pessimista (A1F1) indica um aumento de 4 °C (figura 15).

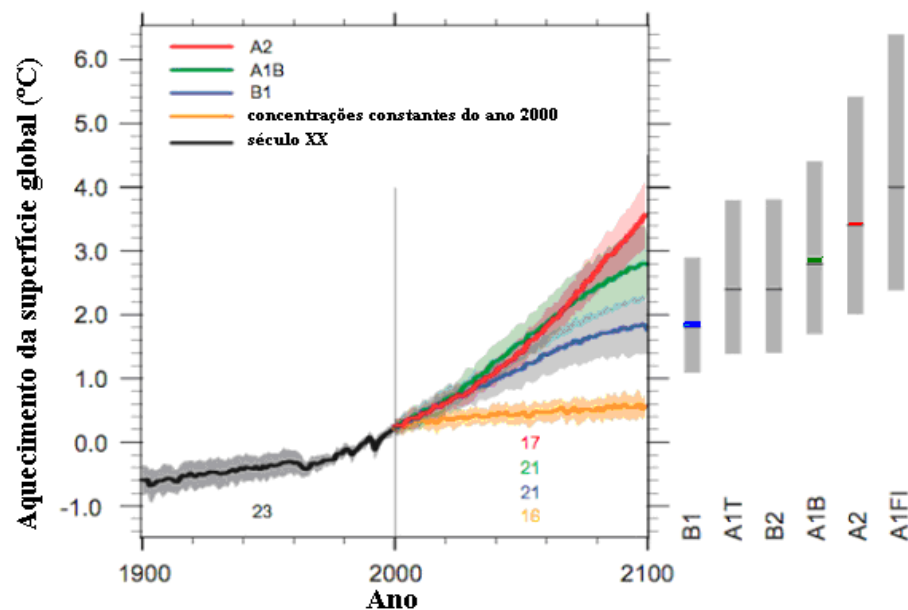


Figura 15 – Mudanças do sistema climático em função do tempo (RECE – IPCC, 2000)

As linhas sólidas são médias globais do aquecimento da superfície produzidas por vários modelos (relativas entre 1980 e 1999) para os cenários A2, A1B e B1, mostradas como continuações das simulações do século XX. O sombreado denota a faixa de mais/menos um desvio-padrão para as médias anuais individuais dos modelos. A linha alaranjada representa o experimento em que as concentrações foram mantidas constantes nos valores do ano 2000. As colunas cinzas à direita indicam a melhor estimativa (linha sólida dentro de cada coluna) e a faixa provável avaliada para os seis cenários do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (RECE) – IPCC 2000. A avaliação da melhor estimativa e das faixas prováveis nas colunas cinzas compreende os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera-Oceano (AOGCMs) na parte esquerda da figura, bem como os resultados de uma hierarquia de modelos independentes e restrições das observações.

Segundo análise de ÁVILA (2007) e MARENGO *et al.* (2007), o Sumário Executivo dos estudos observacionais de variabilidade climática e de modelagem global e regional de cenários futuros de mudança de clima para o Brasil e para a América do Sul, divulgado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC /INPE), em colaboração com o Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP/IAG) e com a Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável (FBDS), apresenta as projeções médias para o Brasil, levando em consideração os resultados dos modelos A2 e B2.

Segundo esse relatório, entre 2071 e 2100 a temperatura pode variar entre 4 e 8 °C na Amazônia, para o cenário A2, e 3 e 5 °C para o cenário B2, com grande variabilidade espacial. Para a região Nordeste o aquecimento pode chegar a 4 °C no cenário pessimista A2 e de 2 a 3 °C no cenário otimista B2. No cenário A2 o aquecimento no Centro-Oeste e Sudeste pode variar entre 4 e 6 °C, enquanto que o cenário B2 apresenta valores entre 2 e 3 °C. No Sul o cenário A2 sugere aquecimento da ordem de 3 a 4 °C no cenário A2 e entre 2 e 3 °C no cenário B2. Ainda que o aquecimento seja maior na região tropical da América do Sul para os vários modelos regionais utilizados, as projeções destes modelos diferem sobre onde se dá o maior aquecimento (acima de 8 °C): na Amazônia Oriental ou na

Amazônia Ocidental, dependendo do modelo regional utilizado (MARENGO *et al.*, 2007; ÁVILA, 2007).

As magnitudes dos impactos das mudanças climáticas são estudadas para cada região do planeta, sendo que algumas serão mais prejudicadas que outras.

Para o Brasil, as projeções são consistentes entre os diferentes modelos do Terceiro e do Quarto Relatório. Contudo, as incertezas são maiores em relação à chuva, especialmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Na escala continental, em relação à precipitação, a região que apresenta maior confiança nas projeções de clima futuro para 2071-2100 é a Nordeste. O semi-árido nordestino poderá, num clima mais quente no futuro, transformar-se em região árida. Isto pode afetar a agricultura de subsistência regional, obrigando as populações a migrarem, gerando ondas de “refugiados do clima” (ÁVILA, 2007)

5.2.2 Protocolo de Quioto

Assinado em 1997 durante a COP 3, o protocolo de Quioto, visa organizar de forma global os esforços para a diminuição do impacto ambiental das emissões de gases na atmosfera.

É considerado o tratado sobre meio ambiente de maior importância lançado até hoje.

Esse tratado visa organizar de forma global os esforços para a diminuição do impacto ambiental das emissões de gases na atmosfera, e assim reduzir o aquecimento global e seus possíveis impactos através de medidas que controlem as emissões antropogênicas visando a diminuição do aquecimento global e o desenvolvimento sustentável. Oitenta e quatro países assinaram o Protocolo com a meta principal de redução da emissão dos GEEs. O Protocolo entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005 com a ratificação de 125 países, correspondendo a 61,6% das emissões (BEZERRA *et al.*, 2004; MCT e MREX, 1998).

Os países signatários do Protocolo de Quioto foram divididos em dois grupos, de acordo com seu nível de industrialização: Anexo I – que reúne os países

desenvolvidos – e não-Anexo I – grupo dos países em desenvolvimento, dentre eles o Brasil. Cada grupo tem obrigações distintas em relação ao Protocolo.

Os países desenvolvidos que ratificaram o tratado têm o compromisso de diminuir suas emissões de GEE numa média de 5,2% em relação aos níveis que emitiam em 1990. E têm um prazo final para cumprir a meta: entre 2008 e 2012.

Já os países do não-Anexo I, como não atingiram determinado índice de desenvolvimento, não têm metas. Eles podem auxiliar na redução de emissão desses gases, embora não tenham um compromisso legal de redução até 2012. Essa redução de emissões pode ser feita através de projetos devidamente registrados que comercializem Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) de projetos.

O Protocolo destaca as questões sobre metodologias utilizadas para medir emissões, remoções e flexibilizações: Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), a Implementação Conjunta (JI – Joint Implementation) e o Comércio de Emissões (ET – Emission Trade). O objetivo do MDL é promover e fomentar o desenvolvimento sustentável nos países subdesenvolvidos através de incentivos financeiros. É o único mecanismo de flexibilização que permite a participação dos países em desenvolvimento, isto é, se um país desenvolvido não conseguir cumprir sua meta de redução em seu território, poderá investir em projetos de desenvolvimento limpo em outros países, gerando créditos de carbono negociáveis (Reduções Certificadas de emissões – RCE) com validade pré-estabelecida.

Protocolo propõe que as modalidades de MDL devem ser elaboradas pela Conferência das Partes (COP). Durante a COP-9 foi adotado, basicamente, duas modalidades de MDL: a primeira sobre as fontes renováveis e alternativas de energia, eficiência energética e substituição de combustíveis. A segunda tem como objetivo as atividades de remoção e estocagem de CO₂ através de sumidouros e uso da terra, aqui inclui-se o florestamento e o reflorestamento (BARTHOLOMEU *et al.*, 2004).

– Evolução do valor dos créditos de carbono

A Câmara de Comércio Americana (Amcham) estimava dois cenários possíveis para a evolução do valor dos créditos de carbono no ano de 2000.

Em 2005, no cenário moderado o sequestro de uma tonelada passaria de US\$ 5,00 para US\$ 20,00 e em 2020 para US\$ 75,00 e se houvesse uma intensificação negativa do clima, a subida seria de US\$ 5,00 para US\$ 50,00 em 2005 e para US\$ 305,00 em 2020.

Apesar do atraso de sete anos na ratificação do protocolo de Quioto, iniciativas como o “Prototype Carbon Fund” do Banco Mundial e “Chicago Climate Exchange”, celebraram contratos de compra futura dos créditos de carbono (CENAMO, 2004).

5.2.3 O Brasil e o Protocolo de Quioto

Em 19 de Junho de 2002, o Brasil ratificou o Protocolo de Quioto, no que diz respeito à participação do Brasil no ciclo global de carbono com vantagens e desvantagens. As vantagens estão na matriz energética que é considerada uma das mais limpas do mundo (39% hidroelectricidade e 18% biomassa) e por seu território possuir grande parte das florestas do mundo. A grande desvantagem está na emissão de carbono pelas queimadas, na agricultura tradicional e no desmatamento das florestas (MONZONI, 2000).

As emissões do Brasil representam 2,5% das mundiais, segundo Viola (2002) “25% advindo da indústria e da agricultura moderna e 75% da agricultura tradicional, da conversão de uso na fronteira agrícola e das atividades madeireiras ineficientes e predatórias”. Se o desmatamento fosse considerado, as emissões brasileiras subiriam para 4,2%, ou seja, duas vezes maior que as emissões na queima de combustíveis fósseis e biomassa (MONZONI, 2000).

O Brasil se opôs à regulação das florestas nativas defendendo a soberania nacional, posição que não foi defendida por outros países florestais como, por exemplo, Estados Unidos, Austrália, Rússia, etc., que, instituíram a regulamentação internacional das florestas.

O Brasil saiu vitorioso, pois durante as COPs determinou-se que as florestas nativas estariam fora do MDL, evitando assim o questionamento internacional do uso da Amazônia. Porém, as florestas em crescimento estão inseridas no MDL pelo

consenso que florestas em crescimento absorvem mais CO₂ que liberam, guardando o excesso em suas estruturas.

Já existem na Câmara dos Deputados projetos de lei para regular o mercado de carbono brasileiro, dando transparência e segurança às transações e regulamentando a cobrança de impostos. O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio em convênio com a Bolsa de Mercadorias & Futuros (BM&F) criou, em 06 de dezembro de 2004 o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões dando maior operacionalidade às transações (MAPA, 2005).

O Protocolo de Quioto não estabelece metas específicas para as indústrias, que na sua maioria são grandes fontes emissoras de GEEs. Cada país deve regulamentar sobre a redução de emissão dos gases aceitando que as indústrias também implantem projetos de MDL, utilizando energias alternativas e/ou a co-geração, visando à geração de créditos de carbono. Serve como exemplo, as usinas de cana-de-açúcar que podem ser beneficiadas pela co-geração de energia através da queima do bagaço de cana. A Companhia Açucareira Vale do Rosário em São Paulo, teve o seu projeto de créditos de carbono certificado. Com isso, a usina adquiriu 669.637 créditos de carbono que serão gerados em 7 anos e poderão ser negociados no mercado de carbono (CNI, 2005; CDM, 2003).

Estes créditos também podem ser adquiridos em fundos que negociam estes papéis.

O Fundo Protótipo de Carbono do Banco Mundial associou-se à empresa Plantar, para produzir ferro gusa com carvão vegetal vindo de florestas renováveis certificadas, plantadas em 23.100 hectares 5,3 milhões de dólares nos primeiros 7 anos 12,8 milhões de toneladas em 28 anos.

5.2.4 COP 15

A COP 15 foi a décima quinta Conferência das Partes, realizada pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) realizada de 7 a 18 de dezembro de 2009, em Copenhague.

Grande parte da população mundial esperava uma profunda mudança de paradigmas. Esperava que os países participantes encontrassem um consenso na metodologia política para estabelecer quotas específicas a cada país para a redução de gases poluentes. Esperava um acordo para complementar o Protocolo de Quioto cujo primeiro período de compromisso vence em 2012.

Porém, esta conferência não resultou em metas claras para médio ou longo prazo para a redução do efeito estufa. A proposta mais arrojada foi da Noruega, que anunciou a meta de reduzir em 40% comparado aos níveis de 1990 suas emissões de carbono até 2020, enquanto que os Estados Unidos prevêem, se o Congresso aprovar, um corte de 17% em relação aos níveis de 2005, ou seja, não mais de 4 % abaixo dos níveis de 1990 (EBC – EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO 19/12/2009).

O Brasil através do Ministro CARLOS MINC, afirmou que fará cronogramas para cortar as emissões de CO₂ de 36% a 39% do volume para 2020 (FOLHA ONLINE acesso em 20/12/2009).

Os países desenvolvidos deverão prover recursos financeiros, tecnologia e capacitação para a adaptação dos países em desenvolvimento.

"Os países desenvolvidos fixam o objetivo de mobilizar conjuntamente US\$ 100 bilhões ao ano [o equivalente a cerca de R\$ 179 bilhões] antes de 2020 para enfrentar as necessidades dos países em desenvolvimento. Os fundos virão de uma ampla variedade de fontes, públicas e privadas, bilaterais e multilaterais." Um anexo determina que sejam doados, entre 2010 e 2012, US\$ 10, 6 bilhões pela União Europeia; US\$ 11 bilhões pelo Japão; e US\$ 3,6 bilhões pelos EUA (FOLHA UOL acesso em 20/12/2009).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

O aumento da taxa de carbono no Brasil provém de duas fontes: o uso de combustíveis fósseis e o desmatamento. Para minimizar este impacto o desafio é utilizar a bioenergia da cana-de-açúcar, planta que resiste às intempéries e em média 4 cortes, evitando o manejo anual do solo.

A cana cultivada atualmente no Brasil é uma variedade obtida através de melhoramento genético, que conferiu à planta maior produtividade e resistência a doenças (FIGUEIREDO *et al.*, 1995).

Segundo CASTRO (1999) o plantio da cana-de-açúcar na região Centro-Sul é feito em duas épocas conhecidas como “plantio de cana de ano” e “plantio de cana de ano e meio”. O plantio feito em outubro permite a colheita da cana com 12 meses (“cana de ano”), enquanto o plantio feito em janeiro-fevereiro permite a colheita com 18 meses (“cana ano e meio”).

Utilizando dos fenômenos físicos-químicos-biológicos e do avanço técnico-científico, serão apresentados neste capítulo: o mapa de localização das áreas de coleta dos solos, a análise química dos solos e a metodologia utilizada para coletas e análises dos solos para averiguar a eficiência do sistema proposto para medição de $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$.

6.1 Área Experimental

O estudo foi conduzido em áreas pertencentes ao Centro de Ciências Agrárias no Campus de Araras, unidade da Universidade Federal de São Carlos, na cidade de Araras, Estado de São Paulo.

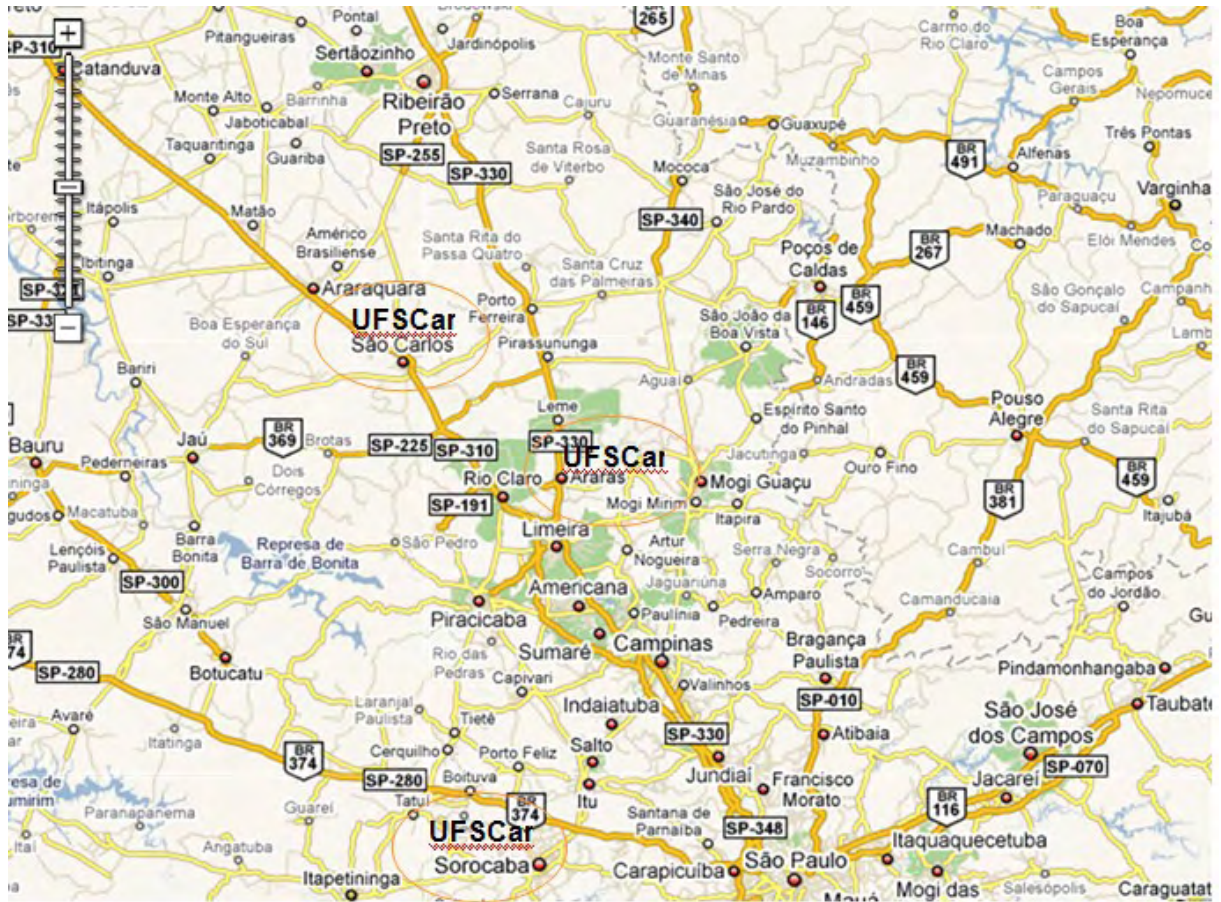


Figura 16 - Campus de Ciências Agrárias de Araras (SP) unidade da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) localizado no Km 174 da Rodovia Anhanguera



Figura 17 – Local de coleta das amostras de solo: Centro de Ciências Agrárias UFSCar – Araras (SP)

Localizado no Km 174 da Rodovia Anhanguera, a 611 metros acima do nível do mar, e coordenadas geográficas: latitude 22°18'00" S e longitude 47°23'03" W, clima CWa, mesotérmico, com verões quentes e úmidos e invernos secos (dados meteorológicos de 30/09/2009, elaborado pelo Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural, Centro de Ciências Agrárias UFSCar). Os 230 hectares de extensão, onde hoje funcionam laboratórios, salas de aulas e toda a infra-estrutura do Centro de Ciências Agrárias (CCA), até o ano de 1953 eram tomados por plantações de café e pertenciam à Fazenda Santa Escolástica, a partir de novembro daquele ano por meio do Programa Nacional de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), órgão ligado ao Instituto de Açúcar e Álcool (IAA) até hoje é ocupado com cultura de cana-de-açúcar, sendo que em algumas áreas para efeito de estudos é feita a rotatividade com soja.

Os solos das áreas foram classificados como Latossolo Vermelho Distroférrico típico, textura argilosa (FORTES *et al.*, 2003).

6.2 Condições experimentais

– Amostragem

As coletas de amostras solo foram realizadas em três áreas diferentes, identificadas como Quadra 1 (Q1), Quadra 5 (Q5) e Quadra 10 (Q10) pelo mapa do Centro de Ciências Agrárias e essa nomenclatura permanece neste trabalho.

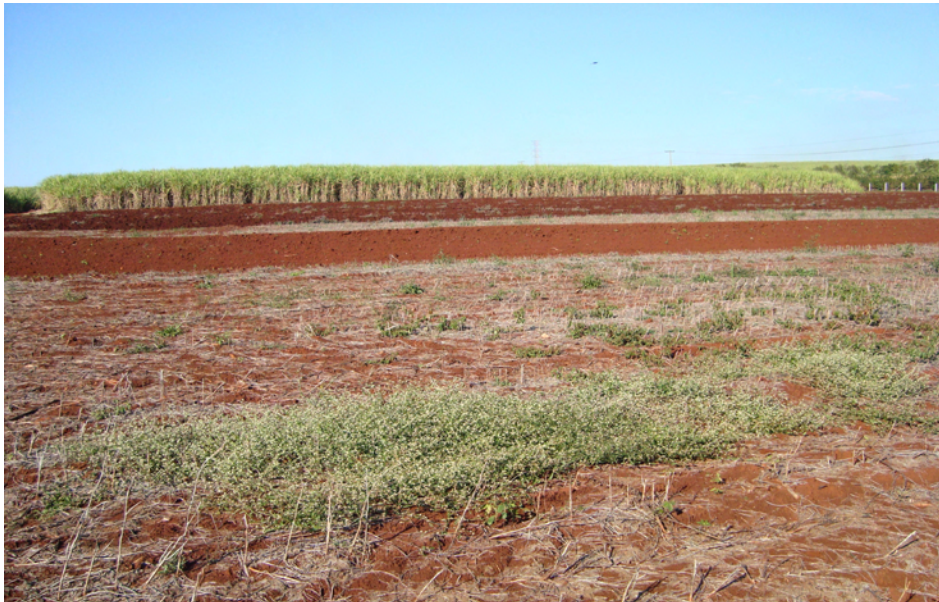


Figura 18 – Foto da Quadra 1: Solo nu sem cobertura vegetal após colheita de soja aguardando preparo e plantio de cana-de-açúcar



Figura 19 – Foto da Quadra 5: Solo preparado após colheita de soja, com cana-de-açúcar em brota



Figura 20 – Foto da Quadra 10: Solo com cobertura vegetal (palhada) e cana-de-açúcar em fase de corte

– Materiais

Para a retirada das amostras do solo foram utilizados cavadeira reta, cavadeira articulada e um dispositivo de coleta de amostra idealizado durante a realização deste trabalho para minimizar o impacto das amostras de solos coletados

para análises. Um modelo gerado em software *Inventor* do coletor de amostra desenvolvido neste trabalho está ilustrado na figura 21 e os desenhos técnicos com maiores detalhes encontram-se nas figuras A1, A2 e A3 do Anexo C.

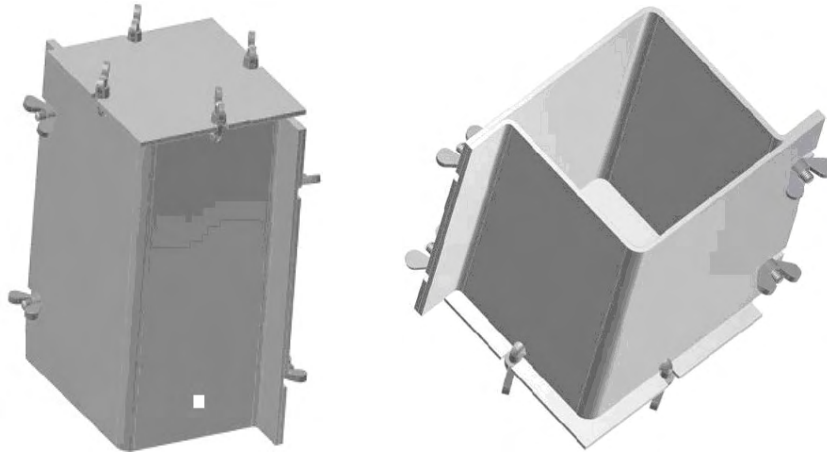


Figura 21 – Esquema do dispositivo de coleta de amostra de solo

6.2.1 Análise química do solo

As amostras de solo foram removidos com um trado de 25 mm = 1 pol, normalmente há incrementos de profundidade de 100 mm = 4 pol e amostras de três ou mais tradagem são misturadas a fim de conseguir uma amostra representativa de aproximadamente 150 g.

A finalidade da análise química do solo determina a quantidade de nutrientes que o solo será capaz de fornecer às plantas. Serve ainda para verificar se há acidez superficial, a qual impede o crescimento das raízes, fazendo com que a cultura aproveite mal os elementos do solo. O bom aproveitamento gera vitalidade na planta e, portanto, melhora o ciclo fotossintético e a quantidade emitida de CO₂ é sequestrada na fotossíntese da cana-de-açúcar.

Tabela 3 – Análise físico-química das amostras de solo.

| Amostras | P Resina | M.O. | pH | K | Ca | Mg | H+ Al | SB | V % |
|----------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------------------------|----|----|-------|------|--------|
| | mg/dm ³ | g/dm ³ | Ca Cl ₂ | mmol _e /dm ³ | | | | | |
| Q.1 | 7 | 27 | 5,6 | 1,3 | 32 | 14 | 26 | 47,3 | 65 |
| Q.5 | 22 | 20 | 5,7 | 2,4 | 37 | 17 | 33 | 56,4 | 63 |
| Q.10 | 11 | 22 | 5,2 | 1,8 | 34 | 12 | 29 | 47,8 | 62 |

Na tabela 3 encontram-se detalhadas as características químicas do solo na camada de 0 a 25 cm de profundidade, avaliadas em 24/08/2009 pelo Laboratório de Análise Química de Solo e Planta – Programa de Avaliação de Fertilidade de Solo da UFSCar – Araras (SP).

– Principais fatores que interferem na vida útil de uma planta

A improbabilidade de o solo fornecer às plantas todos os nutrientes necessários para o seu desenvolvimento faz da adubação mineral uma atividade essencial para a agricultura. Sempre que possível, o agricultor deverá optar pela adubação orgânica. Na impossibilidade desta, a adubação mineral deverá ser realizada para aumentar a produtividade.

A seguir, são apresentadas as funções e influências dos nutrientes do pH e umidade do solo.

Fósforo – P resina (mg/dm³) – É o elemento estrutural necessário para a transferência de energia além de elemento regulador via fosforilação e desforilação de enzimas. O fósforo é importante também para uma brotação eficiente (HAAG *et al.*, 1987).

Matéria orgânica – a matéria orgânica tem poder tamponante e promove estabilização do pH do solo. Uma parte considerável de matéria orgânica do solo é formada por raízes e microrganismos. No solo, o teor de carbono em equilíbrio com determinado tipo de vegetação é função das adições e da taxa de decomposição da matéria orgânica. Essa relação pode ser expressa pela fórmula: $c = \frac{bm}{k}$, onde c é a quantidade de carbono orgânico em equilíbrio no solo (t/ha), b a quantidade anual de matéria orgânica (%) adicionada ao solo, m a taxa de conversão do material

orgânico fresco em carbono orgânico do solo (t/ha) e k a taxa de decomposição anual da matéria orgânica (%) (KERBAUY, 2008).

Potencial de hidrogênio (pH) – o pH exerce papel importante no transporte de íons. Oscilações no pH do solo e principalmente da rizosfera exercem influência sobre nutrientes essenciais, bem como elementos que podem exercer fitotoxicidade (KERBAUY, 2008).

Potássio (K) – é importante na regulação osmótica, homeostase iônica, relações hídricas, movimentos estomáticos, fotossíntese, movimentos nas plantas entre outros fatores. A ausência desse íon prejudica a síntese da parede e a turgescência celular (KERBAUY, 2008).

Cálcio (Ca) – a absorção do Ca^{2+} depende tanto de seu suprimento no solo como na taxa de transpiração. O papel importante desse cátion regulador de vários aspectos do desenvolvimento das plantas (KERBAUY, 2008).

Magnésio (Mg) – é um constituinte estrutural da clorofila, atua na conformação de proteínas e ativação de enzimas. É altamente móvel no floema e, portanto na sua ausência, sintomas de deficiência manifestam-se, sobretudo, nas folhas mais velhas da planta (KERBAUY, 2008).

Alumínio (Al) – é um dos elementos mais abundantes no solo. Em solos ácidos encontra-se, geralmente, em quantidade elevada. Em solos ácidos encontra-se como alumínio solúvel, enquanto em pH elevados encontra-se na forma insolúvel (MEYER *et al.*, 1983).

Umidade do solo – a água é o principal veículo que faz com que as plantas absorvam os íons. Portanto, um baixo teor de água no solo induz à deficiência mineral (MEYER *et al.*, 1983; KERBAUY, 2008).

A cana-de-açúcar apresenta um sistema radicular profundo, um ciclo vegetativo econômico de quatro anos e meio ou mais e uma intensa mecanização que se processa durante esse longo tempo de permanência da cultura no terreno. O preparo do solo deve ser profundo e cuidadoso e antes de fazer a adubação, é necessário analisar o solo para saber quais suas características e os elementos carentes. Não existe receita exata, mas algumas experiências demonstraram que a cana-de-açúcar é muito exigente em elementos minerais (EMBRAPA, 1997).

Para a formação dos canaviais são preferíveis os solos aluvionais, localizados nas baixadas, planos, profundos, porosos e férteis. Algumas pesquisas concluíram que a produtividade dessa cultura é excelente quando cultivada em solos com pH entre 7 e 7,3. Segundo a EMATER-PA, a cana se desenvolve bem em solos de pH 5,5 a 6,5 e exige correção em caso dos solos mais ácidos.

Dados obtidos no Manual de métodos de análise de solos da EMBRAPA (1997) permitem concluir que o solo estudado apresentou análise química dentro dos padrões ideais para o cultivo da cana-de-açúcar, o que demonstra o cuidado utilizado nestas áreas experimentais.

6.2.2 Procedimentos

6.2.2.1 Coleta de amostras de solo

As amostras foram coletadas em 5 pontos aleatórios dentro de cada quadra, totalizando em quinze amostras parafinadas e três amostras mistas com solo dos 5 pontos de cada quadra, retirados a uma profundidade de 0 cm a 30 cm.

A coleta de cada amostra demorou em média 60 minutos. Cada amostra foi devidamente parafinada em campo no local de retirada (com parafina fundida à temperatura de 60 °C aproximadamente), para evitar efusão de gases.

O coletor de amostras foi confeccionado com aço, chapa de 3 mm constituído por 3 partes e 8 parafusos com um lado chanfrado para facilitar a retirada do solo.

– Coleta de amostras parafinadas

A técnica utilizada para retirar a amostra foi muito simples, porém cuidadosa.

Marcava-se o lugar desejado, cavava-se mantendo íntegro o torrão de solo a ser coletado em seguida. O coletor era colocado sobre o torrão e pressionado lentamente para não abalar as estruturas do solo e evitar impactos e perda de gases, mais especificamente CO₂.

– Coleta de solo com amostra mista e processo de preparação

Além destas amostras foram coletadas em sacos plásticos estéreis mais três amostras mistas com solo no mesmo local das 5 posições de cada quadra, retirados a uma profundidade de 0 cm a 30 cm . Estas amostra foram homogeneizadas e levada para o laboratório onde passaram por processo de secagem pelo período de 20 dias (figura 22) e em seguida tamisadas com peneira de malha a = 2,5 mm e peneira de malha f = 5,0 mm, sabendo que a granulometria e compactação do solo interfere na retenção de CO₂, gases em geral e água (BACCHI, 2005).



Figura 22 – Foto do solo em processo de secagem

6.2.2.2 Montagem do sistema para medida de CO₂

Para executar em laboratório a quantificação de emissão de CO₂ de solo, houve a necessidade de desenvolver uma aparelhagem composta de 15 recipientes de vidro com capacidade para 2,8 litros de marca Invicta, mangueira de silicone incolor e amarela, conexão para mangueira de jardim, divisor de ar para aquário e cola quente para vedação.

O experimento foi realizado com cinco amostras para cada uma das três áreas de coleta (figuras 18,19 e 20) totalizando quinze amostras.

O sistema foi montado formando conexões entre os recipientes em série e paralelo. Desta maneira a medida do gás pode ser feita de um único frasco ou combinações entre eles. O sistema conta com 3 válvulas A, B e C (figura 23). As válvulas A e B (figura 23) controlam saída do gás formado no sistema e entrada de ar atmosférico e a válvula C controla a passagem de gás CO₂ mais vapor de água e a passagem direta de qualquer gás formado no sistema ou a passagem de ar atmosférico para limpeza do sistema mestre, que é constituído pelas mangueiras que interligam os 15 frascos. As figuras 23 e 24 mostram a montagem do sistema antes da colocação do solo.



Figura 23 – Foto do sistema: reservatório de solo para medição de liberação de CO₂



Figura 24 – Foto do sistema de armazenamento de solo para medida de CO₂

Para destacar a extremidade do sistema de ligação ao LI-COR 840 (características do aparelho descrita no item 3.5.1), foi escolhido um frasco de tampa azul (figura 26) onde é conectado um compressor de ar, marca Boyu, modelo S – 1000 A com 2 saídas, responsável pela sucção do gás formado e acumulado nos frascos através de um conector de mangueira (figura 26) , que passa pelo filtro e segue para o leitor onde se encontra o sistema de radiação infravermelha não dispersiva para a leitura do fluxo de CO₂ formado no solo. Em seguida os dados são transmitidos para um computador que fornece os valores de CO₂ em ppm (parte por milhão) e os valores de vapor d'água em ppt (parte por trilhão ou milimol) além dos gráficos de CO₂ e H₂O. A figura 26 mostra o sistema em funcionamento.



Figura 25 – Foto do compressor de ar com conector de mangueira



Figura 26 – Foto do esquema da unidade de medição de CO₂ liberado pelo solo, com o analisador de gases LI-COR 840

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como parte das atividades necessárias a execução deste trabalho, bem como de outros que venham a ser elaborados dentro da mesma linha de pesquisa, houve a necessidade de se projetar e construir equipamentos adequados para tal.

O equipamento montado para simular as situações de campo em laboratório para o estudo da quantificação de CO₂ de solo mostrou-se eficiente para as variáveis observadas com base em resultados de pesquisas em áreas semelhantes deste trabalho e medidas realizadas em campo com analisador Li-Cor 6400 (SING; GUPTA,1977; TEDESCHI *et al.*, 2006).

A vantagem desse equipamento é o baixo custo para sua montagem e, facilita o trabalho do pesquisador que em futuras pesquisas poderá testar outras variáveis independente da situação climática sazonal, da presença ou não da luz solar e sua relação com a fotorrespiração, [fenômeno de liberação de CO₂ na luz, funcional e metabolicamente ligado a fotossíntese (FERRI *et al.*,1985)] uma das características fisiológicas mais importantes que diferenciam as plantas C₄ das C₃.

A cana-de-açúcar, planta de interesse econômico, vem se destacando cada vez mais nas pesquisas científicas devido a grande área cultivada e a preocupação com a mitigação dos impactos ambientais provocado desde a preparação do solo até sua colheita, seu transporte, o processamento industrial e a produção de biocombustível.

As análises desenvolvidas para testar o sistema foram: medidas de CO₂ e vapor de água de três tipos de solos descritos anteriormente.

Os dados obtidos da concentração de CO₂ e da concentração de vapor d'água pelo sistema idealizado estão apresentados na tabela 4, e os valores médios das amostras Q_a e Q_f de cada tipo de solo estudado estão na tabela 5 e foram calculados por média aritmética representado por:

$$M = \frac{\sum(Q_f + Q_a)}{5} \quad (25)$$

onde 5 é o número de amostras de cada tipo de solo.

As figuras 27(a, b), 28(a, b) e 29 apresentam os resultados da análise para a emissão de CO₂ do solo e vapor de água medidos com o analyser LI-COR 840.

Tabela 4 – Medidas de emissão de CO_{2(g)} e H₂O_(v) do solo.

| Recipient e | Amostra | CO₂ (ppm) | H₂O (ppt) |
|--------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | Qf1 | 476,21 | 11,128 |
| 2 | Qf1 | 507,09 | 11,160 |
| 3 | Qa1 | 486,37 | 11,138 |
| 4 | Qa1 | 475,54 | 11,158 |
| 5 | Qa1 | 487,23 | 12,321 |
| 6 | Qf5 | 458,33 | 11,213 |
| 7 | Qf5 | 521,11 | 11,254 |
| 8 | Qa5 | 475,36 | 11,165 |
| 9 | Qa5 | 486,22 | 11,251 |
| 10 | Qa5 | 492,01 | 11,189 |
| 11 | Qf10 | 521,33 | 11,325 |
| 12 | Qf10 | 479,65 | 11,147 |
| 13 | Qa10 | 468,16 | 11,254 |
| 14 | Qa10 | 445,98 | 11,165 |
| 15 | Qa10 | 476,25 | 11,182 |

Tabela 5 – Média aritmética das medidas de emissão de CO_{2(g)} e H₂O_(v) do solo.

| Amostra (valor médio) | CO₂ (ppm) | H₂O (ppt) |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Qf1 | 491,65 | 11,144 |
| Qa1 | 483,05 | 11,539 |
| M1 | 486,49 | 11,381 |
| Qf5 | 489,72 | 11,234 |
| Qa5 | 484,53 | 11,202 |
| M5 | 486,61 | 11,214 |
| Qf10 | 500,49 | 11,236 |
| Qa10 | 463,46 | 11,200 |
| M10 | 478,27 | 11,215 |

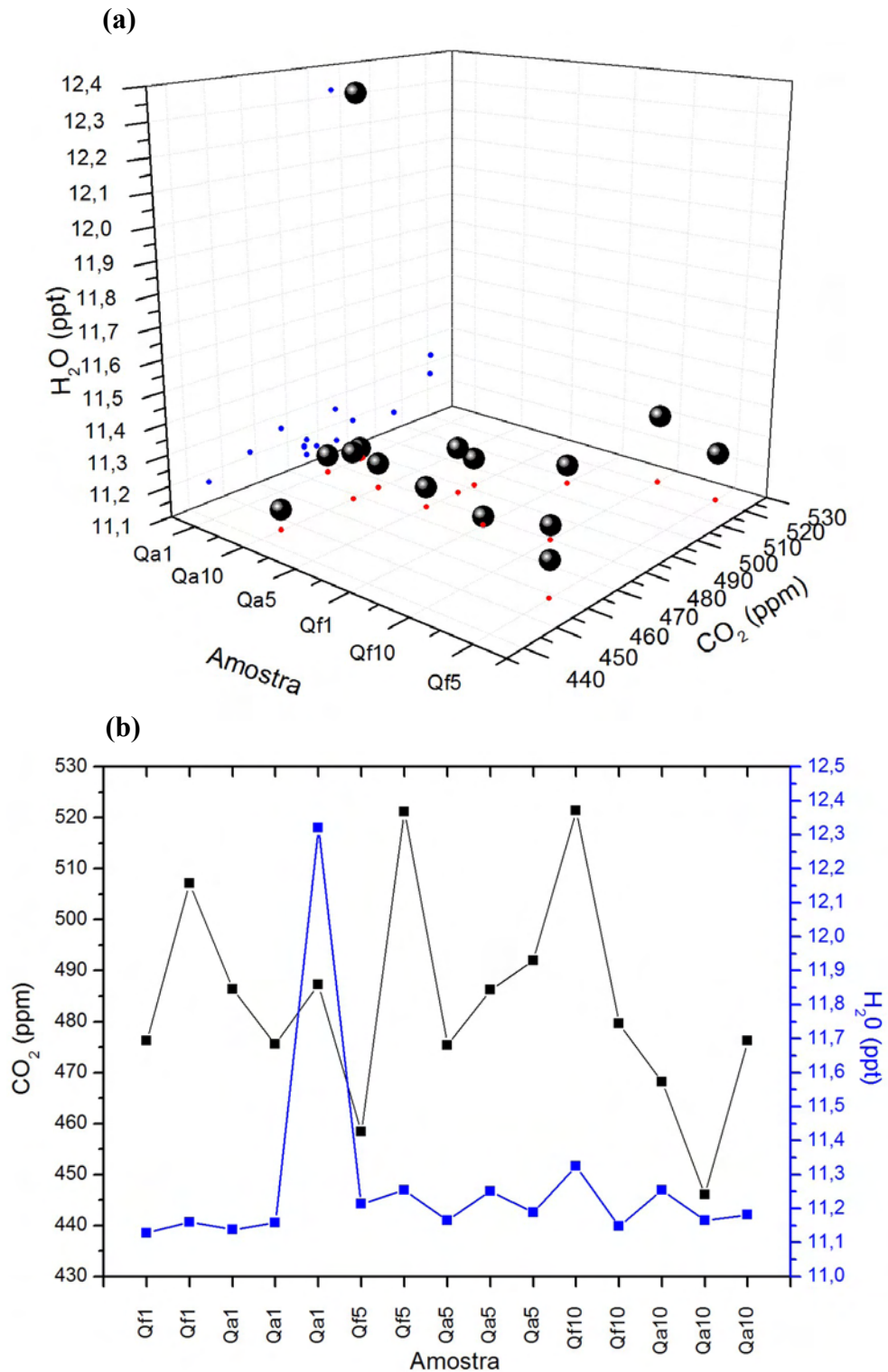


Figura 27 – Quantidade de CO₂ produzido e vapor de água liberado no ensaio respirométrico, durante o período de 20 dias, envolvendo: Q1 - solo sem cobertura vegetal após colheita de soja, Q5 - solo preparado mecanicamente com cana-de-açúcar em brota e Q10 - solo com palhada e cana-de-açúcar em fase de corte; Qa1, Qa5 e Qa10 preparados com peneira 2,5 mm e Qf1, Qf5 e Qf10 preparados com peneira 5,0 mm; (a) representação espacial e (b) representação plana

Para melhor análise, os dados das amostras de cada gás juntamente com os valores dos erros foram usados para traçar gráficos separadamente, conforme estão ilustrados na figura 28(a, b).

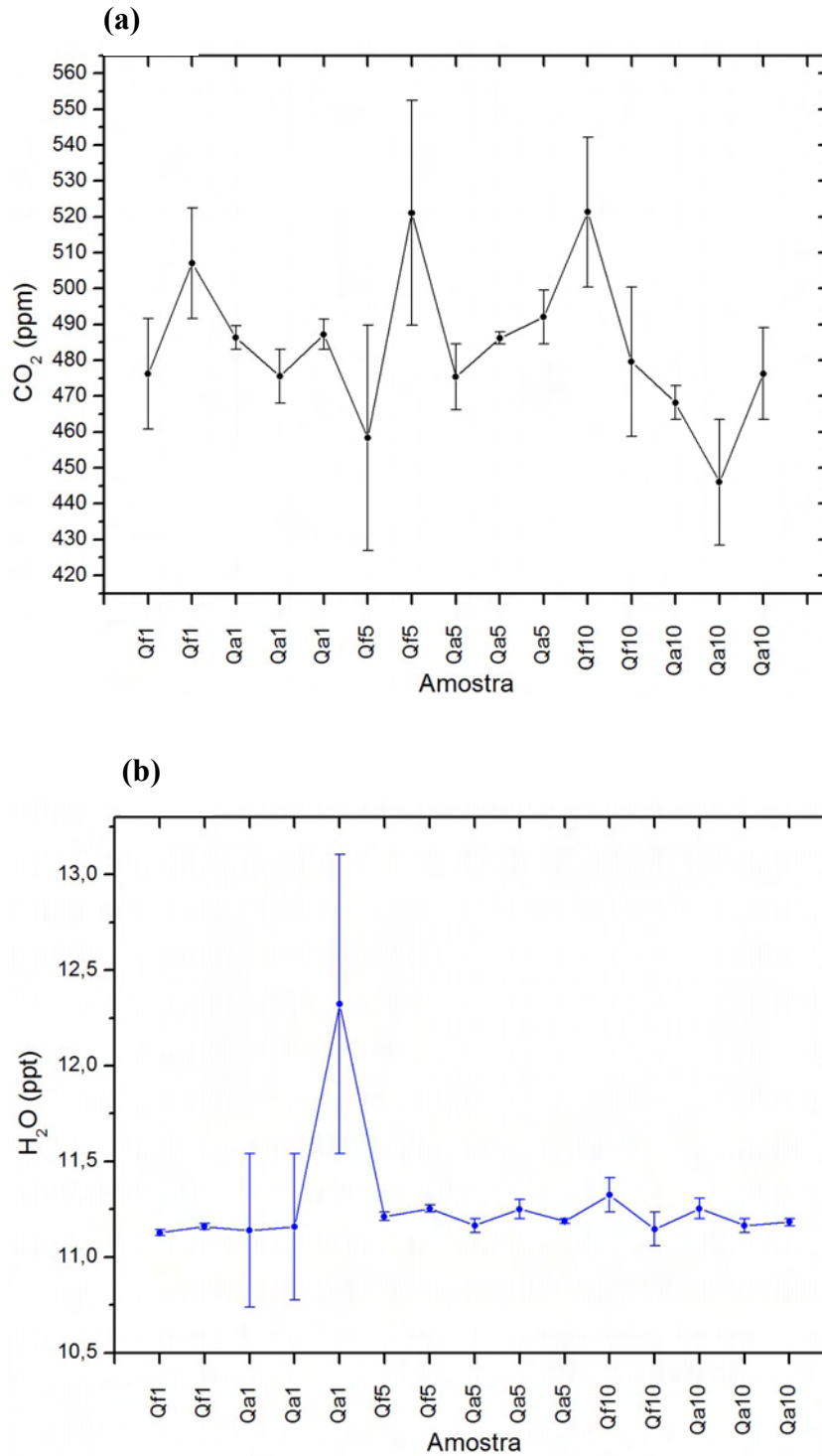


Figura 28 – Concentrações de (a) CO_{2(g)} e (b) H₂O_(v) emitidas pelo solo

A figura 28(a) apresenta os valores de emissão de CO_2 das quinze amostras com os erros para cada medida. Os erros, considerável na maioria das amostras, deve-se a instabilidade do CO_2 . Fatores externos, como a simples passagem de um veículo próximo ao laboratório e a respiração do analista próximo a entrada de ar de arraste do sistema de leitura das amostras, justificam tais erros.

Para o caso da emissão do vapor de água [figura 28(b)] nota-se que as amostras do solo 1 preparadas com peneiras 2,5 mm (Qa1) apresentam os maiores erros. A sensibilidade do LI-COR 840 justifica estes dados, pois a leitura destas amostras foi realizada em dias chuvosos.

Os valores médios para cada tipo de solo preparado pelas peneiras 2,5 mm (Qa1, Qa5 e Qa10) e 5,0 mm (Qf1, Qf5 e Qf10) bem como a média das 5 amostras para cada tipo de solo (M1, M2 e M10), são ilustrados através de um gráfico de barras mostrando o fluxo de $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ na figura 29. A maior média de concentração de vapor de água é do solo 1 preparado com peneira 2,5 mm (Qa1), fato anteriormente explicado.

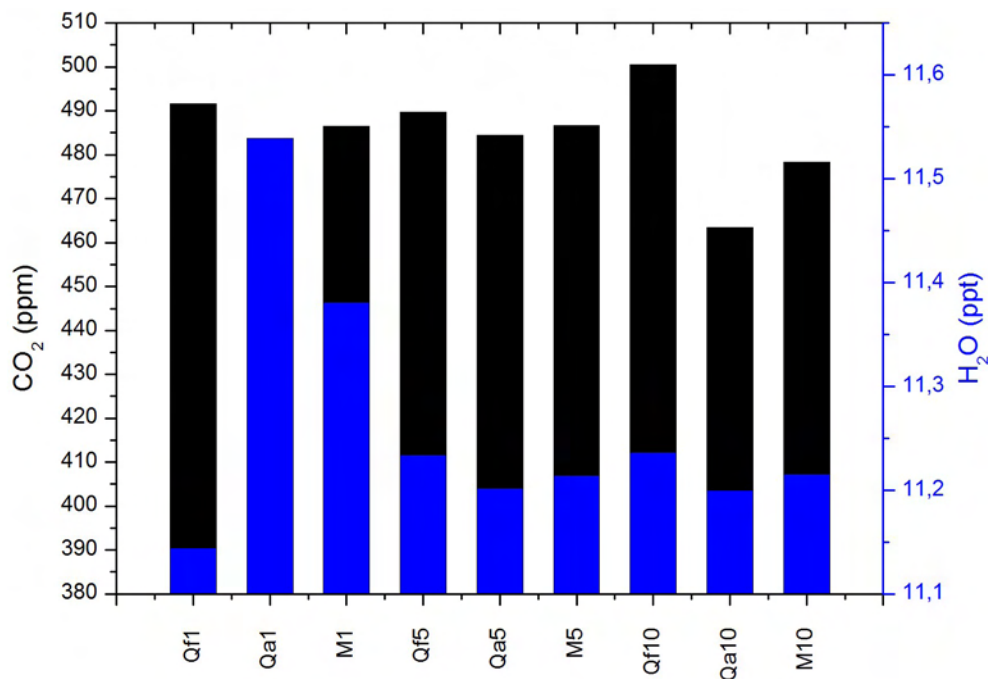


Figura 29 – Relação entre o fluxo de $\text{CO}_{2(g)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ e valores médios de cada tipo de solo

A figura 30 apresenta os valores das médias aritméticas dos três tipos de solo, proporciona visualizar e comparar melhor as emissões de gás carbônico e vapor de água dos solos.

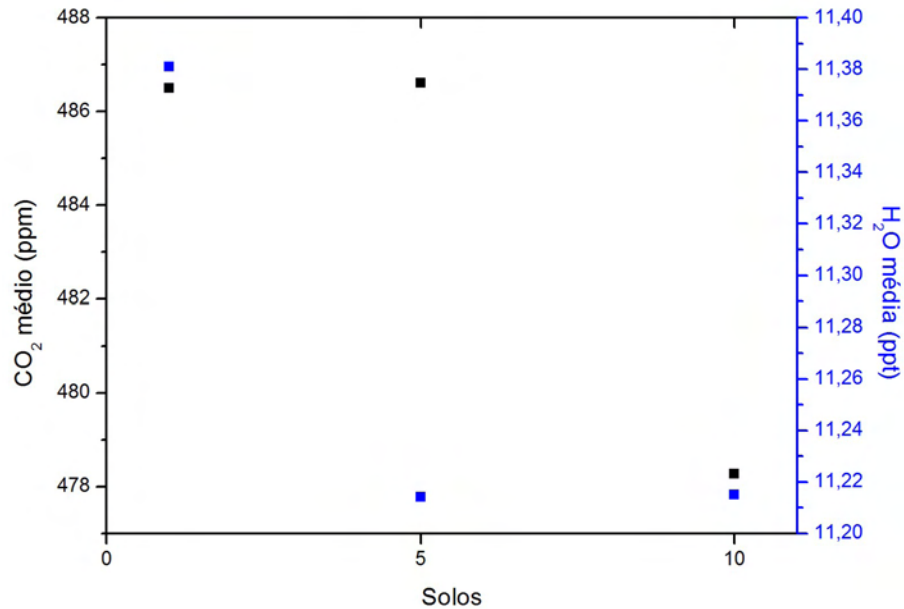


Figura 30 – Valores médios de CO_{2(g)} e H₂O_(v) para os três tipos de solo (1, 5 e 10)

Os maiores valores de emissão de gás carbônico são para os solos sem cobertura vegetal após colheita de soja (1) e preparado mecanicamente após colheita de soja com cana-de-açúcar em brota (5). Por outro lado, o solo com cana-de-açúcar e cobertura vegetal (palhada) em fase de corte (10) apresentou o menor valor de emissão de CO_{2(g)}.

Em relação ao vapor de água liberado, o solo em descanso (1) demonstrou maior liberação, enquanto os solos com plantio de cana-de-açúcar em brota (5) e em fase de corte (10) apresentaram menor liberação de vapor de água.

A descrição detalhada destes resultados será apresentada nos próximos tópicos 7.1 e 7.2.

7.1 Análise da emissão de CO₂ e vapor de água em relação à granulometria do solo

A análise dos valores médios das amostras com relação à granulometria observa-se que todas as amostras (Qf) que foram peneiradas com malha de 5,0 mm apresentam um espaço maior entre as partículas e, portanto, menos compactadas indicando a um valor maior em emissão de CO₂ (BACCHI, 2005). Na figura 29 os valores de concentração de água destas amostras não resultaram em diferenças representativas nas amostras Q5 e Q10, mas diferiu das amostras Q1 que de acordo com a análise físico-química das amostras dos solos (tabela 3) mostra a diferença na composição dos solos em relação à matéria orgânica na ordem de 7,0 g/dm³ entre Q1 e Q5 e de 5,0 g/dm³ entre Q1 e Q10.

Segundo KERBAUY (2008), a matéria orgânica é formada de raízes e microrganismos o que confere uma correlação dos dados, lembrando que a amostra Q1 foi coletada em solo após colheita de soja deixando no solo muitas raízes. A respiração de raízes tem um papel fundamental nas estimativas do efluxo de CO₂ do solo, devido ao fato de receber menor influência da falta/excesso de umidade no solo, ao contrário da respiração microbiana, que é mais influenciada pela sua variação. A umidade do solo pode tanto favorecer como inibir a produção de CO₂, havendo teoricamente uma umidade ótima que maximiza a respiração (ZANCHI *et al.*, 2004).

Analisando também as médias entre as diferentes granulometrias de amostras de mesmo solo, observa-se também que há um pequeno aumento de emissão de CO₂ para os solos peneirados com peneira de malha 5,0 mm (Qf) em relação a malha de 2,5 mm (Qa), fato que leva a concluir que a textura ou a granulometria do solo, explica a porosidade a drenagem, a permeabilidade e a aeração de um solo e, portanto, a proporção água-ar (WINTER, 1976; BRAGA *et al.*, 2002) e, em consequência emissão de CO₂.

7.2 Análise quanto à presença e intensidade de vegetação no solo

Dentre as amostras Q1, Q5 e Q10 as amostras de solo Q1 apresentaram as menores emissões de CO₂ enquanto que as amostras Q5 foram as que apresentaram valores mais altos de emissão e as amostras Q10 valores intermediários.

As amostras de solo Q1 foram coletadas em uma área de solo compactado em descanso após plantação e colheita de soja aguardando preparo mecanizado e plantação de cana-de-açúcar, pois essa área experimental é cultivada com rotatividade de soja e cana-de-açúcar.

Segundo PANOSSO (2006) e LA SCALA JUNIOR *et al.*, (2003), o solo sem vegetação no período de descanso também apresenta emissão de CO₂ que está relacionada a uma rede de atividades, como respiração das raízes, decomposição de matéria orgânica e granulometria do solo incluindo sua própria biomassa e atividades microbianas, dadas as condições de temperatura, umidade, acidez ou alcalinidade.

RETH *et al.*, (2005), desenvolveram um modelo para estimar o fluxo de emissão de CO₂ em solo desprovido de vegetação e concluíram que a temperatura e o teor de água são os principais fatores que influíram na taxa de emissão de CO₂.

As amostras Q5 foram coletadas em solo preparado mecanicamente, com cana-de-açúcar em brota iniciando o processo foliar (figura 19) e sob irrigação diária. Portanto, tem-se um solo sem compactação, com grau de umidade superior ao solo das outras amostras e raízes em fase de desenvolvimento. Segundo TAIZ E ZEIGER (2006) e KERBAUY (2008), raízes primárias e raízes jovens têm tecidos meristemáticos em contínuo processo de alongamento e diferenciação que são processos dispendiosos do ponto de vista energético e por isso respiram muito mais intensamente do que raízes com crescimento secundário.

As amostras Q10 foram coletadas em solo com plantas adultas e coberto de palhada. Acredita-se que o valor intermediário da emissão de CO₂, está relacionado à umidade retida pela palhada e as raízes tem atividade menor que plantas mais jovens, porém a troca gasosa é compensada pelas folhas que são as que mais realizam troca com o ambiente (KERBAUY, 2008).

Segundo TAIZ E ZEIGER (2006) e KERBAUY (2008), quando a expansão foliar atinge o máximo, taxas elevadas de assimilação de CO₂ (fotossíntese) são também atingidas e a liberação de CO₂ é mantida constante devido à taxa respiratória de manutenção da fotossíntese, de forma que em geral só há decréscimo quando a folha já está praticamente morta.

8 CONCLUSÃO

Nas condições utilizadas neste trabalho pode-se fazer as seguintes conclusões.

A estrutura projetada e montada para medição de CO_2 do solo, confeccionada com materiais facilmente encontrado no mercado, adequou-se perfeitamente às condições estabelecidas pelo fabricante da LI-COR Biociences – CO_2 Analyzer de $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ a pressão atmosférica.

A análise dos gráficos de erros e a observação do ambiente permite concluir que o Li-Cor 840 é muito sensível apresentando variações de acordo com as variações de fatores externos, tais como: dia chuvoso – aumento da umidade do ar que se adiciona a $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ do sistema (em estudo) quando em análise, aumento do $\text{CO}_{2(g)}$ com a simples respiração do analista próximo ao sistema em estudo ou com a presença de veículos em movimento ou com a queima de uma porção de capim nas imediações do laboratório.

O tempo para obtenção da leitura quantitativa do $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ formados nos frascos com amostras de solos variaram de acordo com a distância destes em relação ao analisador. Os frascos mais próximos (do 1º até o 6º) do equipamento apresentaram sua leitura entre 1'30" e 6'54" e os mais distantes (como o 10º frasco) demorou 28'15" para chegar ao analisador. Acredita-se que a utilização de um gás de arraste inerte como o gás nitrogênio (N_2) agilizará a leitura. Este gás terá como função a condução de $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ e também a purga do sistema que conduzem o $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ para o analisador.

A pesquisa feita sobre leitura de CO_2 através de aparelhos de radiação infravermelha não dispersiva como o analisador Li-Cor-840, constata em termos técnicos que o N_2 um gás formado por moléculas diatômicas homonucleares possui momentos dipolares iguais a zero durante todo o tempo de sua vibração de estiramento e, portanto não são detectadas pelo analisador de radiação infravermelha não dispersiva. Conclui-se então que o N_2 não irá

alterar a leitura de CO₂ e de vapor de água como ocorre com o ar atmosférico que varia com o ambiente.

Constatou-se também que a granulometria do solo explica a emissão de CO_{2(g)}. Os valores médios obtidos entre Qa1 e Qf1 uma variação de 8,6 ppm, em Qa5 e Qf5 a variação foi de 5,19 ppm e em Qa10 e Qf10 variação de 37,03 ppm de liberação de CO_{2(g)}.

Este trabalho evidenciou a relação entre os fatores bióticos e abióticos e a necessidade da integração entre diferentes áreas de estudo como Biologia, Química e Física Aplicada para um melhor entendimento dos resultados.

Do ponto de vista de obtenção de aplicações tecnológicas diretas dos dados aqui apresentados, é importante lembrar que as condições experimentais empregadas neste trabalho são distintas das encontradas no campo.

Os resultados obtidos dos fatores observados: granulometria do solo, medida de CO_{2(g)} e H₂O_(vapor), teor de matéria orgânica e as condições do solo com e sem vegetação verde, solo preparado para plantio e solo com plantas adultas e forrado com palhada e, a verificação da eficiência do sistema foi por comparação de dados obtidos em experimentos similares desenvolvidos em campo com o Analyser Li-Cor 6400 (LA SCALA JÚNIOR, *et al.*, 2003, PANOSSO 2006, *apud* RETH *et al.*, 2005).

9 RECOMENDAÇÕES

Em futuras amostragens para a avaliação da emissão de $\text{CO}_{2(g)}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ do solo em condições semelhantes à realizada neste trabalho, sugere-se a utilização de um controle de umidade e temperatura além da atividade biológica e quantificação de microrganismos do solo seco.

Avaliação de longo prazo para captar efeitos de temperatura e umidade do solo sobre as emissões de $\text{CO}_{2(g)}$ no solo.

Avaliar a utilização de um gás de arraste inerte como o $\text{N}_{2(g)}$ ao sistema de detecção substituindo o ar atmosférico do ambiente e, adaptação da bomba de sucção para realizar trabalho em campo com o analisador LI-COR 840.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A dois meses de encontro em Copenhague, reunião sobre clima termina com poucos avanços. **Agência Brasil**, EBC – Empresa Brasil de Comunicação, 9 out. 2009. Disponível em: <<http://www.agenciabrasil.ebc.com.br/noticias/>>. Acesso em: 10 out. 2009.

AINSWORTH, E.A.; LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free air-CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v. 165, p. 351-372, 2005.

ALMEIDA, S. de. **Projeto e construção de um processador eletrônico analógico destinado à separação de tempos de relaxação de estados atômicos ou moleculares excitados**. 2002. 83 p. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

ATKINS, P.; PAULA, J. **Físico-Química**. Tradução de Edilson C. da Silva, Márcio J.E.M. Cardoso, Oswaldo E. Barcia. Rio de Janeiro: LTC livros técnicos e científicos Editora S.A., vol. 2, 2002.

ÁVILA, A.M.H. Mudanças Climáticas. **Revista Multiciência**, Campinas, Edição n. 8, mai. 2007.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BNDES e MCT. **Efeito Estufa e a Convenção sobre a Mudança do Clima**. Brasil, 1999.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 2, p. 101–109, 2000.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

BRASIL já conta com um histórico de estudos que contribuem... Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros. ... Comparativa entre Ambientes Naturais e Reservatórios Hidrelétricos. **Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT)**, Primeiro Inventário Brasileiro. Disponível em: <www.epe.gov.br/.../NT%20%20Estudos%20socioambientais%20do%20PDE%202008-2017.p>. Acesso em: 2 out. 2009.

CENAMO, M.C. **Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono**. CEPEA, São Paulo, Brasil, 2004. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo_quioto.pdf>. São Paulo: Editora Fundação Petrópolis, 2002. Acesso em: 2 out. 2009.

CHRISPEELS, M.J.; SADAVA, D.E. IL ruolo dell'energia nell'accrescimento vegetale e nella produzione delle coltivazioni. In: **Biologia Vegetale Applicata**. Padova: Piccin Nuova Libreria, 1996.

CONHEÇA principais pontos do enfraquecido Acordo de Copenhague. **Folha Online**, da Reuters, 19 dez. 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ambiente/ult10007u669011.shtml>>. Acesso em: 17 jan. 2010.

COPPE/MCT. **Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro: COPPE/MCT, 2006. Disponível em: <www.usp.br/mudarfuturo/2009/pdf/09_05_22_cap4.pdf>. Acesso em: 2 out. 2009.

DADOS meteorológicos de 30/09/2009. **Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural**, Centro de Ciências Agrárias UFSCAR, Araras, 2009.

DIRETIVA 97/68/CE do **Parlamento Europeu e do Conselho**. 16 dez. 1997. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!prod!CELEXnumdoc&lg=PT&numdoc=397L0068&model=guichett>. Acesso em: 20 out. 2009.

EMATER, Paraná. **Análise de solo, tabela para transformação de resultados analíticos e interpretação de resultados**. Por JOSÉ OLEJNIK, NESTOR BRAGAGNOLO; UDO BUBLITZ; JOSÉ CARLOS CALDASSO DA SILVA. 4ª ed. Curitiba, 1997, 66p. (informação técnica 31).

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 01).

GHANNOUM, O.; VON CAEMMERER, S.; ZISKA, L.H.; CONROY, J.P. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, p. 931-942, 2000.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008.

KRUPA, S.V. Global climate change: Processes and products - An overview. **Environ Monitor Assess**, v. 46, n. 1-2, p. 73-88, 1997.

LA SCALA JÚNIOR, N.; PEREIRA, G.T.; PANOSSO, A. R. **Variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ num agrossistema desprovido de vegetação**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 88-95, 2003.

LECAIN, D.R.; MORGAN, J.A. Growth, gas exchange, leaf nitrogen and carbohydrate concentrations in NAD-ME and NADP-ME C4 grasses grown in elevated CO₂. **Physiologia Plantarum**, v. 102, p. 297-306, 1998.

MAGALHÃES, A.C.N. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar; aspectos do metabolismo do carbono na planta**. In: CASTRO, P.R.C., FERREIRA, S.O.,

MANUAL LICOR- 840. Disponível em:

<http://ftp.licor.com/env/LI-840/Manual/LI-840_Manual.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2008.

MANSFIELD, T.A.; HETHERINGTON, A.M.; ATKINSON, C.J. **Some current aspects of physiology**. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Agroenergia 2006–2011**. Brasília, Brasil, 2005.

MARENCO, J. **Alerta Ambiental: Semi-árido pode virar deserto**. Boletim NAE – Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. 25 mar. 2007. Disponível em:

<http://www.nae.gov.br/doc/sala_de_imprensa/boletim_digital_25_03_07.pdf>.

Acesso em: 20 out. 2009.

MARENGO, J. A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R.; LABORBE, R. **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. 2007

MARENGO J, A. **Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI** derivados dos Modelos Globais de Clima do 147. 2007

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SALATI, E.; AMBRIZZI, T. **Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Sumário Técnico. 2007. 54 p.

MEYER, B.; ANDERSON, D.; BÖHNING, R.; FRATTIANNE, D. **Introdução à fisiologia vegetal**. 2ª ed. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian, 1983.

MONZONI, M. **Mudança Climática - Tomando Posições**. Friends of the Earth -Programa Amazônia, São Paulo, Brasil, 2000.

MONZONI, M. **Critérios de Sustentabilidade para projetos de MDL no Brasil**. 2004.

MOORE, W.J. **Físico-Química**. 4ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda. EDUSP, 1976.

NETO, C. C. **Análise Orgânica: métodos e procedimentos para a caracterização de organoquímicos**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, vol.1, 2004.

NOVOS cenários climático. Disponível em:
<<http://www.amazonia.desenvolvimento.gov.br/public/arquivo/arq1229451238.pdf>>.
Acesso em: 2 out. 2009.

OVERBEEK, V. J. **Como vivem as plantas.** Tradução E. Malavolta. São Paulo: Editora Pioneira da Universidade de São Paulo, 1970.

WINTER, E.J. **A água, o solo e a planta.** Tradução Klaus Reichardt e Paulo L. Libardi. São Paulo: EPU e EDUSP – Editora da Universidade de São Paulo, 1976.

PAINEL Intergovernamental. Disponível em:
<http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/meio_ambiente_brasil/clima/painel_intergovernamental_de_mudancas_climaticas/>. Acesso em: 20 set. 2009.

REICHARDT, K. **Processos de Transferencia no sistema solo-planta-atmosfera.** 4ª. ed. rev. e amp. Campinas: Fundação Cargil, 1985.

REICOSKY, D. C.; LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 6, p. 1237–1243, 1993.

RELATÓRIO do IPCC/ONU. Paris, 2 fev. 2007. Disponível em:
<<http://www.ecolatina.com.br/pdf/IPCC-COMPLETO.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2009

ROCHETTE, P.; ANGERS, D. A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 3, p. 621–628, 1999.

RÚSSIA lamenta "discretos" resultados da cúpula de Copenhague. **Folha Online**, 19 dez. 2009. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/ambiente/ult10007u669077.shtml>>. Acesso em: 20 dez. 2009.

SAFRA de soja do Brasil 08/09 estimada em 64,14 mi. **Notícias Agrícolas**, 5 ago. 2008. Disponível em: <<http://www.noticiasagricolas.com.br/noticias.php?id=33977>>. Acesso em: 17 ago. 2008.

SERAFIM, M.E. et al. **Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 654-665, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n4/05.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2009. doi: 10.1590/S0100-69162008000400005.

SINGH, J. S.; GUPTA, S. R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. **The Botanical Review**, Bronx, v. 43, n. 4, p. 449-528, 1977.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

STUART, B. **Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications**. John Wiley & Sons, Ltd, USA, 2005.

SUTCLIFFE, F.J. **As plantas e a água**. Tradução Héstia E. T. Maciel. São Paulo: EPU – Editora Pesagógica e Universitária Ltda, v. 23, 1980.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Tradução Eliane Romanato Santarém, et al. 3ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TALBOTT, L.D.; ZEIGER, E. The role of sucrose in guard cell osmoregulation. **Journal Experimental of Botany**, v. 49, p. 329-337, 1998.

TOLENTINO, M.; ROCHA, R.C. Filho **A Química no efeito estufa – Química e Sociedade**, Brasil, n. 8, p. 10-14, 1998.

UMA Síntese do Quarto Relatório do IPCC. **Revista Multiciência**, Campinas: Edição nº 8, Mudanças Climáticas, mai. 2007. Disponível em: <www.multiciencia.unicamp.br/artigos_08/r01_8.pdf>. Acesso em: 2 out. 2009.

UNIVERSIDADE Estadual de Campinas, **Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – CEPAGR**. Disponível em: <<http://www.conpet.gov.br/quioto/home.php>>. Acesso em: 2 out. 2009.

WAND, S.J.E.; MIDGLEY, G.F.; JONES, M.H.; CURTIS, P.S. Responses of wild C₄ and C₃ grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO₂ concentration: a metaanalytic test of current theories and perceptions. **Global Change Biology**, v. 5, p. 723-741, 1999.

YAMADA, T.Y. (ed.) **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, p. 113-118, 1987.

ZANCHI, F.B.; GOMES, B.M.; VAN RANDOW, C.; KRUIJT, B.; MANZI, A.O. **Medições dos fluxos de dióxido de carbono e estimativa do “fetch” (área de influência) em pastagem e floresta em Rondônia**. 1o Congresso de Estudantes do LBA, ciclagem e armazenamento do Carbono, p. 13, 2002. Disponível em: <<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/humberto/TESES/Fabricio.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2009.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela A1: A região do Infravermelho (COSTA NETO, 2004, com modificação).

| Grandeza | Unidade | Região do infravermelho | | |
|--------------------------------------|---|---|--|--|
| | | Próximo* | Fundamental (propriamente dito) | Afastado* |
| Energia (ϵ) | Eléctron-Volt (eV) Kcal.mol ⁻¹ | 1,59 a 0,52 36,6 a 11,4 | 0,496 a 0,0496 11,4 a 1,14 | 0,049 a 0,0041 1,14 a 0,095 |
| Frequência Temporal (ν) | Número de ondas por segundo (s ⁻¹) | 3,84.10 ¹⁴ a 1,20. 10 ¹⁴ | 1,18 . 10 ¹⁴ a 1,18 . 10 ¹³ | 1,18 . 10 ¹³ a 1,10 . 10 ¹² |
| Frequência Espacial (ν) | Número de ondas por centímetro (cm ⁻¹) | 12820 a 4000 | 4000 a 400** | 400 a 33,3 |
| Comprimento de onda (λ) | Micrômetro (μ) (10 ⁻⁶ m) | 0,78 a 2,5 | 2,5 a 25 | 25 a 300 |

* do visível

** a maioria dos espectros convencionais cobre a faixa 4000 a 500cm⁻¹Constantes fundamentais da natureza: h (constante de Planck) = 6,6238.10⁻²⁷ erg.sc (velocidade da luz) = 2,99790.10¹⁰ cm.s⁻¹Relações fundamentais: $\epsilon = h\nu$ $c = \lambda\nu$ $\nu^{-1} = 1/\lambda$ Relações para conversão de unidades: $\epsilon = h\nu = hc \nu^{-1} = hc/\lambda$

Tabela A2: Conversão de unidades de medida no infravermelho (COSTA NETO, 2004).

| Para obter ⇨ | eV | kcal.mol ⁻¹ | s ⁻¹ | cm ⁻¹ | μ* | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Multiplique ⇩ | | Por ⇩ | | | Divida ⇩ | Por ⇩ |
| eV | 1 | 23,0605 | 2,418. 10 ¹⁴ | 8065,54 | 1,2398 | eV |
| kcal . mol ⁻¹ | 4,336. 10 ⁻² | 1 | 1,049. 10 ¹³ | 349,8 | 28,5914 | kcal.mol ⁻¹ |
| s ⁻¹ | 4,1357. 10 ⁻¹⁵ | | | | | |
| cm ⁻¹ | 1,2398. 10 ⁻⁴ | 9,537. 10 ⁻¹⁴ | 1 | 3,336. 10 ¹¹ | 2,998. 10 ¹⁴ | s ⁻¹ cm ⁻¹ |
| | | 2,859. 10 ⁻³ | 2,998. 10 ¹⁰ | 1 | | |

* Para obter valores nas outras unidades, a partir de μ, inverta a operação desta coluna.

ANEXO B

Tabela A3: Bandas de vibração no infravermelho de CO₂ (MOORE,1976, p. 686 *apud* LANDOLT-BORNSTEIN,1951).

| Comprimento de onda (μm) | Números quânticos vibracionais (ν_1, ν_2, ν_3) | | Atribuição das bandas |
|---------------------------------|--|--------------|---|
| | Estado inicial | Estado final | |
| | | | Vibração fundamental δ |
| 14,986 | 0 0 0 | 0 1 0 | Vibração de combinação $\nu (a) - \nu (s)$ |
| 10,4 | 1 0 0 | 0 0 1 | Vibração de combinação $\nu (a) - 2\delta$ |
| 9,40 | 0 2 0 | 0 0 1 | Vibração de combinação 3δ |
| 5,174 | 0 0 0 | 0 3 0 | Vibração de combinação $\nu (s) + \delta$ |
| 4,816 | 0 0 0 | 1 1 0 | Vibração de combinação $\nu (s) + \delta$ |
| 4,68 | 0 1 0 | 2 0 0 | Vibração de combinação $2\nu (s) - \delta$ |
| 4,25 | 0 0 0 | 0 0 1 | Vibração fundamental $\nu (a)$ |
| 2,27 | 0 0 0 | 0 2 1 | Vibração de combinação $2\delta + \nu (a)$ |
| 2,006 | 0 0 0 | 1 2 1 | Vibração de combinação $\nu (s) + 2\delta + \nu (a)$ |
| 1,957 | 0 0 0 | 2 0 1 | Vibração de combinação $2\nu (s) + \nu (a)$ |
| 1,574 | 0 0 0 | 2 2 1 | Vibração de combinação $2\nu (s) + 2\delta + \nu (a)$ |
| 1,433 | 0 0 0 | 0 0 3 | Vibração de overtone $3\nu (a)$ |
| 0,8698 | 0 0 0 | 0 0 5 | Vibração de overtone $5\nu (a)$ |

ANEXO C

Dados técnicos

Complemento da figura 21. Desenho gerado em software *Inventor* mostrando o esquema de montagem do dispositivo de coleta de amostra de solo.

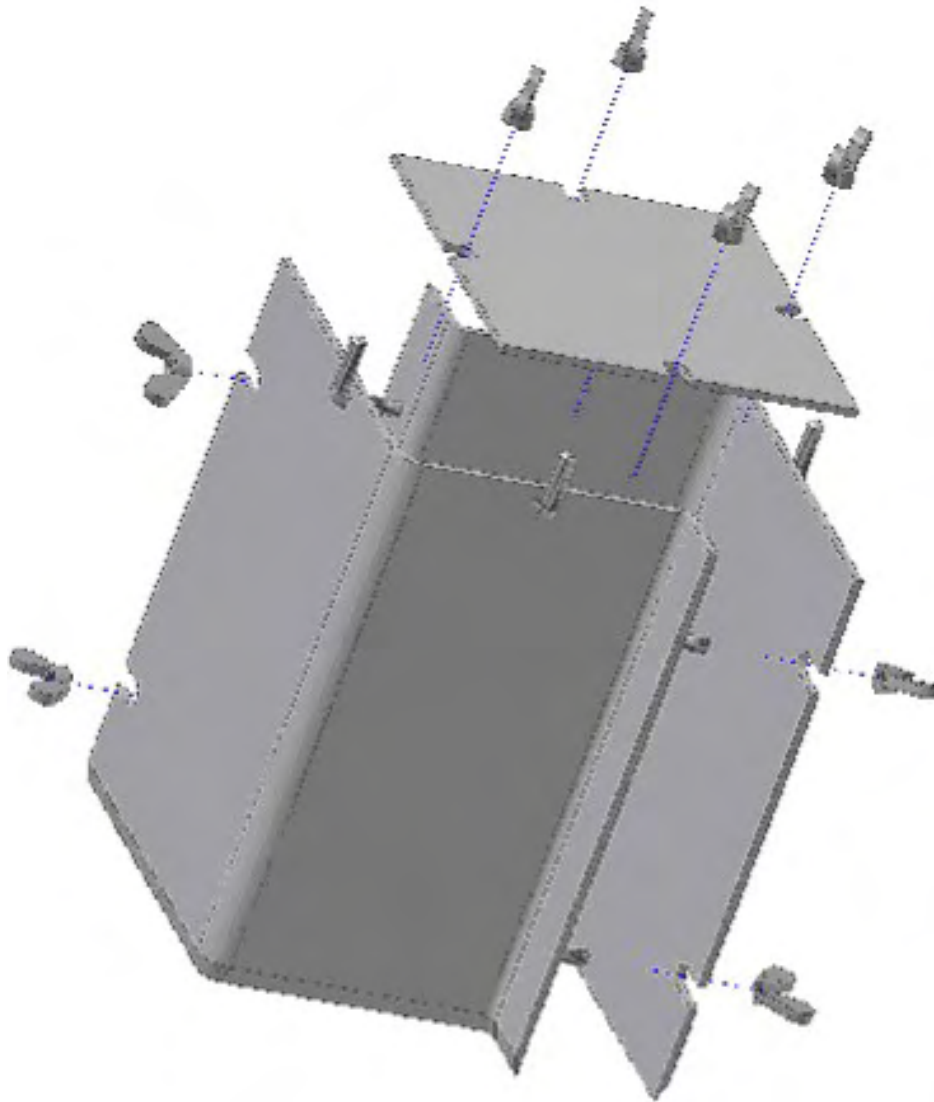
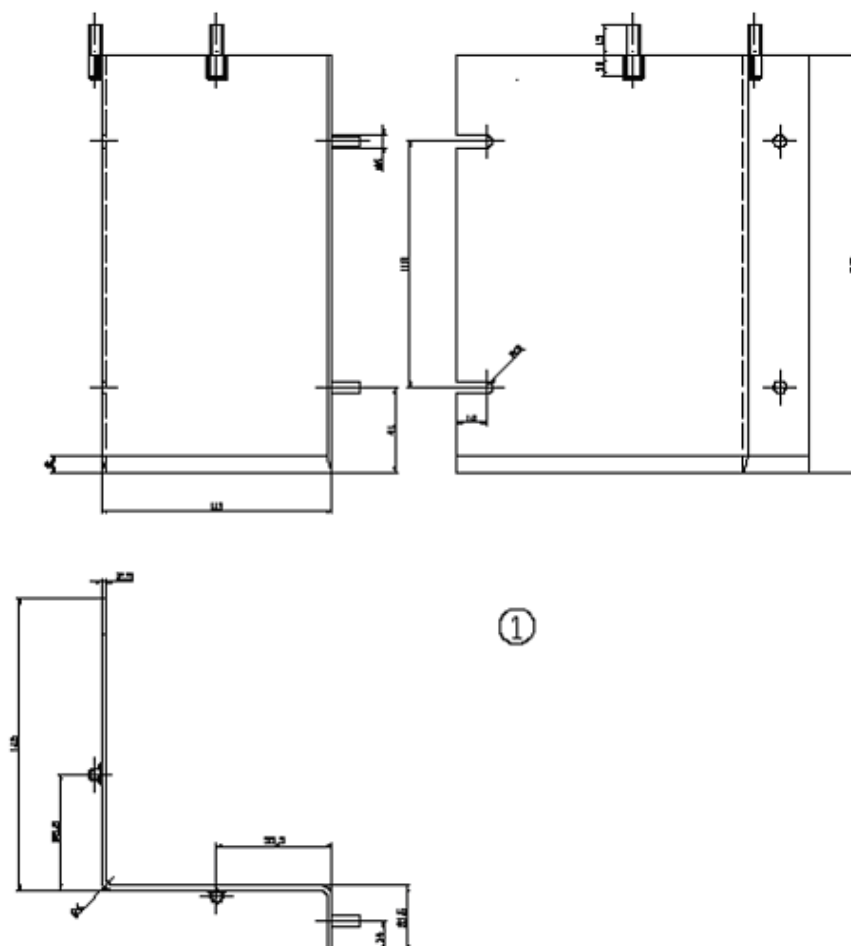


Figura A1 – Esquema de montagem do coletor de amostra de solo

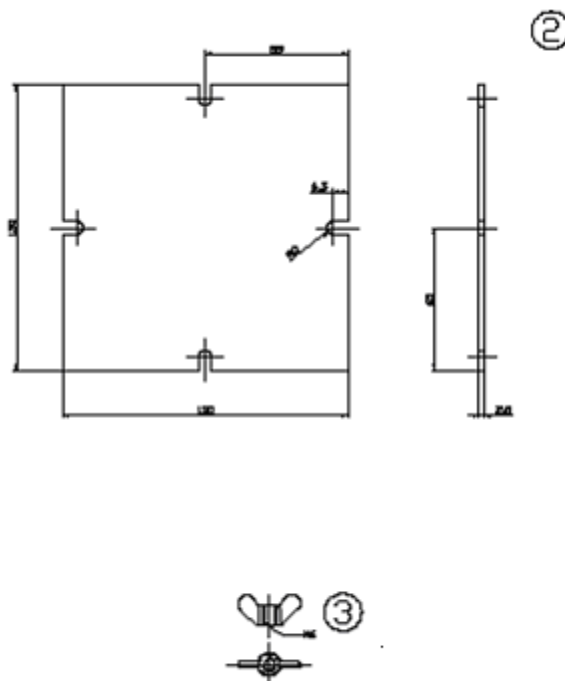
Complemento da figura 21. Desenho gerado em software *AutoCad* mostrando a parte lateral do dispositivo de coleta de amostra de solo.



| 1 | Lateral | 2 | 200x111x169 | | 1020 | | |
|---|--|--------|-------------|-----|------|------------------|------|
| Item | Denominação | Quant. | Dimensões | Mod | Mat. | Peso | Obs. |
| UNESP - Universidade Estadual Paulista | | | | | | | |
| Data 25/07/10 | Projeto: Vanir D.P.Oliveira Leite Desenhista: Carlos Egidio Santoro Vidal | | | | | Desenho nº 01 | |
| Escala 1 : 2,5 | Denominação Dispositivo de Coleta de Amostra de Solo | | | | | | |

Figura A2 – Representação da parte lateral do coletor de amostra de solo

Complemento da figura 21. Desenho gerado em software *AutoCad* mostrando a base e o dispositivo de fixação do dispositivo de coleta de amostra de solo.



| 3 | Borboleta | 8 | M6 | | | | |
|---|--|--------|-----------|-----|------------------|------|------|
| 2 | Tampa | 1 | 130x130 | | 1020 | | |
| Item | Denominação | Quant. | Dimensões | Mod | Mat. | Peso | Obs. |
| UNESP - Universidade Estadual Paulista | | | | | | | |
| Data 25/07/10 | Projeto: Vanir D.P.Oliveira Leite Desenhista: Carlos Egidio Santoro Vidal | | | | Desenho nº 02 | | |
| Escala 1 : 2,5 | Denominação Dispositivo de Coleta de Amostra de Solo | | | | | | |

Figura A3 – Representação da base e do dispositivo de fixação do coletor de amostra de solo