

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS EM AREA CULTIVADA COM
CANA-DE-AÇÚCAR E A RELAÇÃO COM A QUANTIDADE
DE PALHA EM SUPERFÍCIE**

GILKA ROCHA VASCONCELOS DA SILVA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS EM AREA CULTIVADA COM
CANA-DE-AÇÚCAR E A RELAÇÃO COM A QUANTIDADE
DE PALHA EM SUPERFÍCIE**

Dissertação de Mestrado submetida à
banca examinadora para obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Agrícola, na área de concentração
Água e Solo.

GILKA ROCHA VASCONCELOS DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Co-Orientador: Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Si38e Silva, Gilka Rocha Vasconcelos da
Erosão em entressulcos em área cultivada com cana-
de-açúcar e a relação com a quantidade de palha em
superfície / Gilka Rocha Vasconcelos da Silva. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientadores: Zigomar Menezes de Souza, Marcílio
Vieira Martins Filho.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solo - Erosão. 2. Cobertura morta. 3. Canavieira,
Zona. I. Souza, Zigomar Menezes de. II. Martins Filho,
Marcílio Vieira. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV.
Título.

Título em Inglês: Interrill erosion under sugarcane crop and its relation to the
quantity of straw on soil surface

Palavras-chave em Inglês: Soil - Erosion, Mulching, Sugarcane, Zone

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

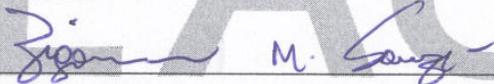
Banca examinadora: Adeodato Ari Cavalcante Salviano, Mara de Andrade
Marinho

Data da defesa: 16/02/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Gilka Rocha Vasconcelos da Silva**, aprovado pela Comissão Julgadora em 16 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Adeodato Ari Cavalcante Salviano – Membro Titular
UFPI



Prof. Dr. Mara de Andrade Marinho - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

*Ao maior tesouro da
minha vida: minha família.*

DEDICO

*A todos aqueles que se
sentem tocados pelas
questões ambientais.*

OFEREÇO

*Isto sabemos.
Todas as coisas estão ligadas
como o sangue
que une uma família...*

*Tudo o que acontece com a Terra,
acontece com os filhos e filhas da Terra.
O homem não tece a teia da vida;
Ele é apenas um fio.
Tudo o que faz à teia,
Ele faz a si mesmo.*

Ted Perry

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por me iluminar diante de todos os passos da minha vida.

À minha família, meu pai Luiz Vasconcelos da Silva, minha mãe Luciene Rocha Vasconcelos da Silva, e meu irmão Luiz Vasconcelos da Silva Filho por estarem sempre presentes na minha vida, me incentivando, me dando forças e transmitindo todo o amor deste mundo. Amo vocês infinitamente.

À Universidade Estadual de Campinas pelas grandes oportunidades de diálogo entre diversas áreas, conhecimentos, pessoas, que contribuem para minha formação, não apenas acadêmica mas à minha experiência de vida e formação como “ser” humano em todas suas esferas.

À Faculdade de Engenharia Agrícola pela oportunidade de desenvolvimento profissional, e toda a infraestrutura proporcionada por ela para a realização deste trabalho.

Ao Professor Zigomar Menezes de Souza por sua orientação, e amizade por todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Marcílio Vieira Martins Filho por se disponibilizar sempre, tão atencioso e dedicado a responder minhas inquietudes e dúvidas que me afligiram durante um bom período no desenvolver deste trabalho.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de mestrado.

À FAPESP por fornecer o financiamento para o projeto de pesquisa, proporcionando os materiais e todas as necessidades solicitadas para realização do mesmo.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Agrícola, em especial a Professora Mara de Andrade Marinho, por contribuir ao desenvolvimento deste trabalho durante suas aulas e discussões.

Aos queridos companheiros do Laboratório de Solos, Gustavo Soares de Souza, Ronny Sobreira Barbosa, Fernando Silva Araújo e Lorena Adriana de Gennaro pela constante ajuda em coletas de campo, em laboratório, em discussões, como também em muitas risadas, e ótimas conversas deixando o dia-a-dia muito mais agradável.

Aos técnicos de laboratório Junior e Célia pela imprescindível ajuda durante todos os processos laboratoriais.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica que muitas vezes estavam presentes em discussões importantes em especial Francisca Franciana Pereira pela incrível amizade, exemplo e carinho de todos os dias.

Ao Gustavo Maruyama Mori por ser o namorado mais paciente, querido e sempre presente em momentos difíceis me fortalecendo com suas palavras sábias.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, agradeço de coração.

O meu,

Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Hipótese.....	3
2 OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivos Específicos.....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1. Contextualização e histórico da cana-de-açúcar no Brasil.....	5
3.1.1. Caracterização da cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i> L.).....	9
3.1.2. Regulamentação da queimada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.....	11
3.1.3. Produção de energia (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo).....	14
3.2. Erosão hídrica do solo.....	15
3.2.1. Erosão em entressulcos.....	19
3.2.2. Erosão entressulcos e suas relações com a cobertura do solo.....	22
3.2.3. Perda de solo, água e nutrientes.....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1. Localização e descrição da área de estudo.....	29
4.2. Determinação da cobertura do solo.....	31
4.3. Determinação da erosão em entressulcos.....	32
4.4. Caracterização física do local de estudo.....	39
4.5. Caracterização química do solo e do material erodido.....	39
4.6. Análise estatística.....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1 Hidráulica do escoamento na erosão em entressulcos.....	41
5.2 Perda de nutrientes.....	49
6. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de locais de produção da cana-de-açúcar no Brasil e o avanço de áreas à serem produzidas (2010).....	9
Figura 2. Gráfico da frequência pluviométrica (mm) do período de 1971 a 2000, da região de Jaboticabal no estado de São Paulo.....	30
Figura 3. Aspectos da paisagem da área de experimento.....	31
Figura 4. A) Parcela no momento de coleta; B) Parcela 0% de cobertura antes da simulação de chuva e C) Parcela de tratamento 100% de cobertura no momento da simulação de chuva.....	32
Figura 5. Desenho demonstrativo da parcela experimental e suas medidas.....	32
Figura 6. Parcela experimental, em destaque no lado direito saída da calha coletora.....	33
Figura 7. Simulador de hastes rotativas.....	34
Figura 8. Hastes do simulador, com destaque para visualização dos bicos aspersores....	34
Figura 9. Parcela do tratamento 0% de cobertura no momento da avaliação da velocidade de escoamento.....	35
Figura 10. Croqui da montagem das parcelas na área de estudo.....	36
Figura 11. Vazão do escoamento laminar, em função da cobertura do solo por palhada de cana-de-açúcar.....	42
Figura 12. Taxa média de infiltração da água no solo, em função da cobertura do solo por palhada de cana-de-açúcar.....	43
Figura 13. Concentração de sedimentos no escoamento laminar, em função da cobertura do solo por palhada de cana-de-açúcar.....	46
Figura 14. Taxa de desagregação do solo, em função da cobertura do solo por palhada de cana-de-açúcar.....	46
Figura 15. Perda de solo total, em função da cobertura do solo por palhada de cana-de-açúcar.....	48
Figura 16. Perda de água total, em função da cobertura do solo por palhada de cana-de-açúcar.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos e granulométricos do solo na profundidade de 0,00 a 0,20m.....	29
Tabela 2. Porosidade do solo, diâmetro médio ponderado (DMP) e densidade do solo na profundidade de 0,00 a 0,20 m.....	29
Tabela 3. Parâmetros de erosão e da hidráulica do escoamento em entressulcos para a ausência e diferentes quantidades de palha na superfície do solo.....	41
Tabela 4. Perdas totais de solo e de água por erosão em entressulcos para a ausência e diferentes quantidades de palha em superfície do solo para o evento de chuva estudado.....	47
Tabela 5. Concentração de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no sedimento.....	50
Tabela 6. Taxa de enriquecimento do sedimento (ER) por matéria orgânica (MO) e nutrientes.....	51
Tabela 7. Perda de matéria orgânica e nutrientes, equivalente em adubo, presentes no material erodido da área de estudo.....	53

RESUMO

Dentre as formas de erosão hídrica do solo, a erosão em entressulcos é uma das que causa maiores danos ao processo produtivo dos solos utilizados na agricultura, por provocar perda de solo, água e nutrientes. A erosão em entressulcos acontece pela desagregação do solo, pelo impacto das gotas de chuva, sendo as partículas desalojadas transportadas por um delgado fluxo laminar superficial. Porém, com a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo são alteradas as características de escoamento superficial, desagregação e transporte de solo resultantes do processo erosivo. O objetivo deste trabalho consistiu em determinar a quantidade mínima de palha que deve ser mantida na superfície do solo em área cultivada com cana-de-açúcar que promova a conservação do solo, pela redução da erosão entressulcos. O experimento foi conduzido em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, em parcelas com declividade de $0,07 \text{ m m}^{-1}$, sob chuva simulada, com aplicação em superfície de quantidades variadas de palha de cana-de-açúcar, baseando-se na taxa de produção de palha local de $1,4 \text{ kg m}^{-2}$. Os tratamentos avaliados representam quantidades de palha depositadas na superfície, em número de 5: 1) 0% de palha; 2) 25% de palha; 3) 50% de palha; 4) 75% de palha e 5) 100% de palha. As parcelas experimentais foram submetidas a chuvas simuladas com intensidade média de 65 mm h^{-1} (I), durante 60 minutos. O experimento foi conduzido num delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os resultados mostram comportamento semelhante para as parcelas com 50% de palha, 75% e 100% para perdas de material erodido, água e nutrientes. Portanto, conclui-se que: 1) A perda de solo, água e nutrientes reduziu com o aumento da quantidade de palha na superfície do solo, 2) A taxa de desagregação do solo diminuiu e o coeficiente de rugosidade e taxa de infiltração aumentaram com o incremento de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo; 3) Para minimizar a perda de solo, água, nutrientes e matéria orgânica devem ser mantidos no mínimo 50% de cobertura do solo com palha de cana-de-açúcar, tendo em vista que essa condição, viabiliza a otimização desse recurso tanto para conservação do solo como para produção de energia limpa em indústrias sucroalcooleiras.

Palavras chave: erosão hídrica, palha de cana-de-açúcar, perda de solo, área canavieira.

ABSTRACT

Among the forms of soil erosion, interrill erosion is one that causes further damage to the productivity of soils used in agriculture, causing soil loss, water and nutrients. The interrill erosion occurs by the disintegration of the soil, the impact of raindrops, and the dislodged particles transported by a thin laminar flow surface. However, with the crop residue on the soil surface characteristics are altered runoff, breakdown and transport of soil resulting from erosion. The aim of this study was to determine the minimum amount of straw that must be maintained on the soil surface in the area cultivated with sugar cane that promotes soil conservation by reducing interrill erosion. The experiment was conducted on an Oxisol in plots with slope of 0.07 m m^{-1} , under simulated rain with surface application of varying amounts of cane sugar straw, based on production rate straw place of 1.4 kg m^{-2} . The treatments represent quantities of straw deposited on the surface, in number of 5: 1) 0% straw, 2) 25% straw, 3) 50% straw, 4) 75% straw and 5) 100% straw. The experimental plots were subjected to simulated rainfall with an average intensity of 65 mm h^{-1} (I) for 60 minutes. The experiment was conducted in a completely randomized design with four replications. The results show similar behavior to the plots with 50% straw, 75% and 100% for losses of eroded material, water and nutrients. Therefore, we conclude that: 1) The loss of soil, water and nutrients decreased with increasing amount of straw on the soil surface, 2) The rate of soil detachment and decreased roughness coefficient and infiltration rate increased with increase straw cane sugar on the soil surface, 3) To minimize the loss of soil, water, nutrients and organic matter should be kept at least 50% of soil covered with straw cane sugar, with In order that this condition, enables the optimization of this resource for both soil conservation and for production of clean energy in sugar and alcohol industries.

Keywords: erosion, sugarcane straw, soil loss, sugarcane area.

1. INTRODUÇÃO

A degradação do solo nos trópicos, embora reconhecida como sendo um problema grave e generalizado, ainda carece de estudos que avaliem aspectos físicos, químicos e ambientais, de forma integrada. A erosão é uma das formas mais prejudiciais de degradação do solo, uma vez que reduz a camada superficial, retirando nutrientes e matéria orgânica, ou mesmo grandes quantidades de massa de solo, podendo causar estragos irreparáveis, além de causar sérios danos ambientais, tais como: assoreamento, poluição e eutrofização dos corpos d'água.

No Brasil, a principal forma de erosão é a hídrica, que é provocada pela ação da chuva ou da enxurrada, acarretando a desagregação e o transporte do solo pelo escoamento superficial. Além das partículas de solo em suspensão, o escoamento superficial transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas, promovendo o empobrecimento gradativo dos solos agrícolas, a elevação do custo de produção e, às vezes, resultando no abandono de áreas anteriormente produtivas.

Dentre as culturas plantadas no Brasil, a cana-de-açúcar é a que tem ocupado grande destaque, principalmente no estado de São Paulo, o que se deve a importância dessa matéria prima destinada a fabricação de açúcar e álcool. As usinas de cana-de-açúcar têm como prática de colheita a queima dos canaviais que é geralmente adotada nas diversas regiões canavieiras do Brasil com o objetivo de facilitar as operações de corte e carregamento. Entretanto, tal prática está associada a impactos ambientais negativos, tais como elevadas emissões de gases para a atmosfera devido à queima que normalmente antecede a colheita, a degradação dos solos principalmente pelo processo de erosão e a poluição de mananciais e centros urbanos.

Portanto, a recente tendência de adoção de práticas agrícolas que levem a uma maior sustentabilidade do sistema, pressiona a agroindústria sucro-alcooleira a rever seus processos, incluindo a colheita da cana sem queima prévia ou sem despalha a fogo (colheita de cana crua). No caso do estado de São Paulo, o cultivo da cana-de-açúcar já atinge todas as regiões e a adoção da colheita mecanizada é inevitável. O decreto de Lei Estadual 47.700, de 11 de março de 2003, que regulamenta a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002, determinou prazos para a eliminação gradativa do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas. Esse decreto, de grande interesse agrícola e ecológico, estabelece prazos, procedimentos, regras e proibições que visam à regulamentar as queimas em práticas agrícolas. Portanto, a colheita de cana sem queima é uma

realidade cada vez mais presente no sistema de produção da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, que deve ser intensificada nos próximos anos.

Com a adoção da colheita mecanizada no sistema de manejo da cana-de-açúcar, a palha é deixada à superfície do solo como folhas inteiras, caso a colheita seja realizada manualmente; ou triturado, se a colheita for realizada mecanicamente. A manutenção da camada de material vegetal no sistema pode trazer grandes vantagens para o solo, minimizar o problema da poluição atmosférica e, provavelmente reduzir o uso de fertilizantes minerais, como também as perdas de solo, água e nutrientes. Portanto, é fundamental estabelecer o quanto de palha pode ser retirado das áreas cultivadas com cana-de-açúcar para ser utilizada na geração de energia e que não desencadeie ou acelere o processo de erosão nas áreas agrícolas.

A cobertura do solo por resíduos vegetais, incluindo a palha de cana-de-açúcar, reduz a erosão hídrica porque dissipa a energia cinética das gotas de chuva sobre a superfície, diminui a velocidade do escoamento e aumenta a espessura da lâmina de água na superfície do solo. Assim, a cobertura reduz a capacidade do escoamento de desagregar e transportar solo e forma uma rede, semelhante a um filtro, a qual provoca a deposição das partículas, especialmente as de maior diâmetro, transportadas pela enxurrada. Assim, a eliminação da cobertura do solo, pela queima, por exemplo, deixa o solo exposto à energia da chuva e do escoamento e, portanto, mais susceptível à erosão hídrica.

Cada hectare de cana-de-açúcar produz de 9 a 14% de palha, que representa uma média aproximada de 10 t ha⁻¹. No estado de São Paulo, em 2008 a área cultivada com a cultura de cana-de-açúcar foi de 6,0 milhões de hectares, resultando em uma produção de 60 milhões de toneladas de palha, das quais, parte é queimada e parte permanece sobre o solo. Esta palha que permanece na superfície do solo é fundamental para evitar o processo de erosão do solo. Por conseguinte, com o aprimoramento e intensificação da mecanização da colheita da cana, o papel da palha no processo de desenvolvimento de atividades da indústria sucroalcooleira apresenta singular importância. Seja como matriz energética, ou como agente conservador do solo, a palha se apresenta como um valioso recurso para essa indústria e pode resultar em significativa redução de custos se usada de maneira racional.

1.1 Hipótese

A manutenção de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo controla a erosão em entressulcos, resultando na diminuição das perdas de solo, de água e de nutrientes em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob Latossolo Vermelho.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar a quantidade mínima de palha que deve ser mantida na superfície do solo em área cultivada com cana-de-açúcar que viabilize menores perdas de solo, água e nutrientes, pela redução da erosão em entressulcos.

2.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar o efeito de diferentes quantidades de palha na superfície do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar relacionado a parâmetros da erosão, como a desagregação, o escoamento laminar na erosão em entressulcos e sua influência nas perdas de solo, água e nutrientes.

2. Determinar a taxa de desagregação do solo juntamente com atributos físicos do solo e atributos químicos da água;

3. Quantificar as perdas de nutrientes por erosão em entressulcos em área cultivada com cana-de-açúcar em função da quantidade de nutrientes carregados pelo material erodido do escoamento laminar.

4. Ajustar modelos de regressão que correlacionem as perdas de solo, água e nutrientes com os resíduos vegetais presentes na superfície do solo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Contextualização e histórico da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar tornou-se importante para o país desde o período colonial (CORRÊA, 1926). Nesse mesmo período, os arrendatários que se instalaram no Brasil trouxeram, entre alguns produtos sementes agrícolas, originárias da Ilha da Madeira. Devido a pouca mão de obra, os cultivos agrícolas, permaneceram estagnados, além de que os moradores daquela época estavam mais preocupados com o extrativismo de madeira e a descoberta de minas de ouro e prata (CORRÊA, 1926).

A colonização real se deu após três décadas, posteriormente que Portugal constatou que as novas terras estavam ameaçadas por invasões cada vez mais frequentes de aventureiros e contrabandistas. Nessa época também, o aumento da demanda de açúcar no mercado europeu, facilitou a D. João III criar um projeto que estimulasse a povoação da costa brasileira dado ao movimento migratório. Em decorrência disso, adotou-se um modelo que obteve sucesso na ilha da Madeira, o das Capitania Hereditárias, que consistia na doação de grandes extensões de terras, com direito ao uso extensivo dos recursos naturais existentes e sob o comando de pessoas de sua confiança. Em 1532, Martim Afonso de Sousa, foi o primeiro, oficialmente, a trazer mudas de cana-de-açúcar de origem da Ilha da Madeira, as precursoras do cultivo comercial na Capitania de São Vicente, São Paulo, local em que a indústria açucareira teve prosperidade nos primeiros anos de exploração, atingindo mais tarde o planalto, na região de Itu, em 1615 de acordo com De Carli citado por Miranda (2008).

Em seguida, coube a Capitania de Pernambuco pertencente a Duarte Coelho, que chegou ao Brasil em 1535, lá se instalando e construindo vários engenhos. Com posse de suas terras Duarte Coelho plantou grandes quantidades de cana-de-açúcar, com mudas originárias da Ilha da Madeira. Dada a fertilidade dessas terras, as lavouras obtiveram grandes resultados de produção, tornando-se em pouco tempo a maior plantação de cana-de-açúcar no Brasil (COSTA, 1958).

Pode se afirmar que assim começou a agroindústria de cana-de-açúcar no Brasil. Evidente que no início ocorreram muitas dificuldades e tentativas sem sucesso em várias regiões, devido aos problemas de diversas ordens; como clima, conflitos de terras, entre outros. Porém, a cana-de-açúcar expandiu-se rapidamente pelo Nordeste do país (Bahia, Pernambuco, Alagoas, Paraíba), de tal forma que, dezessete anos passados, já estavam instalados 23 engenhos só em Pernambuco. O Brasil, na década de 1580, já se encontrava em evidência, pois já havia conquistado o monopólio mundial de produção de açúcar proporcionando a Portugal elevado potencial lucrativo com esse mercado. As regiões produtoras foram beneficiadas com progresso e prosperidade advindos dos resultados obtidos

nessas regiões. Alguns lugares como Salvador e Olinda cresceram rapidamente, dada a importância do cultivo. As produções de açúcar, do melado, da rapadura, da cachaça, e de outros produtos oriundos da cana-de-açúcar contribuíram para o desenvolvimento econômico do país, trazendo crescimento altamente significativo. As Capitanias onde se cultivavam cana tiveram um desenvolvimento mais rápido que as demais (CAIRO, 1924; CALMON, 1935).

Dado ao fato do açúcar ser um produto diretamente ligado a exportação, a construção dos engenhos juntamente aos estuários dos rios foram construídos próximos a costa marítima, o que facilitou o transporte do açúcar para os portos onde seriam embarcados para a Europa. Dessa forma, esse acontecimento evidencia que as mais antigas povoações brasileiras iniciaram próximas aos engenhos e posteriormente algumas se tornaram grandes cidades do litoral brasileiro (ANDRADE, 1974).

Até 1630 foi o período de grande evidência do açúcar brasileiro, em função do alto valor do açúcar de cana. Porém, com a morte de D. Sebastião, na batalha de Alcácer Quibir, em 1578, seguida da anexação de Portugal a Espanha por Filipe II, provocaram as dificuldades de comercialização no Brasil. Estabelecendo problemas de questão religiosa, pelo fato do rei Filipe II ser católico e os holandeses e ingleses protestantes. Sendo assim, naquela época, Lisboa, era apenas um entreposto entre a colônia brasileira e os centros de comercialização de Amsterdã e Londres. Os comerciantes holandeses foram privados do fornecimento de açúcar, devido à posição inflexível do rei da Espanha não podendo comercializar diretamente com os colonos brasileiros; não tendo outra opção e não querendo perder os lucros da comercialização, decidiram apossar-se da área produtora, fato que aconteceu em Pernambuco de 1630 até 1654 (ANDRADE, 1965).

Os holandeses resolveram se aventurar e, após saírem da costa brasileira, foram para o Caribe e as Antilhas, local em que deram início ao cultivo da cana-de-açúcar e a fabricação do açúcar, iniciativa que contribuiu posteriormente, para finalizar o monopólio do açúcar brasileiro no mercado europeu estabelecido naquela época. Esse fato, juntamente com a descoberta de ouro em Minas Gerais, no fim do século XVII, atraiu muitos trabalhadores que serviam a cultura da cana, fato este que ajudou a desbancar o açúcar do primeiro lugar na geração de riqueza para a Coroa portuguesa, promovendo a diminuição da produção até o fim do século XIX (DE CARLI, 1938).

Nesse período, Napoleão dominava a Europa e também havia promovido o bloqueio continental ao comércio com a Inglaterra; em retaliação aos ingleses, decidiram que todos os navios que comercializassem com a França e seus aliados seriam apreendidos. Dessa forma, o império de

Napoleão foi privado de todas as suas fontes de abastecimento dos países neutros e de suas colônias. Com essa situação definida na Europa Dom João VI resolveu transferir-se com a família real para o Rio de Janeiro (ANDRADE, 1974). A partir da sua chegada, começou a fase áurea de desenvolvimento do Brasil, promovendo a abertura dos portos. Motivo este responsável pelo aumento das exportações e dos preços dos produtos agrícolas da colônia no mercado exterior. As negociações passaram a ser feitas diretamente com os interessados, sem a interferência de Lisboa. Nesse período, também novas tecnologias foram introduzidas, entre as quais o uso do bagaço nas fornalhas, o cultivo de nova variedade de cana-de-açúcar, advindas da Guiana Francesa (SALGADO, 1887; CORRÊA, 1926).

Em 1806, o fato marcante gerado pelo bloqueio continental da Europa, foi impedir ao grupo de Napoleão e seus aliados de receber açúcar e outros produtos de suas colônias, levando desta forma à promoção do grande concorrente do açúcar de cana, ou seja, a fabricação de açúcar de beterraba. A matéria-prima da beterraba cultivada na Europa, passou a fazer frente a da cana produzida no alémmar; esta produção do açúcar, inicialmente na França, e posteriormente em todos os países de clima temperado tornando-se um sério problema de concorrência a indústria açucareira proveniente da cana (DE CARLI, 1938; 1943; MAGALHÃES, 1953).

A história da cana-de-açúcar no Brasil apresenta momentos de altos e baixos que se repetiram de forma intensa, a partir de meados do século XIX, por vários fatores, entre as quais estavam: a) intensificação da produção do açúcar de beterraba nos países europeus; b) o aparecimento de gomose nos canaviais brasileiros; c) o florescimento da cultura do café (DANTAS, 1960; ANDRADE, 1974; MELONI, 2004).

Essa flutuação verifica-se também na atualidade, quando remetemos a década de 80 no momento em que a cana teve sua maior expansão, com o advento do Proálcool. O pólo de produção principal incidia na Zona da Mata nordestina, tendo depois se expandido pela região Sudeste, notadamente no estado de São Paulo. Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia e China (UNICA, 2009). Segundo dados estatísticos do IBGE (2010) mais recentes, o país produziu no ano de 2009 cerca de 690 milhões de toneladas da planta.

O país cultiva mais de oito milhões de hectares de cana-de-açúcar em todo o seu território, mas é no Estado de São Paulo que se concentra a maioria das lavouras, o que representa aproximadamente metade da produção nacional, demonstrada pela porcentagem de 66,3% da área total em hectares cultivada no Brasil (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2007).

A cana-de-açúcar tem um papel bastante significativo no que se refere ao agronegócio, pois desde a sua participação no setor; vinculada a produção de energia tem conquistado cada vez mais números dentro do mercado. O agronegócio no Brasil tem crescido a cada ano, tendo sido responsável, segundo dados oficiais do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por aproximadamente 33% do PIB nacional, 42% das exportações totais e 37% dos empregos em 2007.

O agronegócio sucro-alcooleiro fatura, direta e indiretamente, cerca de R\$ 40 bilhões por ano, o que corresponde a aproximadamente 2,35% do PIB nacional, ajudando o país a aumentar as exportações e reduzir sua dependência da importação de petróleo. É, também, um dos setores que mais empregam no país, com mais de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos e, reúne mais de 72.000 agricultores. Na safra 2005/2006, a moagem foi de 431,4 milhões de toneladas de cana, que resultou na produção de 26,7 milhões de toneladas de açúcar e 17 bilhões de litros de álcool. Em 2006, o parque sucro-alcooleiro nacional possuía 320 indústrias em atividade, sendo 227 na região Centro-Sul e 94 na região Norte-Nordeste, que impulsionavam a atividade econômica de mais de 1.000 municípios brasileiros. Havia, ainda, no país, perto de 30 projetos em fase de implantação (DIEESE, 2007).

Embora as estatísticas atuais indiquem que o Brasil alcançou uma posição internacional de destaque nos agronegócios de cana-de-açúcar, a atividade concentra-se mais no estado de São Paulo, onde grande parte do açúcar e álcool é produzida. A predominância do estado de São Paulo e de algumas regiões do estado de Alagoas sobre outras regiões produtoras do país deve-se, principalmente, aos seguintes fatores: solo com boa fertilidade e topografia estrutura mais organizada dos empreendedores e o uso mais intensivo das tecnologias disponíveis, tanto na agricultura quanto na indústria (MAPA, 2007).

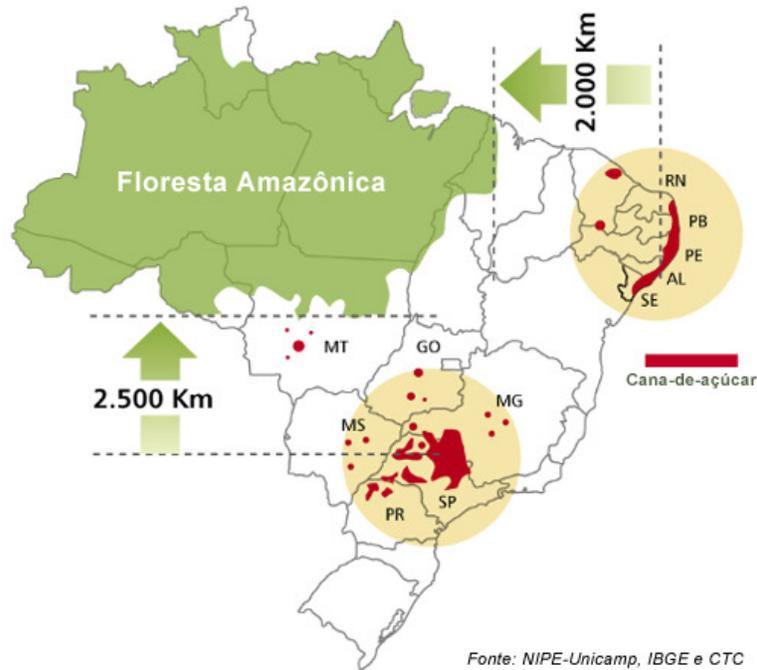


Figura 1. Mapa de locais de produção da cana-de-açúcar no Brasil e o avanço de áreas à serem produzidas (2010). (Fonte: NIPE-Unicamp, IBGE e CTC)

O estado de São Paulo responde por mais de 66% da produção de cana-de-açúcar do Brasil. Além de ser o maior estado produtor, São Paulo conta atualmente com o parque sucro-alcooleiro mais tecnificado (MAPA, 2007).

3.1.1 Característica da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) uma gramínea que originou-se na Ásia, provavelmente na Nova Guiné e, que foi introduzida no Brasil em 1533. É produzida, principalmente, entre as latitudes 35° Norte e 35° Sul da linha do Equador (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

O clima ideal para a produção de cana-de-açúcar é aquele que apresenta duas estações claramente distintas: uma quente e outra úmida para proporcionar a germinação e perfilhamento e desenvolvimento vegetativo; seguida de outra fria e seca para promover a maturação e consequente acúmulo de sacarose. Por se tratar de uma cultura de clima tropical, exige de 1500 a 2500 mm de água durante o período de crescimento. O crescimento ótimo é alcançado com uma média diária de temperatura entre 22 e 30°C, porém, para um efetivo crescimento a temperatura mínima é de 20°C (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Entretanto, existem algumas limitações ao seu desenvolvimento,

como a deficiência hídrica e nutricional assim como temperaturas extremas e baixa radiação solar, entre outras (BRAY, 1980).

Segundo Van Dillewijn (1952), a fase de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar depende de fatores internos e externos, sendo estes últimos especialmente elementos climáticos como precipitação, umidade do ar e temperatura. As necessidades climáticas da cana-de-açúcar variam em função do destino da produção, se caso seja para produção de açúcar, aguardente, álcool ou para forragem, entretanto, a cana oriunda de lavouras para a produção de açúcar é a mais exigente. Já em relação as características adquiridas pela cana cultivada atualmente no Brasil é advinda de algumas variedades obtida por meio de melhoramentos genéticos, que conferiu à planta maior produtividade e resistência a doenças (FIGUEIREDO et al., 1995).

A cana-de-açúcar possui diferentes denominações, quanto a questões de época de plantio e sua consequente colheita. Ela é denominada cana planta até sua primeira colheita, tendo um período de crescimento em torno de 12 ou 18 meses, dependendo da época de plantio, se no outono/inverno ou primavera/verão, respectivamente. Se o período em que for plantada é compreendido entre setembro a outubro, geralmente é colhida com cerca de 12 meses e será denominada cana de ano. Se for plantada de janeiro a março ela se desenvolve por volta de 18 meses e, portanto, é denominada de cana de ano e meio. Após a primeira colheita a cana sofre uma rebrota que é chamada de soca. As demais colheitas ocorrem anualmente por volta do mesmo período (mês), sendo denominadas de ressocas. As rebrotas da cana sofrem cerca de 4 a 5 cortes quando então a lavoura é renovada com uma cana de ano ou de ano e meio (RUDORFF, 1985).

Segundo Bray (1980), quando considera-se o ciclo vegetativo da planta, existem fases em que são apresentadas alterações em função da ação do ambiente. As principais fases de desenvolvimento são: germinação, perfilhamento, crescimento e maturação. Para cada uma destas fases a cana apresenta diferentes exigências climáticas, sendo que algumas, delas, são mais exigentes do que outras. Por exemplo, após a fase de crescimento, para resultar em uma boa produção de sacarose nos colmos, é necessário a cana passar por um período com baixa temperatura ou de deficiência hídrica, pois dessa forma cessa o crescimento vegetativo e começa a fase de maturação (BRAY, 1980).

Com relação ao teor de sacarose no decorrer do seu ciclo de crescimento e desenvolvimento a cana-de-açúcar atravessa dois períodos distintos: o primeiro é marcado por um crescimento vegetativo intenso, acompanhado por uma formação gradativa de sacarose, enquanto que, no segundo, ocorre um

acúmulo predominante de sacarose, estimulado pela escassez dos fatores principais de desenvolvimento vegetativo, como temperatura e água disponível (MAGALHÃES, 1987 e LUCHESI, 1995).

Para que a unidade industrial responsável pela produção do açúcar e do álcool, seja plenamente suprida de matéria prima, é muito importante que antes do início da safra haja uma estimativa exata do volume de cana disponível para moagem. Esta informação, para a usina, é utilizada para planejamento das atividades de corte e transporte da cana-de-açúcar, além de ser fundamental para as atividades industriais, econômicas e administrativas (RUDORFF, 1985).

3.1.2 Regulamentação da queimada de cana-de-açúcar no estado de São Paulo

No estudo da cultura canavieira, a condição ecológica é um fator importante dado ao fato dela envolver limites e possibilidades do domínio dessa atividade agrária, no espaço geográfico.

A prática da queima de cana de açúcar que possui como principal objetivo facilitar e baratear o corte manual tornou-se habitual na grande maioria dos estabelecimentos agrícolas dedicados ao seu cultivo. Periodicamente, essa queima provoca a destruição e degradação de ecossistemas inteiros, causando problemas tanto no interior quanto próximas às lavouras canavieiras, além de dar origem a uma intensa poluição atmosférica, prejudicial à saúde, comprovadas por Lopes e Ribeiro (2006) e Ribeiro (2008) e, que afeta não apenas as áreas rurais adjacentes, mas também os centros urbanos mais próximos (RAMOS, 1999).

A problemática da queimada da cana-de-açúcar provoca implicações ecológicas, econômicas e sanitárias. Além da ação biocida em relação à fauna, a flora e aos microorganismos; aumenta rapidamente a temperatura e reduz a umidade natural dos solos; provoca mudanças no microclima das zonas canavieiras, afetando o ciclo hidrológico e a incidência de radiação solar; causa o aumento de erosão por gotas de chuva, devido ao solo estar descoberto; além de uma polimerização de suas substâncias húmicas, como também perdas de nutrientes, seja para a atmosfera por via da combustão, ou seja, para as águas por meio da lavagem e lixiviação (SZMRECSÁNYI, 1994 e ZANCUL, 1998).

Segundo, Ribeiro e Assunção (2002) alertam para os graves riscos e problemas que a queima do canavial tem representado à saúde humana. Devido a compostos orgânicos gerados pela combustão da palha, como exemplo, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), compostos altamente cancerígenos, assim como óxidos nítricos (NO), dióxido de nitrogênio (NO₃) e o monóxido de carbono (CO) que são encontrados entre os gases que compõe a fumaça da queima do canavial são os principais causadores de diversos problemas respiratórios.

Os problemas gerados pelas queimadas quando colocadas em discussão tem se tornado uma questão polêmica, há questões políticas, ambientais e sociais envolvidas nesse tema (GONÇALVES, 2001). A lei de Política Nacional do Meio Ambiente número 6.938, de 1981, proíbe a queimada de cana-de-açúcar ao ar livre, devido ao fato de considerar esta prática maléfica, pois produz impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública.

No Estado de São Paulo, o Decreto Estadual número 28.848, de 1988, proibia a queima da cana-de-açúcar como método de despalha para a distância adotada de um raio de 1,0 km da área urbanizada, permitindo-a no restante da área. Todavia, foi a partir da emissão de decreto do Governo do Estado de São Paulo de número 42.056 divulgado no dia 6 de agosto de 1997, que estabeleceu o Plano de Eliminação de Queimadas, regulamentando a prática da queima dos canaviais, prevendo sua eliminação de uma forma gradativa ao fim de oito anos nas áreas mecanizáveis e quinze nas não mecanizáveis, incluindo nesta última categoria, as pequenas propriedades, com área inferior a 125 ha. Tal decreto tem causado profundas controvérsias no setor da agroindústria açucareira.

Após grande insatisfação do setor, pois muitas usinas não conseguiam cumprir as exigências, fez-se representar na Assembléia Legislativa do Estado de São Paulo, por meio do Deputado Antônio Jardim, que elaborou uma nova legislação, a qual foi proposta e vetada pelo governador, mas aprovada na Assembléia posteriormente a derrubada do veto à lei número 10.547, de 02 de maio de 2000. Desta forma foi derrubado o decreto que estava em vigor (SÃO PAULO, 2000). Esta nova lei teve um caráter mais abrangente, tratando do uso do fogo em relação às práticas agrícolas, pastoris e florestais e, inseriu profundas modificações na definição de locais onde o fogo seria proibido vindo de encontro aos anseios dos produtores e empresários, representando um enorme retrocesso no que se havia conquistado em termos ambientais (GONÇALVES, 2001).

Essa lei provocou grandes modificações no contexto do Plano de Eliminação de Queimadas, proporcionando a liberação do uso do fogo em áreas não mecanizáveis, como também a redução do tamanho das áreas onde o fogo era proibido e, por fim aumento no prazo de eliminação de queimas para áreas mecanizáveis, onde o prazo final foi estendido até o ano de 2020 (SÃO PAULO, 2000)

Dentre algumas das discussões, para o estado de São Paulo foi criado o decreto de Lei Estadual 47.7000, de 11 de março de 2003 que regulamenta a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002, determinou prazos para a eliminação gradativa do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas. Esse decreto, de grande interesse agrícola e ecológico, estabelece

prazos, procedimentos, regras e proibições que visam a regulamentar as queimadas em práticas agrícolas.

Entretanto, muitas unidades sucro-alcooleiras estão ampliando, a cada safra, suas áreas colhidas sem a prática da queima, um exemplo desta mudança foi marcado no mês de outubro de 2007 o grupo COSAN (18 usinas/destilarias com, aproximadamente, 400.000 ha de cana-de-açúcar), assinou um protocolo de intenções com a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, no qual, estabelece dentre outras novas atitudes em relação à proteção ao meio ambiente, se comprometeu a eliminar totalmente a prática da queima de pré-colheita em seus canaviais, até 2014, em áreas mecanizáveis (até 12%) e até 2017, em área total (MIRANDA et al., 2008). Devido a tal iniciativa outras empresas do setor também decidiram reduzir seus prazos de eliminação da queima, bem como a ORPLANA-Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro-sul do Brasil (treze mil fornecedores de cana do Estado de São Paulo), no início de março de 2008, também aderiram ao “Protocolo Agroambiental” do governo do Estado de São Paulo comprometendo-se a eliminar as queimadas até o ano de 2014.

Quanto à questão da colheita mecanizada, segundo Furlani Neto (1995) o sistema de colheita de cana crua é plenamente viável, pois embora resulte numa diminuição no rendimento de corte, apresenta como vantagem a melhoria da qualidade tecnológica da matéria prima para a indústria, à diminuição nas impurezas minerais, a conservação do resíduo pós-colheita sobre o solo, evitando, assim uma considerável perda energética pela queima dos canaviais.

Portanto, com a eliminação da queimada, quantidades consideráveis de resíduos de colheita estarão disponíveis para geração de energia. Dessa forma, a eliminação da queima de pré-colheita proporcionará diversos efeitos benéficos significativos, como a redução da poluição ambiental, causada pelas práticas de queimas, bem como a redução de perdas de solo com a manutenção da cobertura na superfície do solo desse material, manutenção da temperatura do solo, favorece também a vida dos microorganismos no solo (MIRANDA et al., 2008).

É viável tecnicamente e economicamente a geração de eletricidade, a partir de resíduos de colheita de cana crua, confirmado a partir do trabalho desenvolvido por Ripoli e Molina Júnior (1991) citado por Miranda et al. (2008), que estimaram que, de 1,0 hectare de canavial, pode se obter em torno de 67.080 Mcal, em equivalentes energéticos. Segundo a ANNEL (2002) citada por Miranda et al.(2008), entre diversas razões que justificam a busca de fontes mais compensativas de geração de energia elétrica, também esta a necessidade de redução de dióxido de carbono. Sob esse ponto

explicitado a biomassa apresenta-se técnica e economicamente competitiva e, sua utilização pode promover a geração local e descentralizada de empregos, reduzindo o problema do êxodo rural e a dependência externa de energia, ao possuir disponibilidade local.

Segundo Miranda et al. (2008) o Brasil possui um potencial enorme de produção de biomassa devido à maior parte da extensão do seu território estar localizada entre as regiões tropicais e chuvosas, apresentando condições adequadas para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Essas condições estão presentes especialmente no Estado de São Paulo, onde a cultura canavieira é significativa, sendo comparável à produção de energia hidráulica.

Apesar do Estado de São Paulo ser um grande exportador de álcool para os demais estados, também é importador de energia elétrica, na ordem de 40% de seu consumo. Entre outros mecanismos de incentivo ao aproveitamento da biomassa para a geração de energia elétrica é destacada a criação do Programa Nacional de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que possui como finalidade agregar ao sistema elétrico brasileiro 3.300MW de potência instalada a partir de fontes alternativas renováveis, cujos prazos e regras estão sendo definidos e regulamentados por diversos órgãos governamentais, tais como a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica-GCE, o ministério de Minas e Energia- MME, além da participação da Eletrobrás e da ANEEL.

3.1.3 Produção de energia (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo)

O protocolo de Quioto, entre vários outros elementos, traz a possibilidade de utilização de mecanismos de mercado para que países desenvolvidos possam cumprir os compromissos quantificados de redução e limitação de emissão dos gases de efeito estufa. No caso do Brasil, a participação no mencionado mercado ocorre por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) por ser o único mecanismo do Protocolo de Quioto que admite a participação voluntária de países em desenvolvimento. O MDL permite a certificação de projetos de redução de emissões nos países em desenvolvimento e a posterior venda das reduções certificadas de emissões – RCEs (Redução Certificada de Emissões), para serem utilizadas pelos países desenvolvidos como modo suplementar para cumprirem suas metas. Esse mecanismo deve implicar em reduções de emissões adicionais aquela que ocorreriam na ausência do projeto, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo para a mitigação da mudança do clima (CQNUMC, 2010).

Existem grandes possibilidades de aumentar a produção de energia por meio da utilização da palha de cana de açúcar como combustível limpo. No Brasil, a biomassa representa cerca de 20% da

oferta primária de energia. Com a eliminação da palha de cana-de-açúcar, grandes quantidades de resíduos de colheita estarão disponíveis para geração de energia. Em trabalho desenvolvido por Cock & Torres (2000) citado por Miranda, et al. (2008), foi verificado na Colômbia a viabilidade técnica e econômica de geração de eletricidade com a utilização de resíduos de colheita de cana crua. Os autores verificaram que caso ocorra uma redução dos custos em campo para menos de US\$ 8,0 por tonelada de resíduo, referente ao recolhimento e transporte destinado ao local de geração de eletricidade, com umidade de 35%, a geração de eletricidade seria um excelente investimento. Os autores também citaram que grande parte das variedades de cana-de-açúcar cultivadas na Colômbia produz mais de 30% de resíduos, com poder calorífico da ordem de $10.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ com umidade de 35%.

Dentro desse contexto, questões ambientais tem sido objeto de alguns tratados que foram estabelecidos no mundo, como o protocolo de Quioto, que possui grande importância quanto à questão energética, tendo em vista que uma de suas metas é a produção de energia limpa. Seguindo esse tratado, o Brasil, sendo uma das grandes potências de produção de energia por meio da biomassa, pode contribuir para redução de emissão dos gases de efeito estufa desse tratado por meio desse novo programa de desenvolvimento (IPCC, 2009).

Tendo em vista tal importância que irá favorecer o meio ambiente e a produção energética, pode-se citar por volta de 2004, 8 usinas de São Paulo, já co-geravam energia elétrica a partir do bagaço. Fora do Estado de São Paulo podemos citar ao Grupo Tércio Wanderley, desde 2002 incrementou as atividades de co-geração de energia elétrica (MIRANDA et al., 2008).

Porém, a palha de cana-de-açúcar possibilita a produção de energia limpa e muitas usinas já desenvolvem projetos para certificação de emissões de créditos de carbono pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que garante atingir as metas do Protocolo de Quioto. Portanto, é fundamental estabelecer o quanto de palha pode ser retirado das áreas cultivadas com cana-de-açúcar para ser utilizada na geração de energia e que não desencadeie ou acelere o processo de erosão nas áreas agrícolas.

3.2 Erosão hídrica do solo

Os processos erosivos ocorrem naturalmente no meio ambiente, de forma lenta e gradual, causando, no decorrer da evolução do globo terrestre, mudanças no relevo e na vegetação.

A erosão do solo é considerada como erosão natural que consiste em um processo praticamente impossível de ser estancado, comumente difícil de ser controlado e, facilmente acelerado

pelo homem (DREGNE, 1982). É um processo natural resultante unicamente da atuação de forças da natureza e responsável pelo nivelamento da superfície terrestre. Segundo Bahia et al. (1992) a erosão do solo natural ou geológica é causada por fenômenos naturais tais como chuva e o vento, que provocam contínuas mudanças na superfície terrestre. Existe também a erosão acelerada que é intensificada pela interferência antrópica, causada pela remoção da cobertura vegetal endêmica e introdução de espécies vegetais de interesse agrícola, geralmente monoculturas, tornando a estrutura do solo vulnerável à ação de ventos e de chuvas (FAO, 2001).

A erosão é a forma mais importante de degradação do solo e a principal causa de esgotamento de nutrientes nas áreas agrícolas com implicações diretas sobre a sustentabilidade (HUDSON, 1995). A substituição da floresta natural por outro tipo de uso do solo, além de acarretar a aceleração dos processos erosivos, promove um desequilíbrio na ciclagem de nutrientes via deposição da serrapilheira, afetando o desempenho de todo o ecossistema (DRUMOND, 1996; ANDRADE et al., 2000). Barros et al. (2009) em trabalho desenvolvido em área com vegetação natural, especificamente savanas comparando as mesmas com plantios de espécies florestais (*Acacia mangium*) constata, dentre os tratamentos a ocorrência de maior perda em áreas de *A. mangium* com um ano de idade, às áreas de savana natural de Roraima, do norte da Amazônia.

A erosão hídrica dos solos é um dos graves problemas enfrentados nas áreas agrícolas, sendo reflexo do uso e manejo inadequado do solo, de características intrínsecas como erodibilidade, agravadas pelas condições vigentes do ambiente como intensidade e frequência de chuvas e, a cobertura vegetal dos mesmos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990). Práticas agrícolas comprovadamente maléficas, que ainda são adotadas pelos agricultores, como o plantio contínuo e mal distribuído de culturas esgotantes e pouco protetoras do solo, o plantio morro abaixo, a queimada drástica dos restos culturais e o pastoreio excessivo, estão acelerando gravemente o degradação das melhores terras do país (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990)

A erosão do solo é um importante fator que influi na qualidade dos corpos de água, pois, por causa dela, há um aumento da quantidade de nutrientes, propiciando o fenômeno da eutrofização. Além disso, ela é responsável pelo assoreamento de rios, represas, canais e portos assim como pela poluição da água e por sua maior turbidez, resultando em um maior custo para a conservação e tratamento deste recurso (PUGLIESI et al., 2007).

Portanto, a erosão é uma das formas mais graves de degradação dos solos, que causa poluição ao meio ambiente, sendo esta classificada quanto às possíveis fontes de poluição, podendo ser pontuais

e difusas. As fontes difusas, em sua maioria, são oriundas de resíduos e efluentes de áreas agrícolas, já as fontes de poluição pontuais são caracterizadas pelos efluentes domésticos e industriais (MARTINS FILHO, 2007). Entretanto, não se pode generalizar, pois em um ambiente agrícola também pode ocorrer poluição pontual. Dessa forma, áreas agrícolas, que possuem aplicação de fertilizantes na superfície resultam, por exemplo, na poluição difusa, pois após a ocorrência de uma chuva, os materiais erodidos das áreas podem carrear altas concentrações de contaminantes, que são diretamente depositados nos locais mais baixos como os recursos hídricos (IZIDORIO et al., 2005).

A erosão do solo é um fenômeno complexo, que envolve a desagregação, o transporte das partículas de solo e, a deposição. A água que não infiltra mais em um solo saturado é um agente do balanço hídrico que condiciona a intensidade da erosão. A magnitude e a importância desses condicionantes dependem de uma série de fatores como o clima, o solo, a topografia, as práticas de manejo do solo e cultural, as práticas conservacionistas, as condições antecedentes de umidade e o tamanho da área considerada (BEZERRA e CANTALICE, 2006).

O processo de desagregação das partículas da massa de solo é feito pelos agentes erosivos que, no caso da erosão hídrica, é a água e é por meio do impacto das gotas de chuva que inicia esse processo (ELLISON, 1946). O desprendimento ou desagregação é compreendido como sendo a liberação de partículas dos agregados e, uma vez desprendidas elas podem permanecer próximas aos agregados ou serem transportadas (AMORIM, 1999). O desprendimento ou desagregação das partículas ocorre pelo efeito da energia cinética das gotas da chuva e da força cisalhante do escoamento superficial, o que constitui o estágio inicial e mais importante da erosão hídrica (BAHIA et al., 1992). Quanto ao transporte das partículas finas desagregadas ocorre quando o solo está saturado ou quando a velocidade da água precipitada é superior a capacidade de infiltração de água no solo, ocasionando o escoamento superficial do excesso de água, em áreas com declive. Finalmente, o material transportado se deposita em locais mais baixos, que podem ser depressões naturais do terreno ou reservatórios de água, concluindo o processo erosivo (ELTZ et al., 1984).

A água da chuva além de causar desagregação do solo por meio do impacto das gotas, também promove impacto na fina camada de água o que provoca turbulência no escoamento superficial, aumentando a capacidade do fluxo em desagregar e transportar partículas de solo. O aumento da espessura do fluxo, a partir de 3,0 mm e até 3 vezes o diâmetro da gota, causa o amortecimento da energia de impacto das gotas, diminuindo o transporte de partículas (KINNELL e CUMMINGS, 1993).

Isso ocorre, segundo Mutchler e Young (1975), porque uma lâmina d'água com profundidade igual ou maior a três vezes o diâmetro de gotas pode dissipar toda a energia do impacto.

A erosão hídrica pode ocorrer de diversas formas, dependendo do seu estágio e das condições ambientais vigentes. Podendo ocorrer na forma laminar, sulcos e voçorocas. A erosão laminar se caracteriza pela remoção de camadas delgadas na superfície do solo, apenas sendo perceptível após uma grande quantidade de solo ter sido removida. Segundo Amorim et al. (2001), a essa forma de erosão é referida por erosão em entressulcos, diferindo da erosão em sulcos, que se caracteriza pela formação de canais no sentido da declividade do terreno, fazendo com que o escoamento superficial se concentre nas direções preferenciais de fluxo mais baixos do terreno, atingindo volume e velocidades suficientes para formar canais mais ou menos profundos. Quanto à caracterização das voçorocas, são deslocamentos de grandes quantidades de massa de solo com a formação de canais de grandes dimensões (PRUSK, 1996).

Estima-se que durante os últimos 40 anos cerca de um terço do total das terras aráveis do mundo foi permanentemente danificada pela erosão e continua sendo, entretanto, a uma razão de 10×10^6 ha ano⁻¹ (PIMENTEL et al., 1995). O preparo do solo é o principal fator responsável pela criação das condições físicas superficiais do solo determinando a eficácia de redução da erosão e do escoamento superficial dos diversos sistemas de manejo empregados no estabelecimento de uma cultura, em um determinado local (AMARAL et al., 2008). Diante desse cenário, foram desenvolvidos inúmeros trabalhos, relacionados com a perda de solo (GOFF et al., 1994; BRAIDA e CASSOL, 1999; CASSOL et al., 2004; BEZERRA e CANTALICE, 2006; CASTRO et al., 2006). Bertoni e Lombardi Neto (1990) afirmam que os diferentes sistemas de cultivo propiciam diferentes condições finais de exposição do solo aos agentes erosivos, visto que promovem mobilização e cobertura vegetal diferenciada, ocasionando diferentes graus de proteção contra as perdas de água e solo. Assim, o manejo do solo tem grande influência no processo erosivo.

Em pesquisa realizada por Bertol et al. (2007), foram avaliadas as perdas de solo, água e nutrientes das culturas na erosão em entressulcos, em solo cultivado sob técnica de semeadura direta e submetido às adubações minerais e orgânicas. Essa pesquisa demonstrou a importância da conservação do solo e, conseqüentemente, as perdas de sedimento e água da enxurrada observadas, que evidenciaram a necessidade de se controlar a enxurrada da mesma em áreas cultivadas sob a técnica de semeadura direta, o que pode ser conseguido por meio da implantação de estruturas mecânicas para sua contenção. Já no trabalho de Luciano et al. (2009), foram quantificados as perdas de solo e água por

erosão hídrica sob chuva simulada, em duas direções de semeadura em relação ao declive, durante o ciclo da aveia-preta e da ervilha-comum. As perdas de solo diminuíram ao longo dos testes de chuva realizados durante o período vegetativo da aveia e ervilhaca. Tais perdas na semeadura em contorno foram 12% menores na aveia e 56% menores na ervilhaca do que na pendente; as perdas de água apresentaram o mesmo comportamento das perdas de solo, porém, com diferenças de menor magnitude.

Existem diferentes alternativas para conservação do solo, dentre elas a semeadura direta é considerada um dos mais eficazes isso porque envolvem práticas como a rotação de cultura, mobilização do solo exclusivamente na linha de semeadura e cobertura permanente do solo (CASSOL et al., 2007). A redução da mobilização do solo, que facilita a formação estrutural do solo, bem como a cobertura da superfície do solo, que além de contribuir no maior incremento de matéria orgânica; viabilizam a manutenção da capilaridade do solo, aumentando a infiltração e, conseqüentemente reduzindo a enxurrada, de acordo com Silva (2010).

Dessa forma, é comprovado na literatura que os resíduos vegetais quando deixados ou mantidos em contato direto com a superfície do solo são extremamente eficientes no controle do processo erosivo, mas especificamente na erosão em entressulcos (CASSOL et al., 2004; MARTINS FILHO et al., 2004; BEZERRA e CANTALICE, 2006). No Brasil, na última década, o setor sucroalcooleiro tem merecido destaque, principalmente quanto ao aumento no número de novos empreendimentos para a produção de açúcar e álcool em diferentes regiões do país, bem como a crescente necessidade da utilização da colheita mecanizada ao invés da utilização do fogo na pré-colheita, o que promove a manutenção da palhada sobre a superfície do solo. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar, a chamada cana crua, caracterizada pela não-despalha, é considerada uma importante prática sob o conceito de conservação do solo e da água.

Tendo em vista este cenário, o estudo destes processos erosivos, bem como as características hidráulicas dos fluxos superficiais, permitem um melhor entendimento dos mecanismos da erosão hídrica, facilitando o desenvolvimento de modelos fundamentais que descrevam as perdas de solo e auxiliem no estudo de práticas de controle de erosão.

3.2.1 Erosão em entressulcos

Dentre os diferentes tipos de erosão existentes, a erosão em entressulcos é a mais frequente devido ao seu mecanismo responsável, no caso, o impacto das gotas da chuva no solo e, a conseqüente

desagregação das partículas da massa de solo, por fim o transporte dessas partículas é feito, quase que exclusivamente, pelo chamado fluxo laminar raso.

Para maior compreensão dos processos de erosão hídrica do solo em entressulcos e em sulcos é interessante separar-los, devido ao fato do impacto da gota da chuva e do escoamento superficial agirem de forma diferente nestas duas situações. Cabe ressaltar, entretanto, que não há uma limitação física definida entre eles. Além disso, esses dois tipos de erosão podem ocorrer de forma simultânea (MEYER et al., 1975). O processo de erosão em entressulcos ocorre quando as partículas do solo são desagregadas pelo impacto das gotas da chuva e transportadas por um fino fluxo superficial de água (FOSTER, 1982). Segundo Panachuki et al. (2006) dois fatores são fundamentais no processo de erosão entressulcos, a erodibilidade do solo e a erosividade da chuva.

Diversos pesquisadores reconhecem a influência da erodibilidade, intensidade da chuva, declividade, rugosidade, umidade antecedente, resistência do solo à penetração, estabilidade estrutural, selamento e encrostamento superficial, no processo de erosão em entressulcos (GOFF et al., 1994; BRAIDA e CASSOL, 1999; CASSOL et al., 2004; BEZERRA e CANTALICE, 2006; CASTRO et al., 2006). Em um estudo conduzido em laboratório por Veiga et al. (1993), com solos do Rio Grande do Sul, foi verificado que a erodibilidade em entressulcos era menor para solos mais argilosos, com elevados teores de Fe e Al, maior estabilidade de agregados, quando submetidos à chuva simulada, menor grau de dispersão em água da fração silte e argila e maior retenção de água a baixos potenciais matriciais.

Os solos diferem em relação à erodibilidade em entressulcos por possuírem diferentes condições intrínsecas, dada a características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas (FOSTER, 1982). Os atributos do solo que afetam a sua erodibilidade em entressulcos incluem a textura, mineralogia, agregação, matéria orgânica, pH, teor de cátions trocáveis, grau e forma do declive e umidade inicial (VEIGA et al., 1993). Wischmeier e Smith (1978) apontam que os atributos que mais influenciam a erodibilidade são os que afetam a permeabilidade e a capacidade de armazenamento de água e aqueles que conferem ao solo resistência à dispersão, ao salpicamento, à abrasão e as forças de transporte da enxurrada. Além desse e de outros atributos, podem ocorrer ainda múltiplas e complexas interações entre alguns desses atributos e a erodibilidade, pode modificar as influências de forma individual.

Outro atributo relacionado erodibilidade é o teor de matéria orgânica, que de acordo com Gonçalves (2002) tem grande relação com a erodibilidade do solo. Nos solos que apresentam teores

mais elevados, a capacidade de aglutinação de partículas é maior, assim como possui maior estabilidade de agregados o que favorece a capacidade de retenção de água e de infiltração.

A intensidade da chuva tem importante efeito sobre a desagregação, ou desestruturação superficial do solo, devido à ação do impacto das gotas da chuva. Todo esse processo de desagregação é desencadeado pela erosividade da chuva, ou seja, pela intensidade da chuva (CARVALHO et al., 2003; NUNES e CASSOL, 2008). No momento do impacto há dissipação da energia cinética das gotas da chuva, a qual gera, localmente, forças de compressão e cisalhamento. Estas forças promovem o desalojamento e a liberação das partículas do solo, que são transportadas por um fino fluxo superficial. Essas mudanças alteram a taxa de infiltração de água, a rugosidade superficial, o selamento e o encrostamento superficial, que por sua vez, modificam a estabilidade de agregados e, conseqüentemente, a erodibilidade em entressulcos (ZHANG et al., 1998; STRECK e COGO, 2003).

Um índice de avaliação da erodibilidade do solo pode ser considerado como a estabilidade estrutural. Tal fato se justifica visto que a agregação do solo é uma propriedade dinâmica tendo próxima relação com a erodibilidade (ELLIOT et al., 1989; INÁCIO et al., 2007). No momento que os agregados são rompidos pelo impacto há em consequência a dispersão da argila, que leva à obstrução dos poros e ao selamento da superfície, com implicações na taxa de infiltração de água e erosão. Em modernas tecnologias para a estimativa da erosão, como no modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), os efeitos do manejo na estabilidade de agregados são utilizados também como índice avaliador da dispersão da argila em água. Nunes e Cassol (2008), estudando a estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul, verificaram que o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) dos solos LVaf, LVdf e LVd foi de $0,76 \times 10^6$; $0,97 \times 10^6$ e $1,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, respectivamente. Dentre os três latossolos estudados, os mais argilosos apresentaram os menores valores do fator de erodibilidade em entressulcos.

A erodibilidade em entressulcos é um processo dependente do tempo, o qual é influenciado por mudanças nas propriedades do solo, como o selamento e o encrostamento superficial (CASTRO et al., 2006). O selamento superficial é formado sob a influência de forças externas, como o impacto de gotas e a compactação mecânica, ou ainda, devido ao salpico e desagregação dos agregados durante a fase úmida, ou seja, sob ação da chuva ou irrigação. Já o encrostamento é um termo aplicado para descrever a superfície do solo, quando esta se torna endurecida ou impermeável após o processo de secagem, sequencialmente, após a ocorrência do selamento superficial (FATTAH e UPADHYAYA, 1996; BRANDÃO et al., 2006).

Em um estudo desenvolvido por Bradford et al. (1987) englobando vinte solos diferentes, com texturas variando de arenosa a argilosa, verificaram que o selamento superficial causou um decréscimo na taxa de infiltração de água, a qual variou de 36 a 1,2 mm h⁻¹. Observaram, ainda, que a resistência cisalhante variou de 2,6 a 42,3 kPa, implicando num decréscimo das perdas de solo em entressulcos, as quais oscilaram de 56,8 a 13,3 g no período de cinco minutos.

O efeito da declividade na erosão em entressulcos tem estreita relação com o ângulo de impacto das gotas da chuva, transporte por salpico e ainda com a velocidade e capacidade de transporte de sedimentos por um fino fluxo superficial. Em superfícies pouco inclinadas, a erosão em entressulcos é limitada pela capacidade de transporte de sedimentos de um fino fluxo superficial. O aumento da declividade acelera a erosão em entressulcos, em uma extensão bem menor do que para erosão em sulcos (AMORIM et al., 2001). Com o aumento da declividade ocorre um aumento na velocidade do fluxo superficial e na sua capacidade de transporte e, nesse caso, a erosão em entressulcos é limitada pela taxa de desagregação.

O cultivo modifica as condições físicas superficiais e as propriedades hidráulicas de um solo. O preparo do solo reduz a cobertura residual, aumenta a porosidade superficial, frequentemente aumenta a sua rugosidade e rompe a estrutura do solo devido à microfaturas. Portanto, o estudo do efeito da cobertura do solo na erosão em entressulcos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar é fundamental, principalmente devido à importância do uso desta cobertura para co-geração de energia o que pode reduzir a disponibilidade da palha na lavoura.

3.2.2 Erosão em entressulcos e suas relações com a cobertura do solo

A erosão hídrica do solo nas áreas em entressulcos combina o processo de desagregação do solo pelo impacto das gotas da chuva, transporte pelo salpico e, transporte pelo escoamento superficial laminar. Daí a importância de estudos que quantifiquem diferentes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo, com a finalidade de reduzir a erosão do solo, água e nutrientes e evitar a degradação de solos agrícolas.

Sistemas conservacionistas podem reduzir substancialmente as perdas de solo por erosão, se comparados com os sistemas de preparo convencional (COGO et al., 2003). A colheita mecanizada da cana-de-açúcar, denominada cana crua, caracterizada pela não-despalha, torna-se, nesse contexto, um sistema interessante visto que há conservação do solo e da água. Segundo Walton et al. (2000), no sistema de cana crua, a erosão do solo é reduzida porque há um menor número de operações de preparo

e, também, pela presença de uma camada de resíduos que é deixada sobre a superfície do solo após a colheita.

A manutenção de restos vegetais na superfície do solo em áreas agrícola com sistema conservacionista, além de proteger o solo da radiação solar, dissipa a energia de impacto das gotas de chuva, evita a perda de água e ajuda no controle de plantas daninhas (SCHAEFER et al., 2002), consistindo ainda em reserva de nutrientes considerável. Os resíduos culturais servem ainda como barreira física ao livre escoamento superficial, diminuindo sua velocidade e, assim, sua capacidade erosiva. Desta forma, a desagregação e o transporte das partículas de solo são bastante diminuídos, o que irá refletir-se em menor escoamento superficial, concentração de sedimentos na enxurrada e perda de solo (COGO et al., 1983). E, quando incorporados ao solo, o material vegetal promove a maior estruturação do solo e alimento para a microbiota, o que, juntamente com o desenvolvimento radicular das plantas, resulta em condições favoráveis à agregação e estabilização do solo (SILVA e MIELNICZUK, 1997).

A cobertura do solo reduz a erosão em entressulcos devido a três efeitos: a) a manutenção de resíduos em superfície, previnem a desagregação e o salpicamento do solo. b) reduzindo a capacidade de transporte das partículas desagregadas pelo fluxo de enxurrada ao longo do declive; c) aumenta a espessura do fluxo, o podendo implicar na dissipação da energia do impacto das gotas da água da chuva e, a redução da taxa de desagregação (BRAIDA e CASSOL, 1999).

Quanto em relação ao efeito de cobertura do solo é possível ser diferenciado em três tipos principais, o efeito tipo I é aquele decorrente da interceptação das gotas de águas propiciadas pelo dossel ou parte aérea das culturas, que esta diretamente conectado a altura e densidade do dossel (LAFLEN et al., 1985). O segundo efeito, a cobertura em contato direto com a superfície do solo, efeito tipo II, permite que a energia cinética das gotas da chuva seja dissipada junto à superfície, além de constituir-se num obstáculo à ação cisalhante da enxurrada (FOSTER, 1982; BRAIDA, 1994). Segundo Wischmeier (1975), o efeito III é aquele oriundo dos resíduos incorporados e do efeito residual do solo e manejo do solo na desagregação e transporte de sedimentos erodidos. Braida (1994) após estudos, afirma que o efeito II possibilita maior controle do processo de erosão do que o efeito I.

Portanto, independentemente do tipo de resíduo e do método de preparo empregado, utilizar uma cobertura do solo com resíduos culturais reduz expressivamente as perdas de solo (SCHICK et al., 2000). Porém, a eficácia da cobertura do solo que atua diretamente na redução da erosão depende de diversos fatores, como da percentagem de cobertura, forma de manejo e estágio de decomposição dos

resíduos sobre o solo (BERTOL et al., 1998), forma de distribuição dos resíduos, rugosidade superficial, sentido do preparo em relação ao declive e efeito da cobertura pela copa das plantas.

Através de estudos de eficácia de cobertura do solo na redução da erosão hídrica, diversos autores obtiveram perdas de solo cerca de 80% menores em cultivos com resíduos culturais mantidos na superfície, em relação às do preparo convencional (COGO et al., 1983; HERNANI et al., 1997; HUANG et al., 2005; SILVA et al., 2005). Bertol et al. (1989) concluíram que uma cobertura por resíduos culturais de 60% da superfície resulta em acentuada redução da velocidade do escoamento superficial da água, sendo eficaz o controle das perdas de solo, quando comparada à ausência de cobertura.

A presença de resíduos na superfície do solo aumenta a rugosidade hidráulica dessa superfície, o que reduz a velocidade e a profundidade do fluxo da enxurrada (FOSTER, 1982; DE MARIA et al., 1997). Cassol et al. (2004) estudando o escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo com resíduos vegetais, verificaram que a hidráulica do escoamento em entressulcos é afetada pela presença de resíduos vegetais na superfície do solo, causando redução da velocidade, aumento da resistência e da altura da lâmina do escoamento. A forma como esta distribuído fisicamente os resíduos ao escoamento reduz as taxas de desagregação do solo e aumenta a resistência devido ao aumento das forças viscosas e gravitacionais, o que provoca diminuição do número de Reynolds e do número de Froude do escoamento (FREITAS et al., 2008).

Ao avaliar o efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva, Silva et al. (2005) verificaram que o aumento da porcentagem de cobertura do solo para as intensidades de precipitação adotadas possibilitou diminuição expressiva nas perdas de solo. A cobertura do solo teve maior influência no controle das perdas de solo do que das perdas de água. Bezerra e Cantalice (2006), estudando a erosão em entressulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo de cana-de-açúcar, verificaram que os efeitos somados do dossel e do resíduo da cana-de-açúcar promoveram simultaneamente o aumento da rugosidade hidráulica e dos volumes de interceptação vegetal, determinando as maiores lâminas de escoamento superficial e os maiores volumes de infiltração e, assim, proporcionaram as menores taxas de desagregação do solo, para todo o ciclo da cultura da cana-de-açúcar, observou-se diminuição das perdas de solo com o aumento das taxas de cobertura de solo.

De acordo com trabalho desenvolvido por Freitas et al. (2008), no qual estudaram a erosão em entressulcos sob Caatinga e culturas agrícolas, observaram que todos os regimes de escoamento

superficial obtidos foram laminar lento e, as coberturas de Caatinga e guandu determinaram as maiores reduções de velocidade média dos respectivos escoamentos superficiais. Portanto, foi constatado efeito benéfico da manutenção de cobertura vegetal foi comprovado em relação à retenção dos volumes de escoamento superficial, em razão do aumento das forças viscosas, que se contrapõem ao livre escoamento superficial. As coberturas vegetais proporcionadas pela Caatinga semi-arbustiva e pelo guandu apresentaram os maiores valores de cobertura do solo e responderam pelos menores valores da concentração de sedimentos e da taxa de desagregação do solo na erosão em entressulcos.

Quando se considera a energia cinética os autores, Young e Wiersma (1973) verificaram uma redução de 90% dessa energia nas gotas incidentes sobre a superfície do solo, mantendo-se a taxa de aplicação de água constante, pode reduzir a perda de solo em até 90%. Braida (1994), utilizando simulador de chuva em um Argissolo Vermelho-Escuro, observou que a erosão em entressulcos decresceu exponencialmente com o aumento da cobertura do solo por resíduos vegetais. As parcelas com cerca de 100% de cobertura apresentaram redução de 92% na erosão em entressulcos em relação ao solo descoberto.

Trabalhos de Braida e Cassol (1999) e Martins Filho et al. (2004) têm demonstrado que o efeito dos resíduos vegetais sobre a erosão é dependente do tipo, quantidade, manejo, porcentagem de cobertura e estágio de decomposição. Portanto, é fundamental o estudo que avalie a quantidade mínima de palha que deverá permanecer na superfície do solo para que ocorra a menor perda de solo, água e nutrientes, contribuindo para a maior eficiência das práticas conservacionistas de manejo do solo.

3.2.3 Perda de solo, água e nutrientes

A erosão não é somente um fenômeno físico, mas também um problema social e econômico. Resulta, fundamentalmente, de uma inadequada relação entre o solo e o homem. Isso porque, o processo acelerado de erosão ocorre quando há alteração do equilíbrio natural entre a perda e a recuperação do solo, potencializando prejuízos, inclusive monetários.

As perdas de nutrientes podem ocorrer associadas ao transporte pelo fluxo ou adsorvidas aos sedimentos que são carreados pela enxurrada, tanto a perda de solo quanto da água estão intimamente ligadas às condições físicas de superfície do solo (WALTON et al., 2000) pois, representa a capacidade de determinada superfície possui para dificultar a enxurrada superficial.

O solo pode ter sua capacidade produtiva comprometida pela erosão, em decorrência de seu uso e manejo inadequados. Assim, o conhecimento das relações entre os fatores que causam as perdas

de solo e os que permitem reduzi-las é de fundamental importância para o planejamento conservacionista da propriedade agropecuária (ROQUE et al., 2001).

De acordo com estimativas feitas por Hernani et al. (2002), as perdas anuais de solo em áreas ocupadas por lavouras e pastagens, no Brasil, são da ordem de 822,7 milhões de toneladas. Esses autores estimaram que tais valores estariam associados a uma perda total, na propriedade rural, de US\$ 2,93 bilhões por ano. Os autores evidenciam que a erosão acarreta ao Brasil um prejuízo total de aproximadamente US\$ 4,24 bilhões por ano.

Para a quantificação de perdas de solo, água e nutrientes como consequência desse processo degradativo dos solos, foram desenvolvidos trabalhos relacionados, dentre eles correlacionam-se aspectos como a declividade (BRADFORD e FOSTER, 1996; JORGE et al., 2009), bem como as práticas de manejo (COGO, 1981; COGO et al., 2003; VOLK e COGO, 2009), coberturas vegetais (SILVA et al., 2005; FREITAS et al., 2008), rugosidade do solo (CASTRO et al., 2006; ZOLDAN JÚNIOR et al., 2008; LUCIANO et al., 2009), erodibilidade (AGASSI e BRANDFORD, 1999; FREITAS et al., 2008), etc. com as perdas de solo, água e nutrientes.

Em um trabalho realizado por Bertol et al. (2007), foram quantificadas as perdas de água e solo, P, K, Ca e Mg na água e de P disponível e K, Ca e Mg trocáveis nos sedimentos da enxurrada perdida por erosão hídrica, em um experimento realizado sob chuva natural no sul do Planalto Catarinense, para três sistemas de manejo do solo: preparo convencional, preparo mínimo e semeadura direta. Contudo, obteve o valor monetário das perdas anuais de P expresso na forma de superfosfato triplo, de K expresso como cloreto de potássio e de Ca e Mg expressos na forma de calcário, foi relativamente elevado, independente do sistema de manejo do solo. Tendo em vista que no manejo de semeadura direta as perdas foram de US\$ 14,83 por hectare por ano, enquanto no preparo mínimo foram de US\$ 16,33 e, no plantio convencional de US\$ 24,94.

De acordo com Cogo et al. (2003), avaliando as perdas de solo e água por erosão hídrica, influenciada por diferentes métodos de preparo do solo, perceberam que as maiores perdas de solo ocorriam quando o período de maior erosividade das chuvas coincidia com a época de semeadura das culturas e o início de desenvolvimento das plantas, agravado pela utilização de técnicas de preparo que mobilizam muito o solo, como o preparo convencional, que expõe o solo à ação erosiva das chuvas. Bertol et al. (2008), avaliando o efeito de escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo, verificaram que a rugosidade superficial do solo foi influenciada pelo tipo de preparo quando foi submetido a uma escarificação. Esse processo

aumentou a rugosidade em relação aos valores anteriores; o maior aumento ocorreu na semeadura direta, e o menor, no solo sem cultivo; a rugosidade diminuiu com o aumento das chuvas simuladas, com exceção do solo sem cultivo; o preparo convencional e a semeadura direta apresentaram comportamentos iguais.

As perdas de nutrientes por erosão hídrica são influenciadas pela sua concentração na água e nos sedimentos e pela perda total de água e de sedimentos por erosão (GUADAGNIN, 2003; BERTOL et al., 2003). A aplicação de adubos nas lavouras, durante longo período de tempo, tende a aumentar a concentração de P e K na superfície do solo, especialmente na semeadura direta sem revolvimento do solo. Bertol et al. (2004) verificou a maior perda de P em condições de semeadura direta, já para K varia com os preparos conservacionistas e convencionais.

Quanto à correlação de perda de solo com diferentes formas de semeadura em relação ao declive, foi comprovado por Luciano et al. (2009) que ocorre uma modificação das condições superficiais do solo quanto ao manejo da água de enxurrada, porque a forma de semeadura acarreta mudanças principalmente na orientação da rugosidade superficial e, conseqüentemente, na capacidade de armazenamento de água, de retenção de sedimentos na superfície do solo e, a erosão hídrica propriamente dita.

Um dos atributos importante relacionado ao solo é a sua rugosidade superficial induzida por métodos de seu preparo, é um dos pontos importantes para um manejo que visa à conservação do solo. Isso se deve ao fato de que ela aumenta a retenção e a infiltração superficial de água no solo, reduz a velocidade e o volume do escoamento. A chuva por sua vez pode modificar as condições físicas de superfície do solo criadas pelo preparo, graças à desagregação de suas partículas pela ação combinada da chuva com sua enxurrada associada, reduzindo a rugosidade superficial e conseqüentemente a retenção e infiltração. Isso pode favorecer o selamento superficial do solo influenciando numa maior perda de solo e água (COGO et al., 1984; CASTRO et al., 2006).

Em trabalho desenvolvido por Hernani et al. (1997), foram apresentados estudos visando à quantificação das perdas de solo por erosão e produtividade de soja e trigo sob diferentes sistemas de preparo em Latossolo Vermelho-Escuro, em Dourados-MS. Nesse estudo, os autores concluíram que a semeadura direta foi o sistema mais eficiente no controle de perdas de solo, água e produtividade de grãos de soja e trigo. As perdas médias de solo e água por erosão, relativas aos sistemas de plantio direto, escarificação e gradagem niveladora, gradagem pesada e gradagem niveladora e aração com arado de discos e duas gradagens niveladoras, sem cobertura vegetal, foram, respectivamente, 0,8; 2,8;

5,3; 7,3 t ha⁻¹ ano⁻¹ e o fator de erodibilidade do Latossolo Vermelho-Escuro foi de 0,0045 t h MJ⁻¹ mm⁻¹. No entanto, esses trabalhos foram feitos com parcelas fixas e com chuva natural, o que dificulta a condução do experimento em outras condições de solo e de manejo.

Contudo, os preparos de solo conservacionistas caracterizam-se pela presença de maior rugosidade e cobertura superficial do que os convencionais (COGO, 1981; BERTOL, 1995). Dessa maneira as perdas de água e sedimentos são reduzidas nos sistemas conservacionistas, o que diminui as perdas totais de nutrientes por erosão nesses sistemas de manejo (BERTOL, 1994; KING et al., 1996).

A erodibilidade representa a susceptibilidade que os solos apresentam de erodirem em diferentes taxas, devido às características intrínsecas dadas pelos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (FOSTER, 1982). Os valores de erodibilidade do solo são utilizados, entre outros aspectos para estabelecer uma escala de suscetibilidade natural dos solos à erosão hídrica, por exemplo, solos com baixa erodibilidade apresentam alta resistência à erosão já solos com alta erodibilidade são mais susceptíveis a perdas de solo.

A possibilidade de compreender os fatores ou processos que interagem ou determinam a erosão em entressulcos, em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar no sistema de colheita mecanizada, com base nas teorias atuais do mecanismo de erosão, requer a obtenção de informações fundamentais sobre as relações existentes entre esse fenômeno e o sistema de manejo utilizado nesta cultura. Portanto, esta pesquisa, vem ao encontro da necessidade de entender as relações da erosão em entressulcos com diferentes quantidades de cobertura na superfície do solo, quando na utilização da colheita mecanizada.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi realizado em uma área da Usina São Martinho, Município de Pradópolis, SP (21°18'67" de latitude sul e 48°11'38" de longitude oeste, 630 m de altitude). O clima é o mesotérmico de inverno seco (Cwa) pelo critério de classificação climática de Köppen e temperatura média anual superior a 24°C e a precipitação média da região é de 70,4 mm h⁻¹ (Figura 2). O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa (LVe) (EMBRAPA, 2006). As características físicas do solo estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Atributos químicos e granulométricos do solo na profundidade de 0,00-0,20 m.

pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	AT	Argila	Silte
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							%	-----g kg ⁻¹ -----		
4,7	19,4	21,6	1,2	18,4	5,2	1,2	36,2	24,8	60,9	40,5	344	525	132

MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H+Al = hidrogênio+alumínio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases; AT = areia total.

Tabela 2. Porosidade, diâmetro médio ponderado (DMP) e densidade do solo na profundidade de 0,00-0,20 m.

Tratamentos	Porosidade Total	Microporosidade	Macroporosidade	DMP	Densidade
%	-----m ³ m ⁻³ -----			mm	Mg m ⁻³
0	0,32068 a	0,27120 a	0,04946 a	0,97 a	1,38 a
25	0,31715 a	0,27290 a	0,04419 a	1,28 a	1,40 a
50	0,31916 a	0,27133 a	0,04783 a	0,94 a	1,41 a
75	0,34053 a	0,27530 a	0,06521 a	0,98 a	1,39 a
100	0,33678 a	0,27220 a	0,06458 a	0,85 a	1,41 a
Média	0,32686	0,27260	0,05254	1,004	1,40
CV (%)	0,33411	0,60	18,25	16,19	0,93

Nessa área, o manejo utilizado foi o preparo reduzido, realizado após a destruição das soqueiras pelo eliminador mecânico, que arranca e pica a touceira da cana de açúcar, provocando uma pequena mobilização de solo, somente na linha de cana. Já que a destruição mecânica com o uso do eliminador provoca ondulações no nível do terreno, é necessário o uso posterior da grade intermediária, para que o desnível do terreno seja minimizado e favoreça a próxima operação, sem que ocorra a pulverização do solo. Em seguida, foi feita a operação de subsolagem em área total com hastes espaçadas em 0,5 m e 0,45 m de profundidade, trabalhando com diferencial de 45 graus em relação à

linha de cana existente, para que não ocorra a parada do equipamento por obstrução ocasionada pelos restos vegetais.

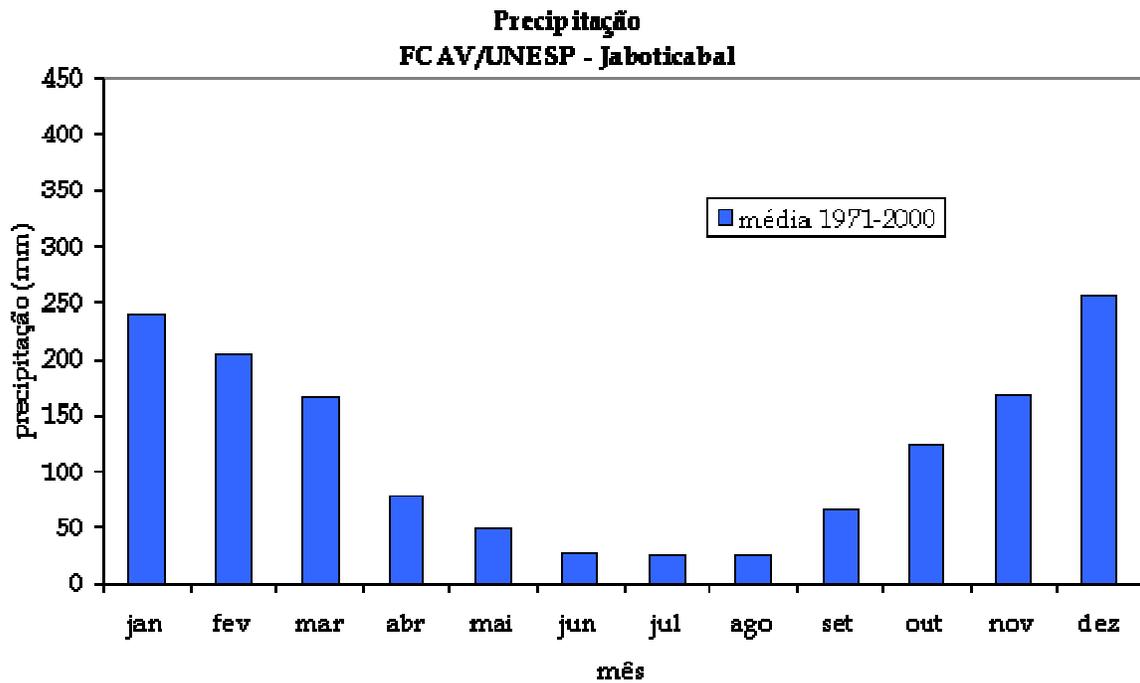


Figura 2. Gráfico da frequência pluviométrica (mm) do período de 1971 a 2000, da região de Jaboticabal no estado de São Paulo. (Fonte: FCAV-Unesp/Jaboticabal)

O experimento foi realizado em um cultivo de cana-de-açúcar no quinto corte da resoca. A área experimental, que apresenta um histórico de 20 anos de plantio desta cultura, situa-se no sopé de uma encosta com a declividade de $0,07 \text{ m m}^{-1}$ (Figura 3). Anterior à simulação, ocorreu aplicação de 80 m^3 de vinhaça e adubo granular NPK com a formulação 5-25-25.



Figura 3. Aspecto da paisagem da área de experimento.

4.2 Determinação da cobertura do solo

Sob condições de chuva simulada, foi realizada para cinco tratamentos, com diferentes quantidades de palha em superfície do solo: 1) ausência de palha; 2) 25% de palha; 3) 50% de palha; 4) 75% de palha e 5) 100% de palha. As porcentagens de cobertura foram avaliadas com uma régua graduada de 0,50 m, conforme método descrito por Adams & Arkin (1977). A dose de aplicação de resíduo teve como base a produção de palha da área local, $1,4 \text{ kg m}^2$. As quantidades de palha para cada tratamento foram da seguinte forma: as parcelas de 25% foram aplicadas 0,175 kg; parcelas de 50% foram aplicadas 0,350 kg; parcelas de 75%, 0,520 kg e parcelas de 100%, 0,700 kg.

A aplicação das doses de palha e a medida de umidade do solo para cada parcela foram realizadas 2 horas antes da realização de chuva simulada e das avaliações de erosão em entressulcos. Sendo assim, a medida de umidade foi feita por meio de leitura direta com o TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo). Antes de iniciar a simulação da chuva a umidade do solo se encontrava em torno de 31% e a umidade medida após o evento da chuva foi de 51,3%. No período de experimento a cana-de-açúcar se encontrava na fase de perfilhamento do estado fenológico; fase em que ocorre o processo de emissão de colmos por uma mesma planta.

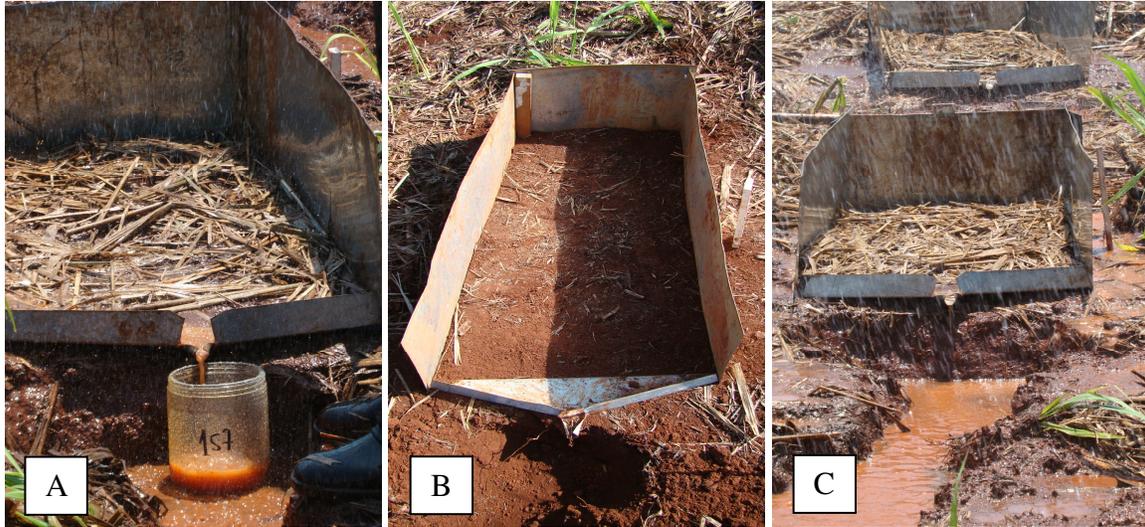


Figura 4. A) Parcela no momento de coleta; B) Parcela 0% de cobertura antes da simulação de chuva e C) Parcela com 100% de cobertura no momento da simulação de chuva.

4.3 Determinação da erosão em entressulcos

Parcelas experimentais, com 0,50 m de largura e 1,00 m de comprimento; com uma área útil de 0,50 m², foram delimitadas com chapas metálicas nas laterais e parte superior e, por calhas coletoras metálicas em seus limites inferiores, sendo a altura das placas galvanizadas de 0,30 m, depois de cravadas no solo permanecem com 0,25 m (Figura 4). Ficando a maior dimensão no sentido do declive. As calhas coletoras, com 0,50 m de largura, convergem para uma saída lateral de 0,065 m de diâmetro (Figuras 5 e 6). Amostras de escoamento superficial foram coletas nestas calhas para quantificar as perdas de solo e água.

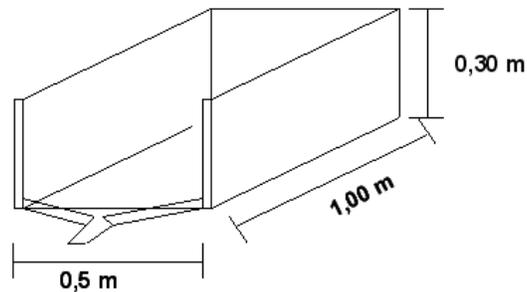


Figura 5. Desenho demonstrativo da parcela experimental e suas medidas.



Figura 6. Parcela experimental, em destaque no lado direito a saída da calha coletora.

Anteriormente a realização da simulação de chuva foram coletadas 20 amostras de solo na profundidade de 0,00-0,20 m, extraídas aleatoriamente nas bordaduras das parcelas experimentais, para que estas não interferissem no processo de erosão em entressulcos, essas amostras foram usadas para analisar as frações granulométricas, a composição química, bem como a estabilidade de agregados. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com 2,0 mm, para determinação das análises laboratoriais.

O experimento foi realizado no mês de outubro de 2009, estação da primavera. As parcelas experimentais foram submetidas a um evento de chuva simulada com intensidade média em torno de 65 mm h^{-1} (I) e duração de 60 minutos, isso se deve a calibração do aparelho feita desde a construção, também adotado por Cassol et al. (2004) como valor padrão para comparação de resultados obtidos em termos de erosão. Foi utilizado, para realizar as precipitações, um simulador de chuvas de hastes rotativas do tipo Swanson (1965) com bicos “VEEJET” 801000, previamente calibrados e nivelados no terreno, como proposto por Swanson (1965), numa área circular de quinze metros de diâmetro, para a quantificação do material erodido (Figuras 7 e 8). Trinta e seis pluviômetros, alinhados no sentido do declive, na área de ação do simulador de chuvas, como descrito por Martins Filho (1999) confirmando a melhor forma de quantificar, variação de precipitações originadas pelo simulador.



Figura 7. Simulador de hastes rotativas.



Figura 8. Hastes do simulador, com destaque para visualização dos bicos aspersores.



Figura 9. Parcela do tratamento 0% de cobertura no momento da avaliação da velocidade de escoamento.

Amostragens para medidas de vazões dos escoamentos superficiais e das concentrações de sedimentos, bem como as velocidades foram realizadas no quinto minuto após o início da enxurrada e, a partir daí, a cada cinco minutos, como o realizado por Martins Filho (1999). A velocidade do escoamento superficial foi obtida pela medição do tempo gasto para um corante (azul de metileno a 0,25%) percorrer uma distância conhecida na parcela experimental, esse procedimento foi realizado apenas para as parcelas sem coberturas. As medidas foram feitas a cada cinco minutos, durante 60 minutos de chuva simulada. A velocidade assim determinada é considerada como a velocidade máxima do escoamento, utilizando-se a velocidade média do escoamento, a qual, conforme Farenhorst e Bryan (1995) é dada pelo produto da velocidade observada por um fator de ajuste $\alpha = 2/3$.

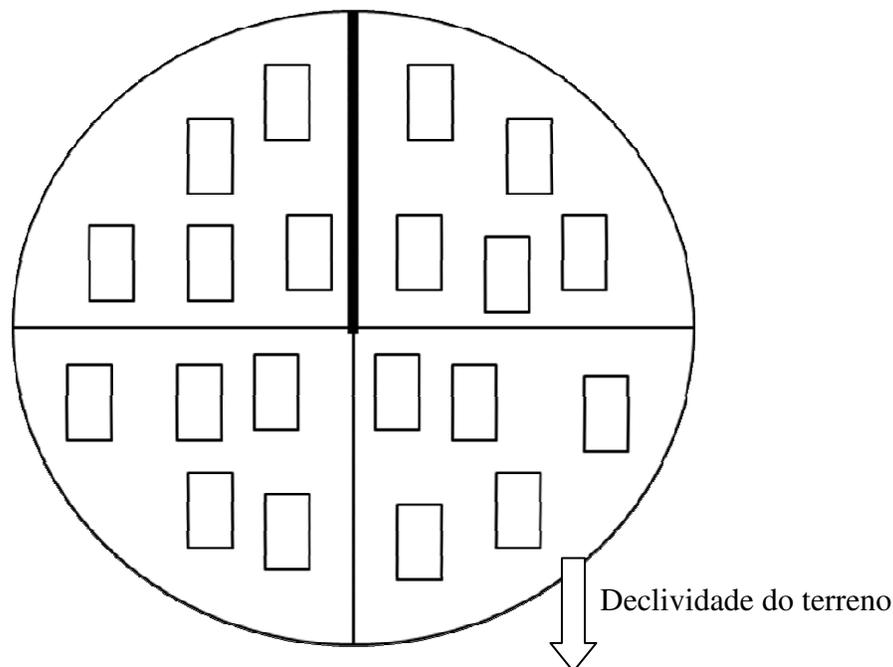


Figura 10. Croqui da montagem das parcelas na área de estudo; os retângulos representam as parcelas experimentais e seus cinco tratamentos, agrupados para as quatro repetições; o raio mais espesso representa a disposição dos trinta e seis pluviômetros.

Foram coletadas 240 amostras em recipientes de plástico com capacidade de 1 L, cronometrando-se o tempo de coleta. Para cada parcela foram coletadas 12 amostras, contabilizando uma a cada cinco minutos. Logo após as coletas, os recipientes foram fechados e conduzidos ao laboratório para a quantificação da concentração de material erodido e volume de suspensão para determinação das taxas de perdas de solo e água. Os volumes de suspensão coletados foram avaliados gravimetricamente, em balança com precisão de 0,01 g e, em seguida, adicionou-se 5,0 ml de sulfato de alumínio e potássio P.A. a 5%, para deposição das partículas durante 24 horas; posteriormente, o sobrenadante foi succionado e os potes levados para secagem em estufa à 65 °C (BEZERRA et al., 2002). Após secagem, as amostras foram pesadas, determinando-se o peso de sedimento de cada uma. A concentração de sedimentos foi obtida considerando-se o volume da suspensão, a densidade da água e do material em suspensão, conforme descrito por Vanoni (1975).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram determinadas a partir da equação (1):

$$D_i = \frac{m_s}{tA} \quad (1)$$

Em que, m_s = massa de solo desagregado (kg); t = tempo de coleta (s), e A = área da parcela (m^2).

Os valores de D_i foram normalizados para o valor de intensidade de chuva planejado de 65 mm h^{-1} , conforme Cassol et al. (1999), de acordo com a equação (2):

$$D_{in} = D_i \left(\frac{I_p}{I_o} \right)^2 \quad (2)$$

Em que, D_{in} são as taxas de desagregação do solo em entressulcos normalizadas ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$); D_i são as taxas de erosão em entressulcos observadas ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$); I_p é a intensidade de chuva planejada (mm h^{-1}), e I_o é a intensidade de chuva observada (mm h^{-1}).

As perdas totais de solo foram determinadas empregando a equação (3):

$$PS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i C_i t)}{A} \quad (3)$$

Sendo que, PS é a perda total de solo em entressulcos (kg m^{-2}); Q é a vazão (L s^{-1}); C é a concentração de sedimentos (kg L^{-1}); t é o intervalo entre as coletas (300 s); A é a área da parcela (m^2), e n é o número total de amostras coletadas.

O efeito da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar na superfície do solo, subfator C_{III} , foi determinado de acordo com a equação (4):

$$C_{III} = D_i / (K_i I R S_f) \quad (4)$$

Em que D_i é a taxa média de erosão em entressulcos, observada nas parcelas com coberturas do solo, obtida nos 15 últimos minutos das amostragens de enxurrada, I é a intensidade de chuva, $m \text{ s}^{-1}$, e R é a taxa de enxurrada, $m \text{ s}^{-1}$. Os valores de D_i obtidos nas parcelas sem cobertura, nos minutos das amostragens de enxurrada, foram utilizados para se estabelecer a erodibilidade em entressulcos (K_i). O fator declividade (S_f) foi determinado como citado em Liebenow et al. (1990); empregando a equação (5):

$$S_f = 1,05 - 0,85e^{-4\text{sen}\theta} \quad (5)$$

Em que, e é a base dos logaritmos naturais, e θ é o ângulo do declive em graus.

Foi realizada uma plotagem dos valores de taxa de desagregação para cada parcela de coleta, sendo ajustada uma equação para expressar o comportamento da taxa de desagregação para os tratamentos.

Parâmetros referentes à hidráulica do escoamento superficial, como altura do fluxo superficial, número de Reynolds, número de Froude e coeficiente de rugosidade de Manning, foram determinados como descrito na sequência. Para a avaliação de algumas características hidráulicas do escoamento superficial em entressulcos foi medida a temperatura da água de escoamento.

A altura do fluxo superficial (y) foi obtida como descrito por Cochrane e Flanagan (1997), pela equação (6):

$$y = \frac{q}{v} \quad (6)$$

Em que, q é a descarga líquida por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), e v é a velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

O número de Reynolds (R_e) foi obtido conforme expressão apresentada por Gilley e Doran (1998):

$$R_e = \frac{q}{V} \quad (7)$$

Em que, q é a descarga líquida por unidade de largura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), e V é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

A viscosidade cinemática da água foi determinada, com base na temperatura ($^{\circ}\text{C}$) obtida por meio de um termômetro em cada teste, conforme Julien (1998):

$$V = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

Em que, T é a temperatura da água em $^{\circ}\text{C}$.

Quando $R_e < 500$, $R_e > 500$ e $R_e > 2.000$, o fluxo foi considerado laminar, turbulento transicional e completamente turbulento, respectivamente (EVANS et al., 1997; LOWE, 2003).

Para obter o número de Froude (Fr), foi utilizada a seguinte expressão conforme Chanson (2004):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (9)$$

Em que, g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), e h é a altura do fluxo superficial (m).

Conforme Grant (1997), quando $Fr > 1$, o fluxo foi denominado de supercrítico e, no caso contrário, de subcrítico.

A rugosidade hidráulica ao escoamento superficial foi obtida determinando-se o coeficiente de rugosidade de Manning, conforme Chow (1959):

$$n = \frac{1}{v} Rh^{2/3} S^{1/2} \quad (10)$$

em que, Rh é o raio hidráulico (m), e S é a razão de inclinação do declive ($m\ m^{-1}$).

4.4 Caracterização Física no local de estudo

a) Análise granulométrica do solo, foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação (CAMARGO et al., 1986). A areia grossa e fina foram separadas por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

b) Densidade do solo e porosidade do solo, foram coletadas na profundidade de 0,00-0,10 m, amostras indeformadas por meio de anéis volumétricos de 0,04 m de altura e 0,05 m de diâmetro, sendo um anel para cada parcela. A microporosidade foi determinada em mesa de tensão que correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa, após saturação (EMBRAPA, 1997). A porosidade total e a densidade do solo foram obtidas segundo EMBRAPA (1997) e, a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

c) Estabilidade de agregados do solo, foi medida pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), foram retiradas amostras na profundidade de 0,00-0,10 m para cada parcela. Os agregados foram obtidos mediante manipulação com as mãos, aplicando força de tração, sendo usados para peneiramento em água os agregados que passarem na peneira de 9,52 mm e retidos na de 4,76 mm. Após secagem ao ar, os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,76 mm por dez minutos. Para peneiramento dos agregados em água, foram utilizadas as peneiras com diâmetros de malha 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, separando os agregados nas seguintes classes: C1 (9,52-4,76 mm), C2 (4,76-2,0 mm), C3 (2,0-1,0 mm), C4 (1,0-0,5 mm), C5 (0,5-0,25 mm) e C6 (< 0,25 mm).

4.5 Caracterização química do solo e do material erodido

A caracterização química do solo foi efetuada a partir de duas amostras compostas obtidas de 10 subamostras cada que foram previamente homogeneizadas. Subamostras estas que foram retiradas das laterais das parcelas, na profundidade de 0,00-0,20 m. Foram determinados os seguintes atributos: pH $CaCl_2$ 0,01 M pelo método potenciométrico; bases trocáveis ($S = Ca^{++}, Mg^{++}, K^+, Na^+$) pelo método do acetato de amônio a pH 7,0; acidez potencial ($Al^{+++} + H^+$) pelo método do acetato de cálcio a pH

7,0; alumínio trocável (Al^{+++}) pelo método do KCl N.; capacidade de troca de cátions ($CTC = S + Al^{+++} + H^+$); fósforo assimilável, pelo método de extração por resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). O teor de matéria orgânica foi obtido por meio da metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). As transformações dos nutrientes perdidos no material erodido em adubos agrícolas foram realizadas de acordo com Primavesi e Primavesi (2000).

4.6 Análises estatísticas

O experimento foi conduzido num delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), num esquema fatorial, com: Latossolo Vermelho, 5 porcentagens de cobertura vegetal em contato direto com a superfície do solo e 4 repetições, totalizando 20 parcelas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, segundo um DIC, sendo que, para as comparações das médias, foi utilizado o teste de Duncan com 5% de probabilidade. Análises de regressão e, sua significância, também foram efetuadas entre a perda de solo, perda de água, infiltração de água, taxa de desagregação do solo, altura da lâmina de escoamento, perdas de nutrientes e matéria orgânica com base da porcentagem de cobertura por resíduos. Todos os resultados das análises estatísticas foram obtidos com o programa Statistica (STATSOFT, 1994).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Hidráulica do escoamento na erosão em entressulcos

Com a simulação da chuva verificou-se que os tratamentos com 50%, 75% e 100% de cobertura apresentaram diferença estatística significativa em relação as parcelas de 25% e 0% ao observar os parâmetros de taxas de descarga líquida (q) e vazão (Q) (Tabela 3). A descarga líquida e a vazão de enxurrada demonstraram comportamentos semelhantes para os tratamentos com 50%, 75% e 100% de cobertura. Isso se deve à maior interceptação da chuva e enxurrada pelos resíduos vegetais, o que retardou o início do escoamento superficial e aumentou a infiltração durante as chuvas simuladas, o que corrobora os resultados obtidos por Bezerra e Cantalice (2006).

Tabela 3. Parâmetros de erosão e da hidráulica do escoamento em entressulcos para a ausência e diferentes quantidades de palha na superfície do solo.

Quantidade de palha	$q \times 10^6$ ($m^2 s^{-1}$)	$Q \times 10^3$ ($L s^{-1}$)	i (mm h^{-1})	n	Re
0%	7,180 a	4,192 a	39,154 a	0,018 a	7,995 a
25%	6,177 a	3,691 a	42,760 a	0,028 a	6,879 a
50%	3,766 b	2,335 b	51,441 b	0,106 a	4,194 b
75%	3,468 b	2,186 b	52,515 b	0,107 a	3,862 b
100%	3,533 b	2,218 b	52,282 b	0,102 a	3,934 b
	Fr	y (mm)	v (m s^{-1})	C (g L^{-1})	$Di \times 10^4$ ($kg m^{-2} s^{-1}$)
0%	1,152 a	0,160 c	0,045 a	3,931 a	0,320 a
25%	0,878 a	0,180 bc	0,035 a	2,925 a	0,220 b
50%	0,357 b	0,263 ab	0,016 b	1,054 b	0,032 c
75%	0,291 b	0,270 a	0,014 b	0,278 b	0,011 c
100%	0,295 b	0,265 ab	0,014 b	0,084 b	0,004 c

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade. Q = vazão do escoamento; q = taxa de descarga líquida; i = taxa de infiltração; y = altura da lâmina de escoamento; v = velocidade do escoamento; n = coeficiente de rugosidade de Manning; Re = número de Reynolds; Fr = número de Froude; C = concentração de sedimentos e Di = taxa de desagregação do solo em entressulcos.

As condições físicas de superfície do solo foram as mesmas para todos os tratamentos, com alteração apenas na quantidade de palha por tratamento, o que alterou as características hidráulicas de escoamento, para algumas variáveis relacionadas ao fluxo superficial, dessa forma, a palha na superfície do solo também contribuiu para a maior taxa de infiltração de água e aumento da lâmina de escoamento (Tabela 3), concordando com os resultados obtidos por Pan e Shanguan (2006).

A vazão analisada no experimento sofreu uma queda gradativa e exponencial com o incremento da quantidade de palha na superfície do solo (Tabela 3 e Figura 11), corroborando com os resultados obtidos por Schafer et al. (2001). Tal situação comprova que esse material sobre o solo altera o escoamento superficial, retendo mais água, melhorando a infiltração da água no solo. O coeficiente de determinação mostra a confiabilidade no resultado apresentado.

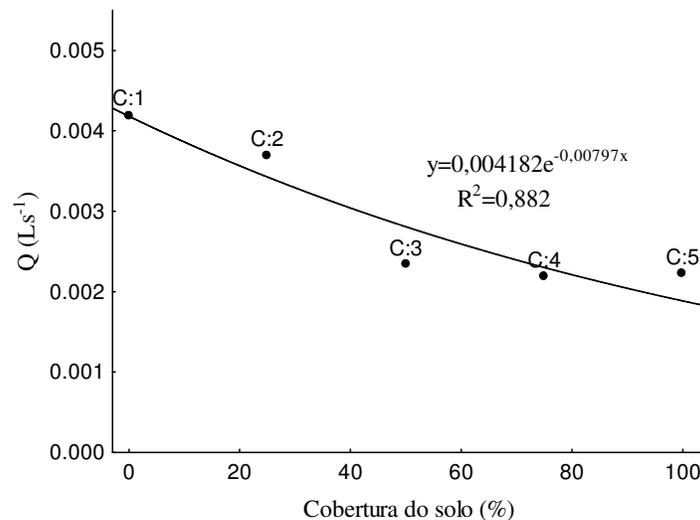


Figura 11. Vazão do escoamento laminar, em função da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar.

Observou-se efeito linear da quantidade de palha sobre o solo na taxa média de infiltração de água (i), para as parcelas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de cobertura do solo com palha de cana-de-açúcar (Figura 12). Segundo Bezerra e Cantalice (2006), modelos ajustados para a infiltração no decorrer do tempo em área com a utilização de cobertura por palha na superfície, foram exponenciais, diferindo a escala de crescimento por apresentar, neste caso uma variação constante, a medida que é aumentado a quantidade de palha na superfície.

Geralmente, a superfície do solo assim como a cobertura do solo por vegetação ou por resíduos vegetais, rugosidade do solo e selamento superficial são importantes aspectos para o controle do processo de infiltração (CERDAN et al., 2002). Como observado na Figura 12, o aumento da

infiltração no solo se dá à medida que o incremento de palha na superfície do solo é aumentado. Esse processo é confirmado também com o comportamento de outras variáveis do escoamento hidráulico. Além dessa característica pode-se observar a diminuição da velocidade e conseqüente aumento da altura da lâmina de escoamento. Segundo LEYS et al. (2007), manejo conservacionista claramente reduz a perda de solo por escoamento, em 63% dos casos a média das taxas de escoamento foi reduzida, já em 88% dos casos a redução na média de perda de solo foi também verificada.

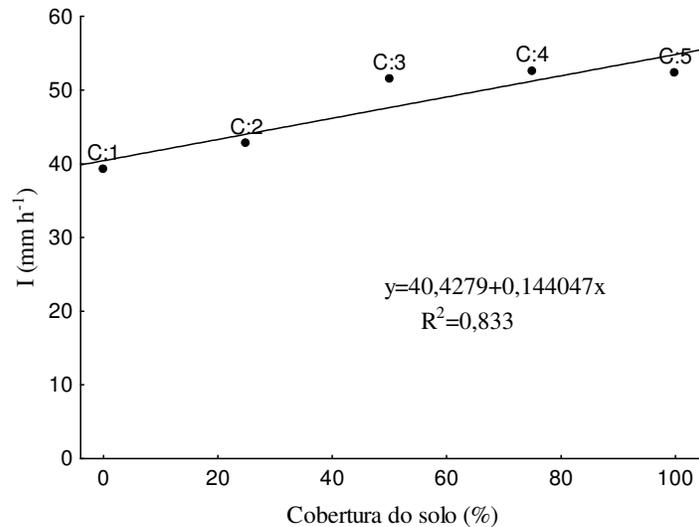


Figura 12. Taxa média de infiltração da água no solo, em função da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar.

Os resultados para o coeficiente de rugosidade de Manning variaram entre 0,017 e 0,102, que foram próximos aos valores encontrados por Kitahara, (1993) para solos descobertos e sob floresta com a manutenção da serrapilheira (Tabela 3). Dessa maneira, a superfície do solo proporciona maior rugosidade superficial, ajudando na manutenção e melhora da sua capacidade de retenção e de infiltração superficiais de água, comparados aos solos com superfície lisa (CASTRO et al., 2006). Por essa razão, a cobertura do solo por resíduos culturais assume grande importância junto ao papel desempenhado pela rugosidade superficial em termos de redução da erosão hídrica, uma vez que ela protege a superfície do solo contra a ação de impacto direto das gotas de chuva.

O incremento da quantidade de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo proporcionou o aumento do coeficiente de rugosidade de Manning, porém, não apresentou diferença estatística significativa (Tabela 3). Dessa maneira, o coeficiente de rugosidade apresentou uma ascensão de 21%

com a adição de palha na superfície do solo em comparação com as parcelas sem cobertura, concordando com os resultados obtidos por Bezerra e Cantalice (2006). Foster et al. (1982) ainda mencionam o aumento na rugosidade hidráulica da superfície do solo que varia com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal. De acordo com Cogo (1981) e Lopes et al. (1987) através da erosão hídrica da forma global, foram encontradas diferenças na eficácia de controle da erosão do solo pelos resíduos de trigo, milho e soja. De acordo com esses autores, tais diferenças estão relacionadas com as características dos resíduos vegetais, como o tamanho, formato, e sua densidade relacionada aos fragmentos de palha que formam esses resíduos.

Os valores do número de Reynolds, $Re < 500$, sugerem que o regime de escoamento para todos os tratamentos foi laminar lento (Tabela 3). Conforme, Grant (1997), os fluxos são considerados subcríticos quando o número de Froude (Fr) foi inferior a 1,00 e, supercrítico para $Fr > 1,00$. Portanto, apenas com exceção da parcela sem cobertura, que apresentou um número de Froude maior que 1,00 caracterizando um regime de fluido laminar rápido, supercrítico e, os demais foram classificados como subcríticos. Tais resultados confirmam que as condições experimentais foram as de fluxos laminares subcríticos e supercríticos, característicos do processo de erosão em entressulcos. A exceção referente a parcela sem cobertura se deve às condições facilitadas do escoamento, devido à diminuição da rugosidade. Tal rugosidade decresceu com o decorrer do tempo, graças ao efeito de impactos sucessivos das gotas de chuva sobre a superfície do solo, caracterizada como rugosidade transitória (BEZERRA e CANTALICE, 2006). Portanto, os regimes de escoamento caracterizado por baixos números de Reynolds confirmam o escoamento típico da erosão em entressulcos, concordando com os resultados obtidos por Cassol et al. (2004) e Bezerra e Cantalice (2006).

O incremento das doses de palha promoveu o aumento da altura da lâmina (y) de escoamento em 66%, demonstrando diferença significativa entre as parcelas sem cobertura e as de 50, 75 e 100%; bem como uma maior resistência ao escoamento com conseqüente incremento da rugosidade hidráulica (n) (Tabela 3), concordando com os resultados obtidos por Foster (1982). A altura das lâminas de escoamento estão de acordo com as lâminas (y) obtidas por Farenhorst e Bryan (1995), Cantalice (2002), Cassol et al. (2004) e Bezerra e Cantalice (2006). Outro ponto importante foi a diminuição do número de Froude, estando de acordo com os dados de Cassol et al. (2004) e Bezerra (2003).

O escoamento superficial pode ser dividido em três estágios com o decorrer do tempo, segundo os autores Moore e Singer (1990) e Roth e Helming (1992). No primeiro estágio (I) (pré-escoamento) a chuva pode causar pequenos reservatórios, mas não ocorrerá o escoamento nem a perda

de solo. A continuação deste estágio depende de fatores como as propriedades do solo e da cobertura. No estágio (II) taxas de escoamento e perdas de solo aumentam rapidamente, até o limite máximo. O pico é seguido depois de um período por um rápido declínio das gotas para o fim do estágio II. Finalmente, no estágio III (estágio constante) taxas de escoamento e perda de solo acham o equilíbrio. Nesta simulação, o escoamento obteve uma velocidade (v) maior para as parcelas de solo exposto, a qual apresentou redução gradativa de acordo com os tratamentos com cobertura de 25%, 50%, 75% e 100% (Tabela 3).

A redução na concentração de sedimentos (C) na enxurrada foi significativa e proporcionalmente maior com as coberturas a partir de 50% (Tabela 3). Deste modo, evidencia-se a eficácia das pequenas quantidades de palha em reduzir a capacidade de transporte do fluxo superficial, favorecendo a deposição e, conseqüentemente, diminuindo a concentração de sedimentos na enxurrada e taxa de desagregação do solo (D_i), como observado por Cassol et al. (2004). Tal concentração pode ter sido reduzida, pela redução na taxa de desagregação de solo nas áreas descobertas, em decorrência do aprofundamento do fluxo superficial. Cogo (1981) obteve relações semelhantes entre a concentração de sedimentos na enxurrada com diferentes variações de cobertura do solo por resíduos vegetais.

Quanto maiores as quantidades de cobertura do solo proporcionadas pelas diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar, menores as taxas de desagregação (D_i), decorrentes do menor impacto das gotas de chuva na superfície do solo, diminuindo, assim, a desagregação das partículas da camada superficial do solo (Tabela 3). Isto demonstra a eficiência do aumento da porcentagem de cobertura, proporcionando uma redução na taxa de desagregação do solo quando é aplicada uma cobertura de 50% de palhada de cana-de-açúcar.

A aplicação de diferentes quantidades de doses de palha sobre as taxas de desagregação (D_i) do solo para a declividade estudada (7%) mostra que ocorreu uma diminuição exponencial da concentração de sedimentos e das taxas de desagregação do solo em função do aumento das doses de palha (Figuras 13 e 14), o que demonstra a eficiência da palha da cana-de-açúcar em superfície do solo na redução das perdas de solo, concordando com os resultados obtidos por Pan e Shangguan (2006).

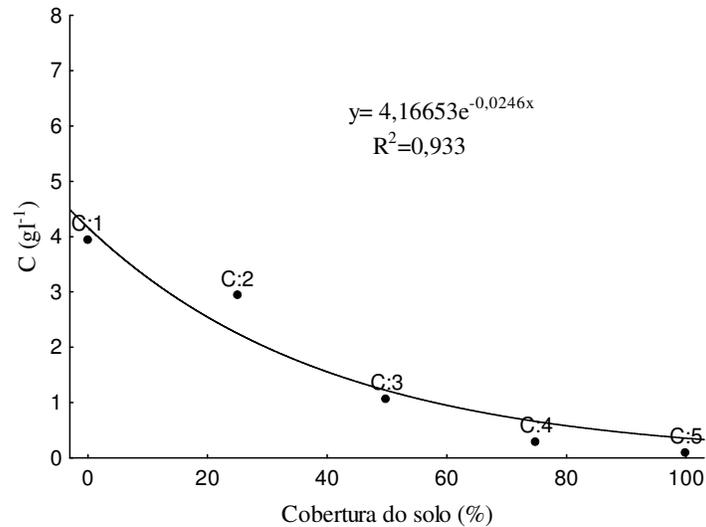


Figura 13. Concentração de sedimentos no escoamento laminar, em função da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar.

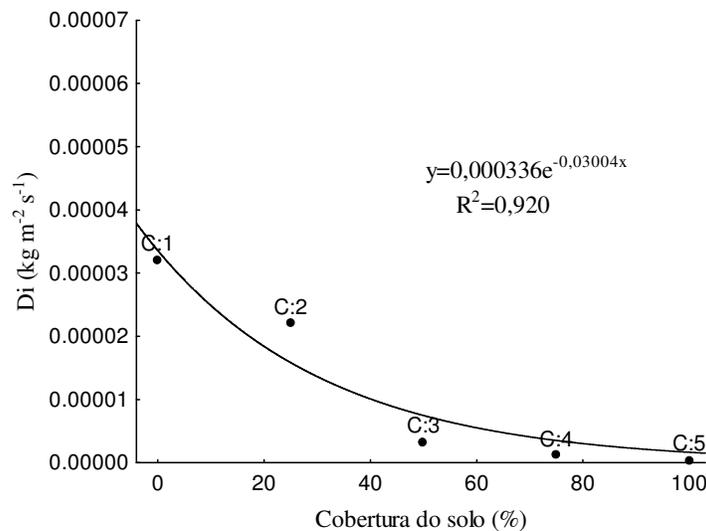


Figura 14. Taxa de desagregação do solo, em função da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar.

Para a perda de solo, expressa em kg m^{-2} , o efeito benéfico da cobertura foi significativo (Tabela 4). Nos tratamentos com 50% de cobertura verificou-se significativa e expressiva redução das perdas de solo por erosão de 90%, em comparação com os tratamentos sem cobertura, enquanto que para os tratamentos de 25% e 50% de cobertura a redução foi de 85% de perda. Os resultados obtidos são semelhantes aos de Cantalice et al. (2009), que observaram uma redução significativa na perda de solo e nutrientes. Bezerra e Cantalice (2006) concluíram que os resíduos da cana-de-açúcar em contato

direto com o solo propiciaram um aumento da rugosidade hidráulica, retardando o início do escoamento superficial, com o subsequente aumento das taxas de infiltração de água no solo, bem como a redução das perdas de solo advindas da erosão em entressulcos (Figura 14).

Tabela 4. Perdas totais de solo e de água por erosão em entressulcos para a ausência e diferentes quantidades de palha em superfície do solo para o evento de chuva estudado.

Perdas	Cobertura do solo (%)				
	0	25	50	75	100
Solo (kg m ⁻²)	0,096 a	0,066 b	0,010 c	0,003 c	0,001 c
Água (l)	15,179 a	13,328 a	8,440 b	7,928 b	8,00 b

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade. Médias de quatro repetições.

Pelos resultados apresentados na Figura 15 verifica-se que após adicionar 50% de resíduo vegetal como cobertura do solo, o resultado não sofrerá alterações em questão de perda de solo (Tabela 4), ou seja, independente da quantidade colocada a mais na superfície do solo, a perda nunca será nula, conforme observado por Martins Filho et al. (1999). Entretanto, Bertol et al. (2007) afirmam que em uma condição de solo com 100% de superfície coberta, é possível reduzir as perdas de solo em 100%. Tal afirmação anterior não é confirmada por Martins Filho et al. (2009), que em trabalho relacionando os subfatores de cobertura do solo, as parcelas com 100% de cobertura apresentaram subfator C_{II} médio igual a 0,11, o que demonstra que, mesmo nessa condição, ocorre erosão.

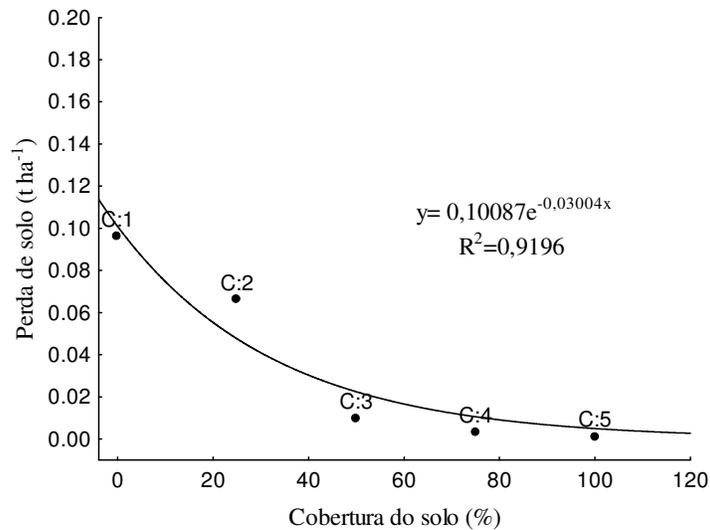


Figura 15. Perda de solo total, em função da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar.

O efeito da cobertura do solo por resíduos de cana-de-açúcar, na superfície do solo, nas perdas por erosão (PS), pode ser modelado por uma função exponencial ($PS = 0,10087 e^{-0,00384(CS)}$, Figura 15). Tal modelo também ajustou-se para a mesma relação em trabalhos de Martins Filho et al. (2009) num Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar e Cantalice et al. (2009) num Espodossolo cultivado com cana-de-açúcar. Segundo Braida e Cassol (1999) os resíduos vegetais, quando mantidos na superfície do solo, têm alta eficiência no controle da erosão. Os autores verificaram que a erosão em entressulcos decresceu exponencialmente com o aumento da cobertura do solo por resíduos vegetais, esta eficiência está ligada ao tipo e à quantidade na superfície do solo. Apesar da palha de milho não cobrir o solo tão eficientemente quanto os do trigo, foram igualmente eficientes em reduzir a erosão. Nas parcelas com cerca de 100% de cobertura, a erosão em entressulcos foi reduzida em 92% em relação ao solo descoberto, o que corrobora este trabalho, pois a redução da erosão em entressulcos com palha de cana-de-açúcar foi de 98%.

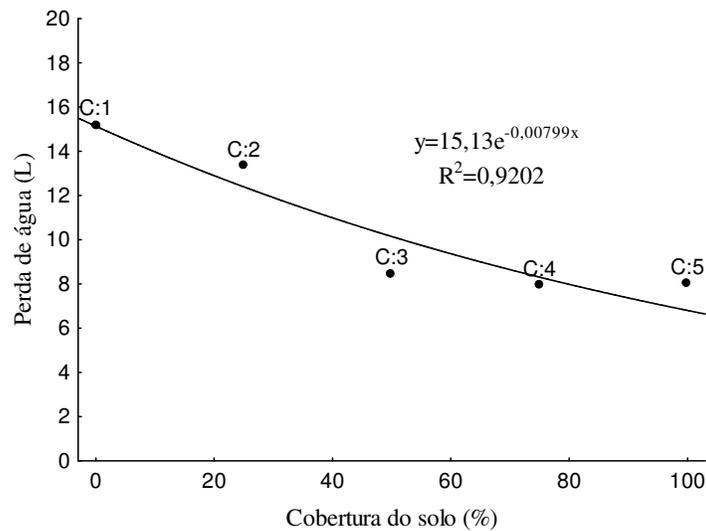


Figura 16. Perda de água total, em função da cobertura do solo por palha de cana-de-açúcar.

O mesmo padrão de comportamento, que o das perdas de solo, ocorreu em relação à perda de água (Tabela 4 e Figura 16), para as parcelas com maiores quantidades de cobertura vegetal na superfície do solo, principalmente igual e superior a 50% de cobertura, pois forças viscosas aumentaram, refletindo na diminuição do número de Froude (Tabela 3). Por outro lado, as perdas de água, em geral, são menos afetadas do que as perdas de solo pelas diferentes quantidades de palha, reduzindo em 47% as perdas quando comparado as parcelas com 100% e sem cobertura, corroborando resultados obtidos por Cogo et al. (1984) e Bertol et al. (1997).

5.2 Perdas de nutrientes

Dentre os nutrientes P e K as maiores concentrações no sedimento erodido foram verificadas para o P, esse resultado possivelmente está relacionado à via preferencial de transporte de K ser pela água de enxurrada (Tabela 5). Esse fato está de acordo com Schick et al. (2000), que conclui que o fato de o elemento fósforo estar adsorvido aos colóides do solo, o maior transporte se dá nas frações de argila e silte implicando em maiores perdas nos sedimentos da enxurrada. Já com relação ao Ca e Mg as maiores concentrações no sedimento foram observadas para o Ca. Além disso, a concentração de nutrientes na água e nos sedimentos, varia com sua concentração no solo (FAVARETTO, 2002) como pode ser observado nas concentrações iniciais de nutrientes da área (Tabela 1).

Tabela 5. Concentração de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no sedimento.

Cobertura	MO	P	K	Ca	Mg
(%)	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³
0	42,750 a	47,500 a	2,550 a	46,650 a	19,125 a
25	22,000 ab	27,750 a	1,350 a	12,450 b	5,235 b
50	17,750 ab	14,750 a	1,375 a	11,693 b	4,832 b
75	11,500 b	22,250 a	1,500 a	11,175 b	4,300 b
100	9,750 b	26,000 a	1,525 a	11,675 b	4,825 b

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

Verificou-se que as maiores perdas de matéria orgânica ocorreram nas parcelas de solo exposto (Tabela 5), pois a fração coloidal e a matéria orgânica são os primeiros constituintes a serem removidos pela erosão hídrica, tendo em vista a sua baixa densidade (SEGANFREDO et al., 1997; SCHICK et al., 2000). Martins Filho et al. (2009) estudando as perdas de solo e nutrientes por erosão num argissolo cultivado com cana-de-açúcar, verificaram maiores perdas de matéria orgânica nas parcelas com solo exposto, sendo que as parcelas que mantiveram quantidade diferenciadas de palha propiciaram significativa redução das perdas de matéria orgânica.

Observa-se que mesmo nas parcelas com 100% de palha da cana-de-açúcar a perda de fósforo foi alta (26 mg dm⁻³), o que pode promover contaminações nos mananciais, porém, não apresentou diferença estatística significativa (Tabelas 5 e 7). Esse valor ultrapassa em três ordens de grandeza a concentração deste nutriente estabelecida por Yoo et al. (1988) de 0,02 mg dm⁻³ que resulta na aceleração do processo de eutrofização em lagos e represas. Segundo Levine e Schindler (1989) o nitrogênio e o fósforo são os nutrientes mais frequentemente associados à eutrofização, sendo o fósforo o fator limitante, visto que muitas algas verdes-azuis são capazes de utilizar o N₂ atmosférico. Dessa maneira, áreas submetidas à intensa adubação fosfatada podem resultar em escoamento laminar, nos quais a concentração de P estaria acima daquele limite crítico, gerando eutrofização. Isto reforça a importância do manejo do solo, proporcionando, racionalização da adubação fosfatada (HERNANI et al., 1999).

As parcelas com 100% de palha apresentaram perdas de K semelhantes a parcelas com 25%, demonstrando que o manejo químico em áreas cultivadas com cana-de-açúcar merece atenção (Tabela 5). Martins Filho et al. (2009) estudando as perdas de solo e nutrientes por erosão num argissolo com

resíduos vegetais de cana-de-açúcar, observaram que o P e o K foram os elementos com maior perda. Outro agravante é a forma de aplicação deste nutriente nas lavouras, pois se os corretivos e fertilizantes forem aplicados em superfície e não incorporados ao solo, principalmente se ocorrerem escoamentos laminares dias após a aplicação daqueles produtos, isso poderá ser um problema crítico para a qualidade das águas superficiais.

A taxa de enriquecimento do sedimento erodido (ER), que é uma relação entre a concentração de matéria orgânica e nutrientes no sedimento erodido e no solo original, para o presente trabalho é apresentada na Tabela 6. Quando a ER é maior que 1, significa que o sedimento se encontra enriquecido por matéria orgânica ou nutrientes do solo (HERNANI et al., 1999; SILVA et al., 2005). Para a maioria das condições, houve enriquecimento do sedimento para todos os tratamentos em relação ao solo original, com exceções de alguns tratamentos para o Ca e Mg. Este resultado concorda com os obtidos por Silva et al. (2005) que ao observar a tendência da taxa de enriquecimento no sedimento para um cambissolo não foi verificado enriquecimento no sedimento, enquanto para o latossolo houve enriquecimento para todos os nutrientes.

Tabela 6. Taxa de enriquecimento do sedimento (ER) por matéria orgânica (MO) e nutrientes.

Cobertura (%)	MO	P	K	Ca	Mg
0	2,208 a	2,197 a	2,214 a	2,535 a	3,678 a
25	1,136 ab	1,283 a	1,172 a	0,676 b	1,024 b
50	0,917 ab	0,682 a	1,194 a	1,060 b	1,560 b
75	0,594 b	1,029 a	1,302 a	0,607 b	0,827 b
100	0,503 b	1,203 a	1,324 a	0,634 b	0,928 b

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade. MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio.

Para o Ca ocorreu enriquecimento nas parcelas descobertas e no caso do Mg para as parcelas com 0% e 50% de cobertura (Tabela 6). Esses resultados podem ser explicados pela alta afinidade entre a fração argila e os nutrientes, propiciando uma erosão com caráter seletivo (TÁVORA et al., 1985). Devido à limitada capacidade de transporte do fino fluxo superficial, durante o processo de erosão em entressulcos, essa remoção seletiva das partículas finas do solo tende a ocorrer (NEARING et al., 2001). A maior ER ocorreu para o Ca e Mg nas parcelas com solo exposto, segundo BERTOL et al.

(2004) esse fato pode ser justificado por serem, o Ca e o Mg, cátions bivalentes poucos sujeitos à lixiviação, por estarem mais fortemente adsorvidos ao solo do que alguns cátions monovalentes.

Portanto, além de acarretar problemas ambientais, os nutrientes de plantas, como P, K, Ca e Mg, quando são perdidos por erosão hídrica, podem significar expressiva perda monetária, na forma de adubos e calcário que são adicionados ao solo (PIMENTEL et al., 1995) e, conseqüentemente aumentando o custo de produção das culturas.

No presente estudo, a perda de fósforo nos sedimentos erodidos decresceu à medida que a quantidade de palha na superfície do solo aumentou, entretanto, o enriquecimento foi grande para todos os tratamentos não apresentando diferença estatística significativa entre eles (Tabela 5), o que corrobora o trabalho de Langdale et al. (1985). Estes autores observaram em sistema de preparo de solo conservacionistas e convencionais, com rotação de culturas, que nestes últimos, a maior parte do P perdido estava adsorvido aos sedimentos da enxurrada. Enquanto que nos preparos conservacionistas, como as perdas de sedimento foram baixas, as perdas totais de P por erosão hídrica foram expressivamente diminuídas, em relação aos métodos de preparo convencionais.

Em áreas submetidas a sistemas de manejo do solo conservacionistas e com adubação fosfatada, ocorrem, em geral, enxurradas com elevadas concentrações de P (DANIEL et al., 1994). Nestes sistemas, nos quais ocorrem menores perdas totais de água e sedimentos por erosão hídrica do que nos preparos não conservacionistas, as perdas totais de P em geral são menores, apesar da maior concentração desse elemento na superfície do solo nos preparos conservacionistas (SCHICK et al., 2000).

A concentração inicial de fósforo no solo da área experimental apresentava um alto valor, o qual pode ser relacionado à uma adubação recente do local (Tabela 1). Tendo em vista essa concentração a perda de fósforo foi significativa, da mesma forma como o experimento realizados por Daniel et al. (1994) e Schick et al. (2000) indicaram que as concentrações de P na camada superficial do solo apresentaram correlação linear e positiva com as concentrações desse elemento nos sedimentos presentes nas águas do escoamento laminar (Tabela 7). Pote et al. (1996) também observaram que doses crescentes de P aplicado no solo correlacionaram-se linear e positivamente com os conseqüentes aumentos nas concentrações do elemento na água da enxurrada, resultando em aumentos das perdas totais desse elemento na erosão hídrica.

Nas lavouras adubadas, especialmente naquelas em que os adubos e o calcário são aplicados em superfície ou próximos a elas, ou naquelas em que estes são semi-incorporados ao solo, como nos

demais preparos conservacionistas, a água e os sedimentos perdidos por erosão hídrica podem apresentar altas concentrações de nutrientes, como constatado em trabalho desenvolvido por Bertol et al. (2007). No Brasil, os solos e as águas superficiais apresentam baixa fertilidade em condições naturais. Em decorrência disso e, considerando que as enxurradas são em geral enriquecidas com nutrientes, como demonstra os dados deste trabalho, a água e os sedimentos da erosão hídrica podem causar grande impacto ambiental nos locais de depósito destes, fora do local de origem da erosão.

Tabela 7. Perda de matéria orgânica e de nutrientes, equivalente em adubos, presentes no material erodido da área de estudo.

Cobertura (%)	MO kg ha ⁻¹	P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	K ₂ O kg ha ⁻¹	CaO kg ha ⁻¹	MgO kg ha ⁻¹
0	391,4150 a	0,001688 a	0,001875 a	0,020392 a	0,00595 a
25	83,4722 b	0,000361 b	0,000701 b	0,000143 b	0,00004 b
50	13,8789 b	0,000061 b	0,000062 b	0,000219 b	0,00006 b
75	2,7105 b	0,000022 b	0,000031 b	0,000120 b	0,00003 b
100	1,8070 b	0,000013 b	0,000017 b	0,000090 b	0,00002 b

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

As concentrações de nutrientes nos sedimentos carregados pelo escoamento superficial mostraram maior evidência para os nutrientes cálcio (Ca) e magnésio (Mg), pois ocorreu diferença significativa, uma vez que os maiores valores de perdas destes nutrientes ocorreram nas parcelas com solo exposto ao comparar com as parcelas cobertas (Tabela 6). A redução da perda com o uso da palhada na superfície do solo entre as duas parcelas, foi de 75% para o Ca. No caso dos demais nutrientes, o fósforo foi o nutriente que apresentou maiores perdas, 47,5 mg dm⁻³ para as parcelas de solo exposto, não apresentando diferença estatística significativa entre os tratamentos. Por fim, o potássio apresentou as menores perdas nos sedimentos e da mesma forma que o fósforo não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos.

Quando são observadas as perdas de matéria orgânica e nutrientes, expressas em kg ha⁻¹, verifica-se que uma quantidade de resíduos igual ou superior a 25% sobre a superfície do solo já foi suficiente para reduzir significativamente as perdas (Tabela 7). Para culturas anuais há relatos de que 30% de cobertura oferecida ao solo é o limite mínimo para controle da erosão (LOPES et al., 1987).

Como o fenômeno da erosão é a mais importante forma de degradação dos solos, com efeitos ambientais, econômicos e produtivos, algumas alternativas de alta rentabilidade e custos reduzidos, práticas que visam reduzir a degradação do solo para manter ou aumentar a sustentabilidade nestas atividades são colocados em evidência. Portanto, a manutenção de cobertura vegetal, com palha de cana-de-açúcar deixados em superfície é eficiente no controle do processo de erosão em entressulcos confirmados neste trabalho bem como em trabalho desenvolvido por Bezerra e Cantalice (2006) e Martins Filho (2007).

6. CONCLUSÃO

1. A perda de solo, água e nutrientes reduziu com o aumento da quantidade de palha na superfície do solo.
2. A taxa desagregação diminuiu e o coeficiente de rugosidade e taxa de infiltração aumentaram com o incremento de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo.
3. Para minimizar a perda de solo, água, nutrientes e matéria orgânica devem ser mantidos no mínimo 50% de cobertura do solo com palha de cana-de-açúcar, tendo em vista essa condição, viabiliza a otimização desse recurso tanto para conservação do solo como para produção de energia limpa em indústrias sucro-alcooleiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.E.; ARKIN, G.F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.1, p.789-792, 1977.
- AGASSI, M.; BRADFORD, J.M. Methodologies for interrill soil erosion studies. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.49, n.4, p.277-287, 1999.
- AMARAL, A.J.; BERTOL, I.; COGO, N.P.; BARBOSA, F.T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do Planalto Sul-Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p. 2145-2155, 2008.
- AMORIM, R.S.S. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrentes de chuvas simuladas**. 75p. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entressulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.1, p.124-130, 2001.
- ANDRADE, M.C. de. O açúcar e a formação da sociedade nordestina. In: INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ALCOOL. **História social da agroindústria canavieira**. Recife, 1974. p.9-20.
- ANDRADE, M.C. de. **Terra do homem no nordeste**. 2.ed. São Paulo: Brasiliense, 1965. 250p.
- ANDRADE, A.G; COSTA, G.S.; FARIA, S.M. Deposição e decomposição da serapilheira em povoamentos de *Mimosa Caesalpinifolia*, *Acacia Mangium* e *Acacia Holosericea* com quatro anos de idade em Planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.4, p.777-785, 2000.
- ANNEE. Atlas de energia elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2002. 153p. < www.aneel.gov.br.>, 25/12/2010.
- BAHIA, V.G.; CURI, N.; CARMO, D.; MARQUES, J.J.G.M.M. Fundamentos de erosão do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n.176, p.25-31, 1992.
- BARROS, L.S.; VALE JUNIOR, J.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MOURÃO JUNIOR, M. Perdas de solo e água em plantio de *Acacia Magnum wild* e savana em Roraima, norte da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.447-454, 2009.
- BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, p.373-379, 1989.
- BERTOL, I. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico distrófico sob diferentes preparos do solo e rotação de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.2, p.267-271, 1994.
- BERTOL, I. **Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo**. 185p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; MIQUELLUTI, D.J. Sedimentos transportados na enxurrada relacionados à cobertura e rugosidade superficial do solo e taxa de descarga. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.3, n.2, p.199-206, 1997.

BERTOL, I.; CIPRANDI, O.; KURTZ, C.; BAPTISTA, A.S. Persistência dos resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.705-712, 1998.

BERTOL, I.B.; MELLO, E.L.; GUADAGNIN, J.C.; ZAPAROLLI, A.L.V.; CARRAFA, M.R. Nutrient losses by water erosion. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.60, n.3, p.581-586, 2003.

BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J.; BARBOSA, F.T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.485-494, 2004.

BERTOL, O.J.; RIZZI, N.E.; BERTOL, I.; ROFOFF, G. Perdas de solo e água e qualidade de escoamento superficial associadas à erosão entre sulcos em áreas cultivadas sob semeadura direta e submetida as adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.781-792, 2007.

BERTOL, I.; ZOLDAN JÚNIOR, W.A.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; PEGORARO, R.; GONZÁLEZ, A.P. Efeito de escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo de um Nitossolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.747-757, 2008.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. p.355.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B.; TARQUI, J.L.Z. Características do escoamento superficial e taxas de erosão em uma área sob cultivo agrícola In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. 5, 2002. **Anais...** São Paulo, p. 403-411, 2002.

BEZERRA, S. A. **Avaliação da erosão em entressulcos na cultura da cana de açúcar**. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2003.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.3, p.565-573, 2006.

BRADFORD, J.M.; FERRIS, J.E.; REMLEY, P.A. Interrill soil erosion processes - I: effect of surface sealing on infiltration, runoff and soil splash detachment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, n.6, p.1566-1571, 1987.

BRADFORD, J.M.; FOSTER, G.R. Interrill soil erosion and slope steepness factors. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.5, p.909-915, 1996.

BRAIDA, J.A. **Relações da erosão entressulcos, com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em solo Podzólico Vermelho-Escuro**. 152f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.699-709, 1999.

BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D.; RUIZ, H.A.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MARTINEZ, M.A.; MENEZES, S.J.M.C. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.13-21, 2006.

BRAY, S.C. **A cultura de cana-de-açúcar no vale do Paranapanema: um estudo de geografia agrária**. 304p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 1980.

CAIRO, N. **O livro da cana-de-açúcar**. 2 ed. Curitiba: Gráfica Paranaense, 1924. 61p.

CALMON, P. O açúcar sua história e influência na civilização brasileira. Rio de Janeiro: I.A.A., 1935. p.7-12 (Anuário Açucareiro)

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, p.94, 1986.

CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 141p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CANTALICE, J.R.B.; BEZERRA, S.A.; OLIVEIRA, O.F.L.; MELO, R.O. Hidráulica e taxas de erosão em entressulcos sob diferentes declividades e doses de cobertura morta. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n.2, p.68-74, 2009.

CARVALHO, M.P.; MANNIGEL, A.R.; MORETI, D. Fator erosividade da chuva para o município de Pedrinhas Paulista, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.1, p.137-145, 2003.

CASSOL, E.A.; LEVIEIN, R.; VAN LIER, Q.J.; BADELUCCHI, M.P. Infiltração de água e perdas de água e solo por erosão influenciadas por diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa gaúcha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.4, p.923-931, 1999.

CASSOL, E.A.; CANTALICE, J.R.B.; REICHERT, J.M. MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, p.685-690, 2004.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema Plantio Direto: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.

M. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5, p.333-370.

CASTRO, L.G.; COGO, N.P.; VOLK, L.B.S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.339-352, 2006.

CHANSON, H. **The hydraulics of open channel flow**. London: Butterworth-Heinemann, 488p. 2004.

CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 680p. 1959.

COCHRANE, T.A.; FLANGAN, D.C. Detachment in a simulated rill. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.40, n.1, p.111-119, 1997.

COCK, J. BRICEÑO, C.O.; TORRES, J. Energy from cane trash in Colombia. **International Cane Energy News**, Bogotá, p.6, 2000.

COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. 346p. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 1981.

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Effect of residue, tillage induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, n.5, p.1005-1008, 1983.

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.2, p.368-373, 1984.

COGO, N.P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R.A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.743-753, 2003.

CONVENÇÃO QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. <<http://unfccc.int/>> 20/08/2010.

CORRÊA, P. M. **Dicionário de plantas úteis do Brasil**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, v.1, Cap.13, 1926. 747p.

COSTA, C. Primeiras canas e primeiros açúcares no Brasil. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.3, p.160-168, 1958.

DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; EDWARDS, D.R.; WEDEPOHL, R.; LEMUNYON, J.L. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.49, n.2, p.30-38, 1994.

DANTAS, B. Contribuição para a história da Gomose da cana de açúcar em Pernambuco e no Brasil. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo Nordeste**, Pernambuco, n.11, p.3-17, 1960.

DE CARLI, G. **Geografia econômica e social da cana-de-açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro: Edição Brasil Açucareiro, 1938. 291p.

DE CARLI, G. **Gênese e evolução da indústria açucareira de São Paulo**. Rio de Janeiro: Irmãos Pongetti, 1943. 180p.

DREGNE, H. E. **Historical perspective of accelerated erosion and effect on world civilization**. In: SCHMIDT, B.L.; ALLMARAS, R.R.; MANNERING, J.V.; PAPENDICK, R.I. (eds.). Determinants of soil loss tolerance. Madison: ASA/SSSA, 1982. 320p.

DE MARIA, I.C.; LOMBARDI NETO, F. Razão de perdas de solo e fator C para sistemas de manejo da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.2, p.263-270, 1997.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS, (DIEESE) Movimento sindical Brasileiro. <{ <http://www.dieese.org.br/home.xml#>}>, 25/07/2009.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193p. (FAO: Irrigation and drainage, n.33)

DRUMOND, M. A. **Alterações Fitossociológicas e Edáficas Decorrentes de Modificações da Cobertura Vegetal na Mata Atlântica, Região do Médio Rio Doce, MG**. 73 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

ELLISON, W.D. Soil detachment and transportation. **Soil Conservation**, Washington, v.11, n.8, p.179-190, 1946.

ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KHOL, K.D. **A compendium of erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987/88**. Ohio: Ohio State University. USDA Agricultural Research Service, 1989. p.2-25. (NSERL. Report., 3).

ELTZ, F.L.F.; CASSOL, E.A.; SCOPEL, I.; GUERRA, M. Perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais em solo laterítico Bruno Avermelhado distrófico (São Jerônimo) sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, n.1, p.117-125, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 212p. 1997.

EVANS, J.; LIEPMANN, D.; PISANO, A.P. Planar laminar mixer. In: ANNUAL INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICROELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, 10., 1997, Nagoya. **Proceedings...**Nagoya: IEEE, 1997. p.96-101

FARENHORST, A.; BRYAN, R.B. Particle size distribution of sediment transported by shallow. **Catena**, Amsterdam, v.25, n.1, p.47-62, 1995.

FATTAH, H.A.; UPADHYAYA, S.K. Effect of soil crust and soil compaction on infiltration in Yolo loam soil. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.39, n.1, p.79-84, 1996.

FAVARETTO, N. **Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium related to water quality and plant nutrition**. West Lafayette: Purdue University, 150p. 2002.

FIGUEIREDO, P., LANDELL, L.G.A.; CAMPANA, M.P. 1995. **Cana-de-açúcar**. 6.ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas. 360p.

FOSTER, G.R. **Modeling the erosion process**. In: BASSELMAN, J.A. Hydrological modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineering, p.297-300. 1982.

FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B.; MOLDENHAUER, W.C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.25, p.940-947, 1982.

FREITAS, F.J.; CANTALICE, J.R.B.; BEZERRA, S.A.; SILVA, M.D.R.O.; SANTOS, P.M.; CORREA, R.M.; FIGUEIRA, S.B. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1743-1751, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. (FAO) D: <<https://www.fao.org.br/listaproj.asp>>, 20/08/2010.

FURLANI NETO, V.L. Sulcos alternados duplos (SAD) e simples controle de tráfego na colheita de cana picada. São Paulo: **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.13. n.4, p.14-16, 1995.

CERDAN, O.; SOUCHE'RE, V.; LECOMTE, V.; COUTURIER, A.; LE BISSONNAIS, Y. Incorporating soil surface crusting processes in an expert based runoff and erosion model: sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. **Catena**, Amsterdam, v.46, p.189-205, 2002.

GILLEY, J.E.; DORAN, J.W. Soil erosion potential former conservation reserve program sites. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.41, n.1, p.97-103, 1998.

GOFF, B.F.; BENT, G.C.; HART, G.E. Influence of rainfall intensity on the interrill erodibility of two rangeland soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.37, n.5, p.1445-1448, 1994.

GONÇALVES, D.B. **A regulamentação das queimadas e as mudanças nos canaviais paulistas**. 111p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

GONÇALVES, J.L. de M. Principais solos usados para plantações florestais. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF.** Cap.1, p.1-45, Piracicaba, 2002.

GRANT, G.E. Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. **Water Resources Research**, Washington, v.33, n.2, p.349-358, 1997.

GUADAGNIN, J.C. **Perdas de nutrientes e carbono orgânico pela erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico aluminico léptico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo.** 142p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2003.

HERNANI, L.C.; SALTON, J.C.; FABRÍCIO, A.C. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.4, p.667-676, 1997.

HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão, **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.23, n.1, p.145-154, 1999.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; DE MARIA, I.C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J.C. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. (eds.). **Uso agrícola dos solos Brasileiros.** Rio de Janeiro: Embrapa. 2002. p.47-60.

HUANG, Y.S.; CHEN, S.S.; LIN, T.P. Continuous monitoring of water loading of trees and canopy rainfall interception using the strain gauge method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.311, n.1, p.1-7, 2005.

HUDSON, N.W. **Soil conservation.** 3.ed. Ames: Iowa State University Press, 391p, 1995.
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. 2006.< <http://www.ibge.gov.br> >, 20/01/2010.

INÁCIO, E.S.B.; CANTALICE, J.R.B.; NACIF, P.G.S.; ARAUJO, Q.R.; BARRETO, A.C. Quantificação da erosão em pastagem com diferentes declives na microbacia do Ribeirão Salomea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.4, p.355-360, 2007.

IPCC - Intergovernmental Panel Climate Change. 2001. Working Group II: Impacts, Adaptations and Vulnerability. <<http://www.ipcc.ch>>. 15/08/2009.

IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M.V.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.660-670, 2005.

JORGE, L.A.B. Soil erosion fragility assessment using na impact model and geographic information system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.66, n.5, p.658-666, 2009.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation.** Cambridge: Cambridge University Press, 280p. 1998.

- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, p.499-510, 1965.
- KING, K.W.; RICHARDSON, C.W.; WILLIAMS, J.R. Simulation of sediment and nitrate loss on a Vertissol with conservation practices. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.6, n.6, p.2139- 2145, 1996.
- KINNELL, P.I.A.; CUMMINGS, D. Soil slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.36, n.2, p.381-387, 1993.
- KITAHARA, H. ZHANG, H. ENDO, T. Hydraulic experiments on erosion control function of forest in Huangtu Plateau, China. **Journal of Japan Forest Research Society**, Tokyo, v.104, p.747-750, 1993.
- LAFLEN, J.M.; FOSTER, G.R.; ONSTAD; C. Simulation of individual storm soil losses for modeling the impact of soil erosion on cropland productivity. In: EL-SWAFY, MULDENHAUER AND LO (Ed.). **Soil erosion and conservation**. Ankeny: SCSA, p.285-295, 1985.
- LANGDALE, G.W.; LEONARD, R.A.; THOMAS, A.W. Conservation practice effects on phosphorus losses from Southern Piedmont watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.40, p.157-160, 1985.
- LEVINE, S.L.; SCHINDLER, D.W. Phosphorus, nitrogen and carbon dynamics of Experimental Lake 303 during recovering from eutrophication. **Canadian Journal Fisheries and Aquatic Science**, Toronto, v.46, n.1, p.2-10, 1989.
- LEYS, A.; GOVERS, G.; GILLIJS, K.; POESEN, J. Conservation tillage on loamy soils: explaining the variability in interrill runoff and erosion reduction. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.58, p.1425-1436, 2007.
- LIEBENOW, A.M.; ELLIOT, W.J.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.33, n.6, p.1882-1888, 1990.
- LOPES, P.R.C.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Eficácia relativa de tipo e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.71-75, 1987.
- LOPES, F. S.; RIBEIRO, H. Mapeamento de internações hospitalares por problemas respiratórios e possíveis associações à exposição humana aos produtos da queima de palha de canade- açúcar (*Saccharum sp*) no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, São Paulo, v.9, n.2, p.215-225, 2006.
- LOWE, S.A. Omission of critical Reynolds number for open channel flows in many textbooks. **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice**, Reston, v.129, n.1, p.58-59, 2003.

LUCCHESI, A. A. Processos fisiológicos da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Boletim Técnico**. ESALQ/CENA, n.7, p.1-50, 1995.

LUCIANO, R.V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F.T.; VÁZQUEZ, E.V.; FABIAN, E.L. Perdas de água e solo por erosão hídrica em duas direções de semeadura de aveia e ervilhaca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.3, p.669-676, 2009.

MAGALHÃES, B. **O açúcar nos primórdios do Brasil colonial**. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1953. p.204.

MAGALHÃES, A. C. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono da planta**. In: Ecofisiologia da produção. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa do Potássio e do Fósforo, 1987. 230p.

MARTINS FILHO, M.V. **Modelagem do processo de erosão entressulcos em latossolos de Jaboticabal-SP**. 140f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

MARTINS FILHO, M.V.; ENGLER, M.P.C.; IZIDORIO, R.; COTRIN, F.B.; SERRA, E.A.; AMARAL, N.S.; SOUZA, Z.M. Modelos para a estimativa do subfator cobertura-manejo (C_{III}) relativo à erosão entressulcos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.603-611, 2004.

MARTINS FILHO, M.V. **Modelagem do processo de erosão e padrão espacial da erodibilidade em entressulcos**. 121f. Tese (Livre-Docente na disciplina de Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

MARTINS FILHO, M.V.; LICCIOTI, T.T.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JUNIOR, J.; SANCHEZ, R.B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.8-18, 2009.

MELONI, R. **Ciência e produção agrícola: a Imperial Estação Agronômica de Campinas -1887/1897**. São Paulo: FFLCH/USP, 2004. p.165.

MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; RÔMKENS, M.J.M. **Source of soil eroded by water from upland slopes**. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington, USDA-Agricultural Research, p.177-189, 1975.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). 2007. Governo Brasileiro. <<http://www.agricultura.gov.br>>. 20/10/2009.

MIRANDA, L.L.D.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 882 p. 2008.

MOORE, D.C., SINGER, M.J. Crust formation effects on soil erosion processes. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.54, p.1117-1123, 1990.

MUTCHLER, C.K.; YOUNG, R.A. Soil detachment by raindrops. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Washington: USDA-Agricultural Research, p.118-124, 1975.

NEARING, A.M. Potential changes in rainfall erosivity in the US with climate change during the 21st century. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.56, n.3, p.29-232, 2001.

NUNES, M.C.M.; CASSOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.7, p.2839-2845, 2008.

PAN, C.; SHANGGUAN, Z. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.331, p.178-185, 2006.

PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T.A.; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F.; URCHEI, M.A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.261-268, 2006.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRIT, Z.L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, Baltimore, v.267, n.5201, p.1117-1124, 1995.

PRIMAVESI, A.C.; PRIMAVESI, O. Transformação de unidades de representação de resultados de análise de solo. EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE. **Circular Técnica**, 28. 22p.

PRUSKI, F.F. Conservação de água e solos. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: UFV/DEA, 1996. 88p. **Curso de Gestão de Recursos Hídricos para o Desenvolvimento Sustentados de Projetos Hidroagrícolas** (Módulo, 7).

POTE, D.H.; DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.M. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v.60, p.855-859, 1996.

PUGLIESI, A.C.V. **Valoração econômica pelo método custo de reposição do efeito da erosão em sistemas de produção agrícola**. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

RAMOS, P. Situação atual, problemas e perspectivas da agroindústria canavieira de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.29, n.10, p.9-24, 1999.

RAIJ, van B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 285p. 2001.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, São Paulo, n.44, p.125-148, 2002.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v.42, n.2, p.370-376, 2008.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA JUNIOR, W.F. Cultura canvieira: um desperdício energético. **Maquinaria Agrícola**, São Paulo, v.6, n.1, p.2-3, 1991.

ROTH, C.H., HELMING, K. Dynamics of surface sealing, runoff formation and interrill soil loss as related to rainfall intensity, microrelief and slope. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Akademischer Austauschdienst, v.155, p.209-216, 1992.

ROQUE, C.Q.; CARVALHO, M.P.; PRADO, R.M. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.147-156, 2001.

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.

SALGADO, P.A. Variedades de cana-de-açúcar em Pernambuco. **Jornal do Agricultor**, Rio de Janeiro, p.201-206, 1887.

SÃO PAULO. **Assembléia Legislativa**. Lei nº 10.547, de 2 de maio de 2000. Diário Oficial, v.110, n.83, 03 de maio de 2000. Seção I: Poder Legislativo.

SCHAFER, M.J.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F.; REINERT, D.J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.419-430, 2001.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.427-436, 2000.

SEGANFREDO, M. L.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p 287-291, 1997.

SILVA, C.G.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T; CARVALHO, D.F. Atributos Físicos, químicos e erosão entressulcos sob chuva simulada, em sistemas de plantio direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.144-153, 2005.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.111-117, 1997.

SILVA, R.L. **Erosão do solo em sistema plantio direto: influência do comprimento de rampa e da direção da semeadura**. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2010.

STATSOFT. **Statistical: quick reference**. Tulsa: Statsoft, 148 p., 1994.

STRECK, E.V.; COGO, N.P. Reconsolidation of the soil surface after tillage discontinuity, with and without cultivation, related to erosion, and its prediction with RUSLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.1, p.141-151, 2003.

SZMRECSÁNYI, T. Tecnologia e degradação ambiental: O caso da agroindústria canavieira no estado de São Paulo. **Informe Econômico**, São Paulo, v.24, n.10, p.73-78, 1994.

SWANSON, N.P. Rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v.8, n.1, p.71-72, 1965.

TÁVORA, M.R.P.; SILVA, J.C.R.; HERNANDEZ, F.F.F.; SAUNDERS, L.C.U.; MOREIRA, E.G.S. Perdas de solo, água e nutrientes em Latosso Vermelho-Amarelo Distrófico de Ubajara (CE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.4, p.63-66, 1985.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DEAÇÚCAR. **Setor Sucroenergético – Mapa de Produção**. São Paulo, 2009. <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={D6C39D36-69BA-458D-A95C-815C87E4404D}>>, 23/06/2009.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: The Chronica Botanica. 371p., 1952.

VANONI, V.A. **Sedimentation engineering**. New York: The American Society of Civil Engineers, 745 p., 1975.

VOLK, L.B.S.; COGO, N.P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1459-1471, 2009.

VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V.; REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.1, p.121-128, 1993.

WALTON, R.S.; VOLKER, R.E.; BRISTOW, K.L.; SMETTEM, K.R.J. Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.233, n.1, p.19-36, 2000.

WISCHMEIER, W.H. Estimating the soil loss equations cover and management factor for undisturbed areas. In: **SEDIMENT YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Washington: USDA, 1975. p.118-24. (ARS-S-40)

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall – erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 58p. 1978. (USDA. Agriculture Handbook, 537).

ZANCUL, A. **O efeito da queimada de canade- açúcar na qualidade do ar na região de Araraquara-SP.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 1998.

ZHANG, X.C.; NEARING, M.A.; MILLER, W.P.; NORTON, L.D.; WEST, L.T. Modeling interrill sediment delivery. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.62, n.2, p.438-444, 1998.

ZOLDAN JUNIOR, W.A.; BERTOL, I.; PEGORARO, R.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; VÁZQUEZ, E.V. Rugosidade superficial do solo formada por escarificação e influenciada pela erosividade da chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.353-362, 2008.

YOO, K.H.; TOUCHTON, J.T.; WALKER, R.H. Runoff, sediment and nutrient losses from various tillage systems of Cotton. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.12, p.13-24, 1988.

YOUNG, R.A.; WIERSMA, J.L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. **Water Resources Research**, Washington, v.9, n.6, p.1629-1636, 1973.