

ANÁLISE DO POTENCIAL DE ERODIBILIDADE DE UM SOLO DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ

ASSESSMENT OF POTENTIAL OF THE ERODIBILITY
OF A SOIL IN JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ STATE

MARIA DOS ANJOS DE SOUSA MARQUES SOBRINHA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, mariadosanjoss19@gmail.com)

ANA PATRÍCIA NUNES BANDEIRA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, ana.bandeira@ufca.edu.br)

JOÃO BARBOSA DE SOUZA NETO

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, joao.barbosa@ufca.edu.br)

SÁVILLA VIEIRA COSTA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, savillacosta@gmail.com)

MATEUS EVANGELISTA DA SILVA

(Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, mateus905@hotmail.com)

RESUMO ABSTRACT

O crescimento populacional das áreas urbanas tem provocado modificações ambientais decorrentes da ocupação desordenada, causando vários problemas, como os processos erosivos. No município de Juazeiro do Norte, sul do Ceará, o Parque Natural Municipal das Timbaúbas, apesar de ser Unidade de Conservação de Proteção Integral, com maior área verde do município, apresenta diversas erosões hídricas em forma de sulcos e ravinas. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo da erodibilidade do solo do Parque Natural Municipal das Timbaúbas, realizado por meio de ensaios básicos de caracterização do solo, ensaios de Inderbitzen e ensaios de sucção, realizados em amostras deformadas e indeformadas de solos. Resultados dos ensaios mostraram tratar-se de um solo arenoso silto-so (SM). Por meio do ensaio de Inderbitzen, obteve-se uma taxa de erodibilidade (K) superior a 0,1 g/cm²/min/Pa, classificando o solo com alta suscetibilidade a erosão. Através de ensaios de sucção pelo Método do Papel Filtro, verificou-se que para um teor de umidade

Urban population growth has caused environmental changes resulting from the disordered occupation and has led to several problems such as soil erosion. The Timbaúbas Municipal Nature Reserve, located in the municipality of Juazeiro do Norte, in the southern mesoregion of Ceará, has been presenting several intense erosive outbreaks despite it being classified as a conservation unit and defined as an Integral Protection Area (API), with the largest green area of the municipality, has linear erosion in the form of furrows and ravines. In this context, the present paper studies soil erodibility of The Timbaúbas Municipal Nature Reserve conducted through of the basic physical characterization tests, Inderbitzen tests and suction tests, made in deformed and undisturbed samples. Test results show that it is silty sand (SM) soil. An erodibility rate (K) of greater than 0.1 g/cm²/min/Pa was obtained using the Inderbitzen test, thus classifying the soil as highly susceptible to erosion. Suction tests using Filter Paper Method revealed that

de 0,85% a sucção foi de 944 kPa, enquanto para uma umidade de 8,7% a sucção foi de 13 kPa. Para variação de sucção entre 100 kPa e 10 kPa foi necessário grandes variações de umidade, ou seja, durante o período chuvoso espera-se maiores alterações das características do solo, resultando em uma maior infiltração e menor escoamento superficial, reduzindo a perda de massa por processos erosivos com a continuidade das chuvas. Por meio dos resultados obtidos conclui-se que o solo do Parque das Timbaúbas tem elevada suscetibilidade à erosão, sendo necessárias medidas estruturais para controlar e recuperar essa área antes das ocorrências das primeiras precipitações do período chuvoso.

Palavras-chave: Erosão, Ensaios de Laboratório, Inderbitzen, Papel Filtro, Sucção.

for 0.85% moisture content the suction was 944 kPa whereas for 8.7% humidity the suction was 13 kPa. For suction variation between 100 kPa and 10 kPa, large humidity variations were required. In other words, greater changes in soil characteristics are expected during the rainy season, resulting in greater infiltration and lower surface flow, leading to reduced mass loss caused by the continuous rain erosion. Results show that The Timbaúbas's Reserve soil is highly prone to erosion, requiring structural measures to control and recover its area ahead of the first precipitations during the rainy season.

Keywords: Erosion, Laboratory Tests, Inderbitzen, Filter Paper, Suction.

1 INTRODUÇÃO

Nas grandes cidades brasileiras o crescimento populacional tem provocado diversas modificações ambientais, ocasionadas principalmente pela ocupação desordenada, devido à falta de um planejamento urbano adequado. Consequentemente, isso favorece a ocorrência de diversos problemas ambientais, estando entre eles os processos erosivos.

Na zona urbana da Região do Cariri, interior do Ceará, as chuvas concentradas ocasionam arrasto de materiais livres da superfície, em decorrência do aumento do escoamento superficial devido ao uso e ocupação inadequados do solo, causando erosões hídricas em diversas áreas da região. Isso é o que vem ocorrendo no Parque Natural Municipal das Timbaúbas, localizado no

município de Juazeiro do Norte, que, apesar de ser instituído como Unidade de Conservação de Proteção Integral, apresenta diversos processos erosivos hídricos em forma de sulcos e ravinas.

Por meio do conhecimento dos danos e prejuízos que os efeitos da erosão ocasionam, afirma-se a necessidade do aprofundamento no estudo das causas e efeitos, para recuperação de áreas já afetadas por esse processo, assim como a busca por medidas para amenizar os seus efeitos danosos. Diante do exposto, este trabalho apresenta resultados de um estudo da erodibilidade do solo do Parque Natural Municipal das Timbaúbas, a fim de compreender o mecanismo das erosões que vem ocorrendo no local. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, a localização da área de estudo e um detalhe do processo erosivo existente na área.

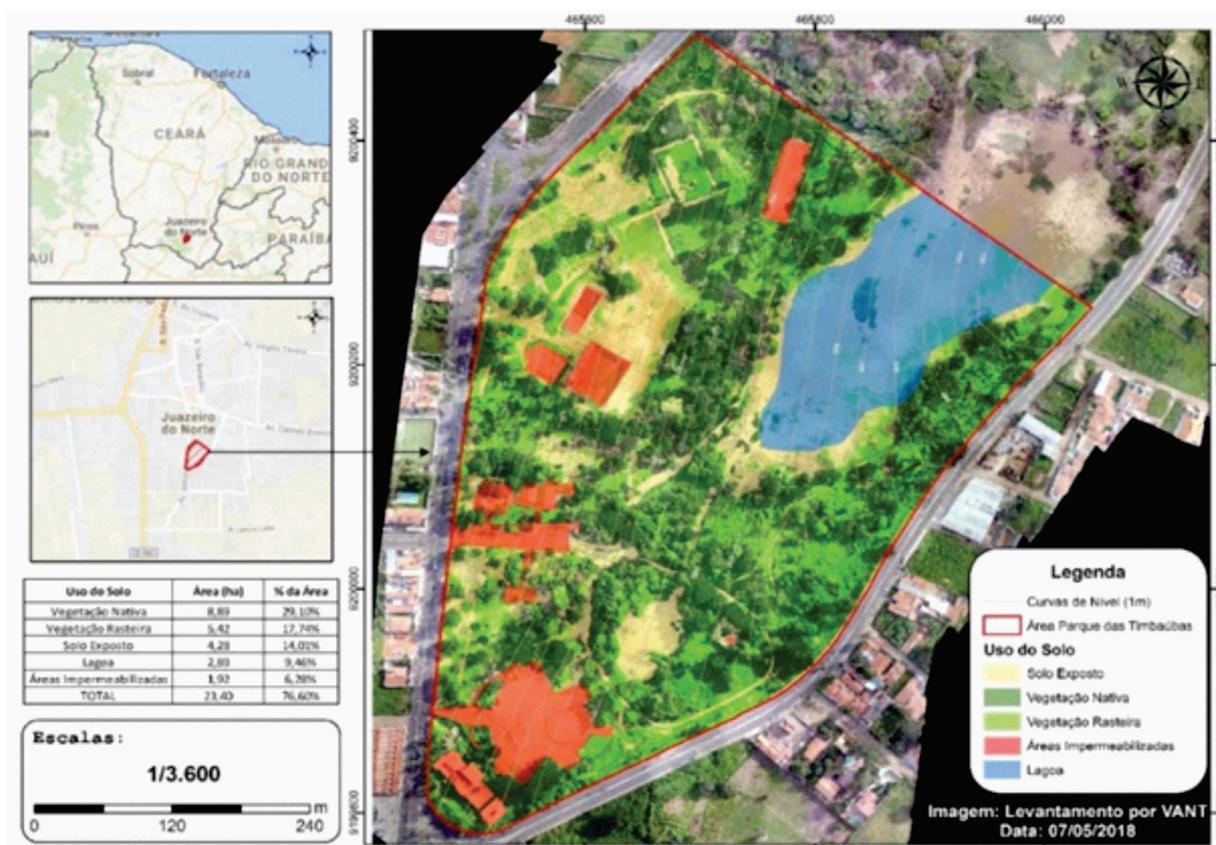


Figura 1. Localização do Parque Natural Municipal das Timbaúbas em Juazeiro do Norte, Ceará.

Fonte: Macedo (2019)



Figura 2. Erosão no Parque Natural Municipal das Timbaúbas.

Fonte: Macedo *et al* (2019)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos de erosão

Bastos (1999) define erosão como sendo um conjunto de processos que são responsáveis pela desagregação, transporte e deposição de materiais através de agentes erosivos, tais como a água, vento e gelo. Quando o agente erosivo é a água, o processo erosivo é denominado de erosão hídrica. A erosão hídrica, por sua vez, pode ser classificada quanto à forma, pode ser laminar ou linear. A erosão laminar ocorre em área maior, conhecida também como erosão em lençol; enquanto a erosão linear é mais concentrada, formando sulcos, ravinas e voçorocas (Demarchi *et al.*, 2019).

A erosão caracterizada como sulco é um processo que ocorre em campos inclinados, onde os canais se formam com alguns centímetros de profundidade. Já o ravinamento corresponde ao canal de escoamento pluvial concentrado, podendo atingir até alguns metros de profundidade. Araujo *et al.* (2010) diz que os ravinamentos são canais visíveis e bem definidos, onde ocorre a remoção de solo pela ação da água e há concentração do fluxo sobre o solo, enquanto Magalhães (2001) admite que a voçoroca é a passagem do processo de ravinamento até atingir o lençol freático, tendo contribuições das águas superficiais e de subsuperfície no processo.

Para Camapum de Carvalho *et al.* (2006), a erosão é um fenômeno natural que promove a alteração do relevo, ou seja, trata-se de um agente de formação do relevo. Para Jorge e Guerra (2013), embora as erosões sejam consideradas fenômenos naturais, elas passam a ser um problema para os recursos ambientais quando as taxas de perda de solo ultrapassam os níveis naturais. Normalmente relacionada ao uso e ocupação inadequados do solo, vindo causar diversos danos ambientais.

2.2 Fatores condicionantes

A erosão ocorre devido a diversos fatores, tais como: clima, relevo, cobertura vegetal, ação antrópica e natureza do solo (Bertoni e Lombardi Neto, 1985 e Guerra e Mendonça, 2004). As características desses fatores agindo de forma associada podem acelerar os processos erosivos.

Quanto ao clima, Fendrich *et al.* (1991) afirmam que regiões de climas úmidos, tropical quente e temperado, com inverno seco e verão chuvoso apresentam uma maior propensão à erosão hídrica, que podem ocorrer em forma de sulcos, ravinas e voçorocas. Ainda no fator climático, o aspecto que apresenta uma maior influência no processo da erosão é a precipitação, que atua promovendo o desprendimento das partículas de solo, tanto pelo impacto das gotas de chuva (splash ou salpicamento) quanto pela formação do escoamento superficial (Couto, 2015). Para Guerra e Mendonça (2004) a intensidade, duração, frequência, particularidades das gotas de chuva e a energia cinética da chuva natural são importantes características que influenciam na intensidade das erosões hídricas pluviais.

Quanto ao relevo, esta característica é de grande influência no processo de erosão do solo, visto que intervém na velocidade do escoamento superficial a partir da declividade e o comprimento da rampa. Os terrenos que apresentam maior capacidade erosiva são terrenos mais acidentados, devido a maior facilidade de escoamento superficial; porém um terreno de baixa declividade poderá apresentar elevada intensidade erosiva (Infanti Júnior e Fornasari Filho, 1998), caso as propriedades da superfície conduzam a um grande escoamento superficial, como a impermeabilização e compactação de áreas e o efeito da sucção do solo.

No caso cobertura vegetal, Mannering e Meyer (1963) afirmam que a vegetação na superfície do solo impede o impacto direto das gotas de chuva e dissipa a sua energia, diminuindo a desagregação das partículas, tratando-se de uma defesa natural do solo contra o processo de erosão, conforme corrobora Pellegrini (2006). Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), a cobertura vegetal provoca efeitos tais como: barreira física de proteção do solo, impedindo que as gotas de chuva atinjam o solo diretamente; dispersão da água através da interceptação e evaporação antes que atinja o solo; formação de canais no solo, a partir das raízes, aumentando a infiltração da água; diminuição da velocidade de escoamento devido ao aumento do atrito na superfície. Os autores ainda afirmam que a retirada dessa cobertura vegetal poderá contribuir diretamente para que o

processo erosivo ocorra, devido à alteração da velocidade de escoamento superficial da água. Para García-Ruiz (2010), a preservação da vegetação auxilia efetivamente na redução do escoamento superficial e conseqüentemente no transporte de sedimentos.

No que se refere ao fator antrópico, este é um dos principais fatores que contribui para o agravamento da intensidade dos processos de erosão, devido ao uso e ocupação inadequados do solo. Mota (1991) destaca algumas ações antrópicas inadequadas, sendo elas: desmatamento da mata ciliar, de terrenos de encostas; agricultura, através do cultivo impróprio de culturas; agropecuária; movimentos de terra de maneira inadequada; modificação do escoamento natural das águas, por meio de cortes e aterros; impermeabilização do solo com as pavimentações e execução de obras para ocupação sem coleta e destinação correta das águas pluviais.

Outro fator que interfere nas erosões trata-se da natureza do solo, que está diretamente ligada ao fenômeno de erodibilidade, consistindo no conjunto de características intrínsecas ao solo que determinam a suscetibilidade a erosão. Couto (2015) define a erodibilidade como sendo a maior ou menor facilidade com que o solo tende a sofrer erosão. As propriedades físicas, químicas e biológicas interferem nos processos de erosão, que ocorrem de forma diferenciada para os vários tipos de solos, visto que cada um possui um diferente processo de formação. Dentre as propriedades físicas que estão relacionadas ao processo, Bertoni e Lombardi (2005), enfatiza a estrutura, textura, permeabilidade e densidade. Llopis Trillo (1999) afirma que a estrutura está relacionada ao arranjo das partículas de solo, sendo um fator que condiciona propriedades como permeabilidade, densidade e sucção. O mesmo autor traz uma classificação para o potencial de erosão em função da textura do solo, sendo mais erodíveis os solos não coesivos, pela facilidade do desprendimento das partículas.

2.3 Métodos de avaliação e estimativa da erodibilidade

Os métodos de avaliação e estimativa do potencial de erodibilidade do solo estão associados a

ensaios de laboratório e de campo. No laboratório destacam-se os ensaios de caracterização do solo, Crumb Test, Slaking Test, resistência ao cisalhamento, sucção e Inderbtizen. Para Jacintho *et al* (2006), a propriedade física mais relevantes em relação à erosão consiste na distribuição dos poros, visto que parâmetros importantes para a compreensão do processo erosivo tais como sucção, coesão e permeabilidade, podem ser alterados devido a presença de macroporos interconectados. No campo ensaios de simulações de escoamentos, em parcelas erosivas, têm sido realizados por diversos pesquisadores. No presente trabalho será apresentado resultados de ensaios básicos de caracterização do solo, ensaios de sucção e ensaios de Inderbtizen, estando o referencial teórico limitado a esses ensaios.

2.3.1 Estimativa da potencialidade à erosão por meio de ensaios básicos de caracterização

Os ensaios de caracterização básica do solo são de fundamental importância, sendo comumente os primeiros ensaios a serem realizados em laboratório, com o intuito de classificar o solo e conhecer suas propriedades básicas, que influenciam na suscetibilidade do solo à erosão. Nesse grupo de ensaios enquadram-se: a análise granulométrica, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Densidade real dos grãos. Por meio dos resultados obtidos nesses ensaios é possível classificar o solo pelo Sistema de Classificação Unificado dos Solos (SUCS) e estimar a potencialidade aos processos erosivos, segundo proposto por Llopis Trillo (1999).

Llopis Trillo (1999) relaciona a classificação do solo com a sua erodibilidade, sendo considerado mais erodíveis os solos com textura predominante de areia e silte, em que a baixa parcela de coesão, em comparação aos solos argilosos, e a massa menos pesada, em comparação aos pedregulhos, facilitam o processo de desagregação e transporte dos sedimentos. Neste contexto, solos classificados como ML (silte de baixa compressibilidade), MH (silte de alta compressibilidade), SM (areia siltosa) e SC (areia argilosa) são os mais erodíveis.

2.3.2 ENSAIO DE INDERBITZEN

O ensaio de Inderbitzen tem por finalidade avaliar a erodibilidade do solo por meio da simulação do efeito do escoamento superficial sobre o solo, submetendo uma amostra a condições que influenciam no processo erosivo, tais como vazão, inclinação da rampa e duração do escoamento. Diversos autores apresentam resultados de pesquisas sobre erodibilidade dos solos, em áreas rurais e urbanas, com a utilização deste ensaio, tais como os trabalhos de Fácio (1991), Bastos (1999), Lafayette (2006) e Meira (2008).

O ensaio de Inderbitzen foi desenvolvido em 1961 por Anton L. Inderbitzen através do estudo da erosão superficial do solo em sua publicação *An erosion test for soils*. O ensaio é utilizado para avaliar o índice de erodibilidade dos solos a partir de um canal hidráulico artificial. O precursor na utilização deste ensaio no Brasil foi Rego (1978), aplicando-o no estudo de erosões superficiais de taludes em solos residuais de gnaiss, no estado do Rio de Janeiro.

O ensaio de Inderbitzen é realizado através da utilização de uma rampa hidráulica com uma amostra de solo posicionada na parte inferior, onde será atingida uniformemente por uma lâmina d'água, simulando um escoamento e causando a erosão superficial do solo por um determinado tempo. Gomes (2006) ressalta que tal ensaio não leva em consideração a influência do impacto das gotas da chuva sobre o solo, responsável por desagregar partículas do solo. Portanto, o experimento consiste em uma aproximação da quantidade de sedimentos no escoamento superficial. A Figura (3) mostra um modelo de uma rampa hidráulica utilizada para a realização do ensaio.

Os resultados desse ensaio permitem construir um gráfico Tensão Cisalhante Hidráulica (τ_h) versus Perda de Solo (por idade de área e tempo de ensaio), sendo a Tensão Cisalhante Hidráulica dada pela equação (1).

$$\tau_h = \gamma_w \times h \times d \quad (1)$$

Onde:

γ_w é o peso específico da água em kN/m^3 ;

h é altura da lâmina de fluxo em metros;

d é a declividade da rampa em graus.

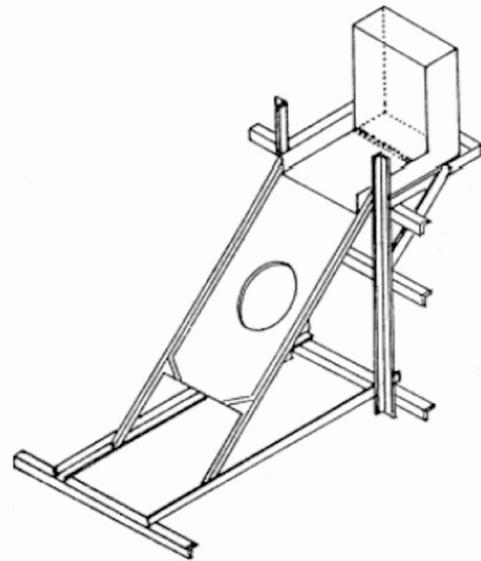


Figura 3. Rampa Hidráulica Utilizada no Ensaio de Inderbitzen.

Fonte: Fonseca e Ferreira (1981)

A partir do gráfico Tensão Cisalhante Hidráulica (τ_h) versus Perda de Solo determina-se a taxa de erodibilidade (K), que corresponde ao valor do coeficiente angular da equação da reta que melhor ajuste os pontos. Bastos (1999) classifica o potencial de erodibilidade dos solos em três classes distintas, em função da taxa de erodibilidade (K), conforme apresentada na tabela (1).

Tabela 1. Taxa de erodibilidade e classificação dos solos segundo Bastos (1999)

Taxa de erodibilidade (K) ($\text{g/cm}^2/\text{min/Pa}$)	Classificação
$K < 0,001$	baixa erodibilidade
$0,001 \leq K \leq 0,1$	mediana erodibilidade
$K > 0,1$	alta erodibilidade

2.3.3 Ensaio de sucção pelo método do papel filtro

Nos solos não saturados, quando o solo se encontra com baixo teor de umidade natural, o parâmetro de sucção intra-agregado (pressão neutra negativa) dificulta o processo de infiltração da água aumentando, conseqüentemente, o escoamento superficial e a perda de massa do solo (Bastos, 1999). Basicamente, a sucção dos solos é uma quantidade energética para avaliar a sua

capacidade de reter água. Quando a água livre migra dentro de um solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água adsorvida, uma energia externa precisa ser aplicada. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água para desprendê-la, é chamada de sucção (Lee e Wray, 1995).

Uma das técnicas utilizadas para avaliar a sucção dos solos trata-se da técnica do Papel Filtro, sendo um ensaio bastante simples e econômico, utilizado para determinar as sucções correspondentes às diferentes condições de umidade impostas (Marinho *et al*, 2015). O ensaio tem o objetivo de representar o comportamento da sucção matricial do solo, em que, a partir da amostra indeformada, molda-se um corpo de prova e coloca-o em contato com papel filtro específico

até que a umidade entre eles se estabilize. Bastos (1999), Souza Neto (2004) e Lafayette (2006) apresentam resultados de ensaios de sucção através desta técnica.

Marinho *et al* (2015) afirma que a sucção total é medida sem o contato direto entre o solo e o papel, onde o fluxo se dá por forças osmóticas. Quando ocorre o contato entre ambos, têm-se a sucção matricial, onde o fluxo ocorre por capilaridade. Para a sucção matricial, com o papel filtro em contato direto com o solo, exige-se um tempo de equilíbrio de sete dias, conforme Araújo e Campos (2013).

Para determinação da sucção podem ser utilizadas as equações (2) e (3), conforme os valores dos teores de umidade, segundo recomenda Chandler *et al* (1992).

$$\text{Para } w_{\text{papel}} \leq 47\%: \text{Sucção (kPa)} = 10^{4,84-0,0622 w (\%)} \tag{2}$$

$$\text{Para } w_{\text{papel}} > 47\%: \text{Sucção (kPa)} = 10^{6,05-2,48 w (\%)} \tag{3}$$

A partir dos valores da sucção e da umidade do papel, constrói-se a curva característica do solo de Umidade Volumétrica versus Sucção. A umidade volumétrica consiste no teor de umidade que relaciona o peso da água com o peso seco do solo, sendo calculada a partir do índice de vazios e grau de saturação do solo, conforme a equação (4). O ajuste da curva pode ser realizado utilizando a equação (5), proposta por Van Genuchten (1980), através do método dos mínimos quadrados por processos iterativos. As características do solo influenciam na forma da curva característica, onde solos arenosos possuem grande variação de umidade para pequena variação de sucção e solos argilosos necessitam de pequena variação na umidade para resultar em grande perda de umidade (Souza Neto, 2004). A Figura (4) apresenta exemplos de curvas características típicas de solos.

$$\theta_w = \frac{S \cdot e}{1+e} \tag{4}$$

Onde:

θ_w = umidade volumétrica;

S = grau de saturação;

e = índice de vazios.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha_{vg} \cdot h)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}} \tag{5}$$

Onde:

θ_w = umidade volumétrica;

θ_r = umidade residual;

θ_s = umidade volumétrica de saturação;

h = sucção do solo;

α_{vg} , n_{vg} e m_{vg} são parâmetros de ajuste.

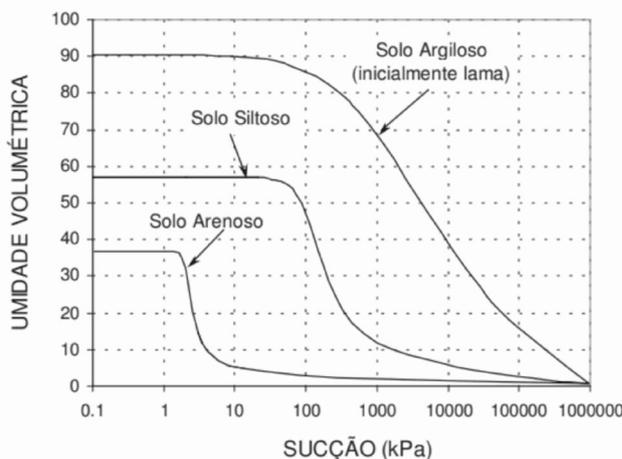


Figura 4. Curvas Características Típicas de Três Solos Distintos.

Fonte: Fredlund e Xing (1994).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram coletadas amostras de solo, deformada e indeformada, em área de alta incidência de processos erosivos (Figura 5). As amostras foram coletadas no mês de setembro de 2019, durante a estação seca da região (junho a dezembro), sendo transportadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Cariri (UFCA), onde foram realizados ensaios de caracterização básica, ensaios de Inderbitzen e ensaios de sucção, para a análise da perda de massa e análise da potencialidade do solo aos processos erosivos.



Figura 5. Coleta de Amostras Próximas de um Processo Erosivo (Coordenadas UTM: N. 465597; E. 10800042; Z. 24 S.

Fonte: Os autores (2020).

3.1 Ensaios de caracterização básica

Os ensaios de caracterização básica foram realizados seguindo as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo eles:

- Preparação das amostras deformadas de acordo com a norma ABNT NBR 6457:2016;
- Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento de acordo com a norma ABNT NBR 7181:1984;
- Determinação dos limites de liquidez e plasticidade de acordo com as normas ABNT NBR 6459/84 e ABNT NBR 7180/84 respectivamente;

- Determinação do peso específico real dos grãos e o teor de umidade natural de acordo com as normas ABNT NBR 6508:1994 e ABNT NBR 6457:2016.

3.2 Ensaios de inderbitzen

O equipamento utilizado no ensaio de Inderbitzen consistiu de uma rampa hidráulica de chapa metálica com 20 cm de largura e 120 m de comprimento, com uma abertura na sua parte inferior com diâmetro de 10 cm (Figura 6). Devido ao ensaio não ser normatizado, no presente trabalho foi utilizada basicamente as etapas metodológicas adotadas no trabalho de Lafayette (2006).

Neste estudo foram utilizados dois corpos de prova, sendo um na umidade natural e outro previamente inundado, por um período de uma hora antes do início do ensaio, tempo suficiente para saturar a mostra com textura predominantemente arenosa. A inclinação da rampa adotada no ensaio foi de 45°, visando avaliar a condição mais desfavorável, visto que a área de estudo apresenta pontos de erosão avançada com superfície do terreno com esta declividade. No topo da rampa hidráulica consta um reservatório de água, responsável por proporcionar o fluxo previsto. O controle de vazão se deu por meio de hardware Arduino conectado a um computador e a um sensor de vazão interligado à tubulação de água, esta controlada por um registro manual. O sensor de vazão consistiu de um corpo plástico com um rotor e um sensor de Efeito Hall e seu funcionamento se deu através do número de pulsos emitidos; e através dele determinou-se a vazão no registro. As vazões utilizadas no escoamento foram de 3,5 L/min, 6 l/min e 7 l/min. A determinação da velocidade do escoamento se deu pelo do método do corante, verificando quanto tempo foi necessário para que o corante percorresse uma distância conhecida. O material erodido pelo escoamento foi coletado em tempos de 1 min, 5 min, 10 min e 20 min após o início do ensaio. Posteriormente os materiais foram colocados em cápsulas e levados para a estufa, por um período mínimo de 24 horas, para a determinação da massa seca. Esse procedimento foi realizado para todas as vazões ensaiadas.



Figura 6. Vista do Equipamento de Inderbitzen (UFCA).

Fonte: Os autores (2020)

3.3 Ensaio de sucção pelo método do papel filtro

Para o ensaio de Sucção pelo Método do Papel Filtro, utilizou-se o papel do tipo Whatman Nº42, onde foi medida a sucção matricial, através do contato direto do papel com corpos de prova, em um ambiente hermeticamente fechado, para proporcionar o equilíbrio de pressão.

A curva característica foi determinada a partir de ensaios realizados em 10 corpos de prova indeformados, moldados através de anéis de tubo de PVC biselados, com diâmetro interno de 4,35 cm e altura de 2,42 cm em média (Figura 7). Os corpos de prova tiveram diferentes umidades iniciais, que foram alteradas por meio de processos de umedecimento, através de um pulverizador manual, a partir da amostra seca ao ar livre. O processo de umedecimento levou em consideração o peso da amostra, ou seja, calculou-se o peso necessário para que a amostra atingisse a umidade esperada por meio da adição de água pulverizada. Posteriormente a umidade real foi determinada a partir do peso da amostra antes do ensaio e após a secagem no final.

Durante a preparação dos corpos de prova colocou-se cuidadosamente um papel filtro na

parte superior e outro na parte inferior, posteriormente envolvendo-os com um plástico filme e em seguida lacrando-se com uma fita adesiva, para obter a máxima vedação e a mínima evaporação. A partir do quinto corpo de prova foram postos dois papéis filtro em cada lado, a fim de proteger o solo de perdas, para o papel que seria pesado. Na preparação dos corpos de prova utilizaram-se pinças e luvas durante toda a realização do procedimento, para minimizar a perda de umidade durante o manuseio.



Figura 7. Moldagem do Corpo de Prova para o Ensaio de Sucção.

Fonte: Os autores (2020)

Para o equilíbrio do teor de umidade na amostra, adotou-se um tempo de estabilização padrão de 10 dias. Após este período foram realizadas as pesagens dos papéis em uma balança digital analítica e, posteriormente, colocados em estufa à 105°C por 24h. Após esse tempo, pesaram-se novamente os papéis para determinação do teor de umidade. Para determinação da massa do papel seco utilizou-se um dessecador com sílica em gel como objeto de transporte da estufa até a balança, minimizando a variação da umidade do papel devido à umidade relativa do ar.

Para determinação da sucção foram utilizadas as Equações 1 e 2 propostas por Chandler *et al* (1992). A umidade volumétrica foi calculada conforme a Equação (4) e o ajuste da curva foi realizado utilizando a Equação (5), proposta por Van Genuchten (1980). A partir dos valores da sucção e da umidade do papel, construiu-se a curva característica do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização básica

Após a preparação da amostra deformada, realizou-se a análise granulométrica por meio do

peneiramento e da sedimentação do solo, com e sem defloculante (Figura 8). A partir das curvas obteve-se, os percentuais dos materiais constituintes do solo, conforme representados na Tabela (2).

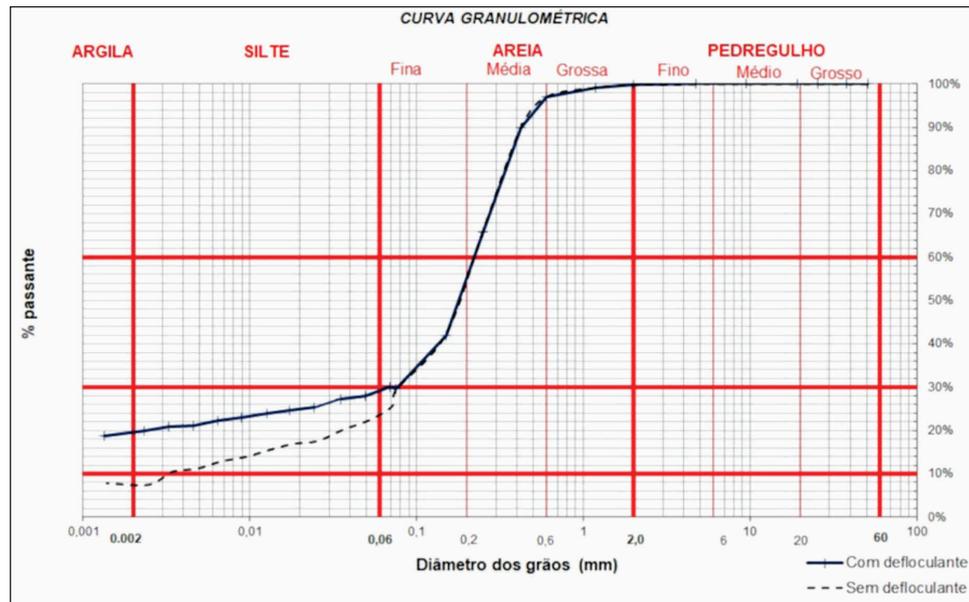


Figura 8. Curva Granulométrica do Solo.

Fonte: Os autores (2020)

Tabela 2. Resultados da Análise Granulométrica.

Materiais	% dos Materiais	
	Com defloculante	Sem defloculante
Pedregulho	0,25	0,25
Areia Grossa	2,71	2,66
Areia Média	42,14	41,79
Areia Fina	25,60	31,30
Silte	9,60	16,27
Argila	19,70	7,73
passa #200	29,59	29,29

Fonte: Os autores (2020)

Com base nos resultados, observa-se que o solo estudado é predominantemente arenoso, pois mais de 50% do seu material encontra-se na faixa entre 0,06 mm a 0,6 mm. O percentual de material argiloso é baixo (<20%), o que caracteriza solos suscetíveis à erosão. O limite de plasticidade (LP) foi de 12,7% e o limite de liquidez (LL) de 16,8%, resultando em um índice de plasticida-

de (IP) de 4,1%, caracterizando-se um solo pouco plástico. De acordo com a Classificação Unificada dos Solos, o solo estudado classifica-se como areia siltosa (SM). Conforme a relação entre a suscetibilidade à erosão e a textura dos solos, proposta por Llopis Trillo (1999), o solo em estudo tem elevada suscetibilidade a processos erosivos.

Observando as duas curvas granulométricas obtidas, conforme o ensaio normatizado e o ensaio realizado sem agitação e sem defloculante, é possível verificar que a sedimentação ocorreu mais rapidamente no ensaio sem agitação e sem defloculante, devido à agregação das partículas mais finas. Por meio desses resultados foi possível obter o valor da porcentagem de dispersão (PD), de acordo com a ABNT NBR 13602/96, sendo a razão entre os percentuais de partículas com diâmetros menores que 0,005 mm obtidos das curvas sem e com defloculante; e a razão de dispersão (RD), obtido através do método proposto por Middleton (1930), sendo a razão entre os percentuais de partículas com diâmetros menores que 0,05 mm obti-

dos das curvas sem e com defloculante 0,05 mm. A Tabela (3) apresenta os resultados. De acordo com Araújo (2000), a amostra de solo analisada foi considerada de baixa erodibilidade (PD<20%); no entanto, pelo critério proposto por Middleton (1930), baseado na Razão de Dispersão (RD), a amostra foi classificada como de solos erodíveis, apresentando RD superior a 15%.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de dispersão SCS.

Porcentagem de Dispersão (PD)			Razão de Dispersão (RD)		
Argila (<0,005m) sem dispersão (%)	Argila (<0,005m) com dispersão (%)	PD (%)	Silte+argila (<0,05mm) sem dispersão (%)	Silte+Argila (<0,05mm) com dispersão (%)	RD (%)
3,82	21,20	18,02	12,22	27,96	43,71

Fonte: Os autores (2020)

4.2 Ensaios de inderbitzen

A partir dos ensaios de Inderbitzen foi possível determinar parâmetros relacionados ao escoamento e a erodibilidade dos solos. Os valores de velocidade de escoamento, altura da lâmina d’água e tensão cisalhante hidráulica, para as vazões três adotadas nos ensaios, estão apresentados na Tabela (4).

Tabela 4. Parâmetros do ensaio de Inderbitzen.

i	45°		
Q (l/min)	3,5	6	7
v (cm/s)	95,405	142,417	158,659
h (cm)	0,0306	0,0351	0,0368
τh (Pa)	3,057	3,511	3,677

Fonte: Os autores (2020)

As Figuras (9) e (10) exibem os resultados obtidos nos ensaios de Inderbitzen com a amostra natural e previamente inundada, respectivamente. A partir delas é possível observar que as maiores perdas de massa de solo ocorrem no início do ensaio, quando o primeiro trecho retilíneo apresenta declividade mais acentuada; o mesmo foi observado por Facio (1991). Após 10 minutos

Com relação ao resultado do ensaios de densidade real dos grãos do solo, a densidade das partículas do solo foi de 2,641 g/cm³, o que caracteriza solos com uma mineralogia com predominância de mineral quartzo na sua composição, sendo um tipo de mineral resistente ao desgaste por atrito.

do ensaio, a curva tende a se estabilizar, nos ensaios realizados nas duas amostras. Os resultados mostram que o solo natural apresentou maior perda de massa quando comparado com o ensaio realizado no solo previamente inundado, ou seja, no campo, os solos expostos a longos períodos de seca, são mais suscetíveis a sofrer processos de erosão no início das primeiras chuvas na localidade, sendo, desta forma, recomendável adotar práticas de conservação do solo e medidas para o disciplinamento do escoamento superficial, antes do início do período chuvoso.

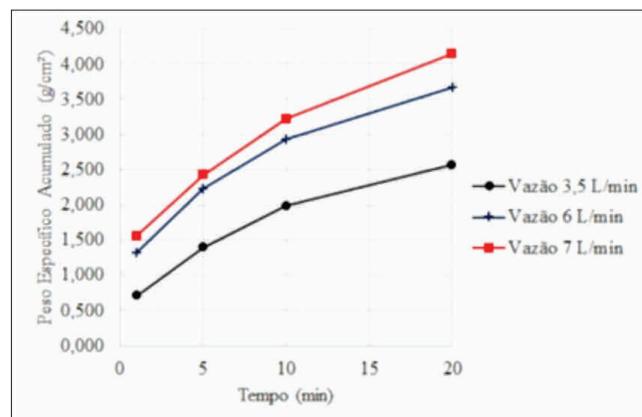


Figura 9. Tempo x Perda de Solo Acumulado Para Amostra Natural.

Fonte: Os autores (2020)

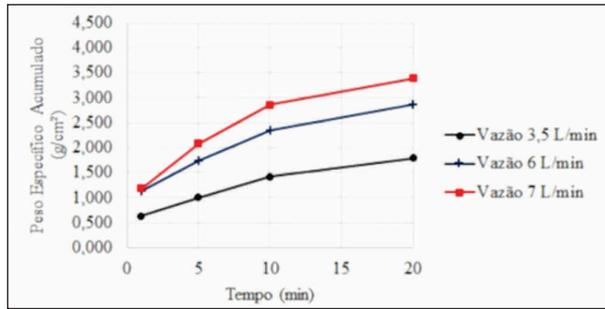


Figura 10. Tempo x Perda de Solo Acumulado Para a Amostra Inundada.

Fonte: Os autores (2020)

A partir dos gráficos da Tensão crítica *versus* Perda de solo acumulado, verificou-se que o solo possui baixos valores de tensões críticas, nos valores de 2,044 Pa para a amostra natural (Figura 11) e 2,359 Pa para a amostra inundada (Figura 12). Com relação à taxa de erodibilidade (K), as amostras apresentaram valores semelhantes; a amostra natural apresentou valor de K igual a 0,1263 g/cm²/min/Pa e a amostra previamente inundada apresentou valor de K igual a 0,1267 g/cm²/min/Pa. De acordo com a proposta de Bastos (1999), a amostra ensaiada pode ser classificada como altamente erodível. A Tabela (5) sintetiza os resultados.

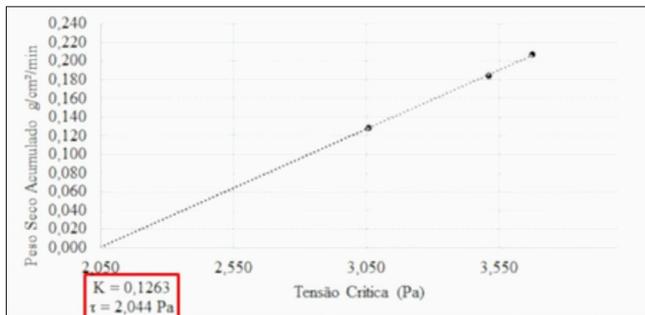


Figura 11. Tensão Crítica x Perda de Solo Para Amostra Natural.

Fonte: Os autores (2020)

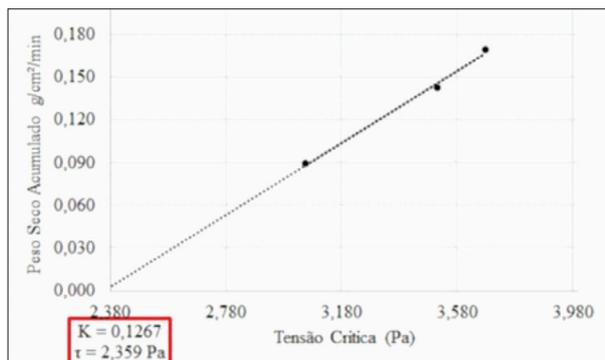


Figura 12. Tensão Crítica x Perda de Solo Para Amostra Inundada.

Fonte: Os autores (2020)

Tabela 5. Valores da Taxa de Erodibilidade (K) e da Tensão Crítica.

Amostra	K (g/cm ² /min/Pa)	Tensão crítica (Pa)
Seca	0,1263	2,044
Inundada	0,1267	2,359

Fonte: Os autores (2020)

4.3 Ensaios de sucção pelo método do papel filtro

O ensaio de sucção permitiu estimar a pressão necessária para o ar deixa de ficar na forma oclusa para uma forma mais contínua, iniciando o processo de dessaturação. Para o solo em estudo esse valor correspondeu à 5 kPa (Figura 13). O comportamento da curva é típico de um solo areno-siltoso, em concordância com sua classificação SUCS de areia siltosa (SM).

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que quando o solo apresentou teor de umidade de 0,85% a sucção foi de 944 kPa; e quando o solo apresentou teor de umidade de 8,7% a sucção de 13 kPa. Na Figura 13 observa-se que entre a sucção de 100 kPa e 10 kPa ocorrem as maiores variações do teor de umidade com a variação de sucção, onde espera-se maiores alterações da características do solo, tais como o coeficiente de permeabilidade e resistência ao cisalhamento; logo, quando a sucção atinge esta faixa de valor, o volume de água escoado diminui, resultando em uma maior infiltração e menor escoamento superficial, reduzindo a perda de massa por processos erosivos.

Quanto maior a sucção maior a dificuldade de infiltração de água, facilitando o escoamento superficial. Os resultados obtidos sugerem concluir que a maior parte da água esco quando o solo está no período seco, resultando em maior erosão devido ao maior escoamento superficial das águas pluviais. Vale ressaltar que a relação sucção-umidade está diretamente relacionada à distribuição granulométrica, ao índice de vazios, à percentagem de finos e à mineralogia do solo em estudo, de acordo com Menezes (2010).

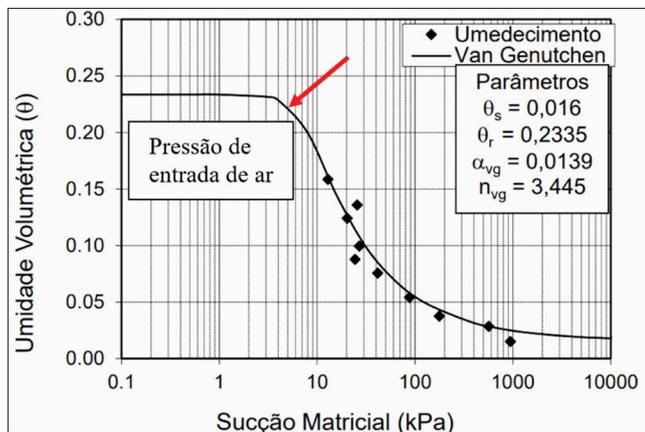


Figura 13. Curva Característica do Solo do Parque Timbaúbas.

Fonte: Os autores (2020)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo permitem concluir que o solo do Parque Natural Municipal das Timbaúbas tem elevado potencial de erosão. Os ensaios de Inderbitzen possibilitaram estimar a perda de massa devido ao escoamento superficial, salientando que a quantidade de massa erodida foi bem significativa.

Na estação seca da região o solo se apresenta em torno de 5% de umidade, ou seja, com elevada sucção; neste período ocorre um maior escoamento superficial devido à redução da permeabilidade, deixando o solo mais suscetível às perdas de massa de solo por erosão. O solo estudado neste trabalho tem elevado potencial aos processos erosivos principalmente no início da estação chuvosa, o que gera a necessidade de adotar medidas para evitar o surgimento de novos processos erosivos e medidas de recuperação para as áreas degradadas, ainda durante a estação seca da região.

Os dados deste estudo trazem um alerta para os gestores de que é necessário adotar ações estruturais e não-estruturais, envolvendo obras de sistemas de drenagem, proteção superficial do solo, práticas de conservação e campanhas educativas; sendo ainda mais importantes por se tratar de um Parque Natural protegido por lei municipal.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, Rodrigo da Cruz de. ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS DA FORMAÇÃO

BARREIRAS - RJ. 2000. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

ARAUJO, G. H. DE. S.; ALMEIDA, J. R. GUERRA, A. J. T. Gestão Ambiental de Áreas Degradadas. 6ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

ARAUJO, R. C.; CAMPOS, T. M. P.. 2013. Uso dos Ensaios de Penetração de Cone, Desagregação, Sucção e Resistência à Tração para Avaliar a Erodibilidade. GEOTECNIA, 67 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 6508. Grãos de solo que passam pela peneira 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7180. Solo- Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2016. NBR 7181. Solo- Análise granulométrica. Rio de Janeiro.

BASTOS, C. A. B. 1999. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul / UFRGS.

BERTONI, J. & LOMBARD NETO, F.L. 2005. Conservação do solo. 5 ed. São Paulo: Ed. Ícone. 355 p.

BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. 1985. Conservação do solo, 1nd ed., Livroceres, Piracicaba, SP, Brasil, 372 p.

BOARDMAN, J. P. In: A. J. T. GUERRA; SILVA, Antônio Soares e R.G.M. BOTELHO (orgs.). 2009.

- Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações, 4nd ed., Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. (Org.); SALES, M. M. (Org.); SOUZA, N. M. (Org.); MELO, M. T. S. (Org.). 2006. Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília. FINATEC. 464 p.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. 1992. A low cost method of assessing clay dissection for low-rise buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 92 n. 2, 82-89 p.
- COUTO, Bruno de Oliveira Costa. Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos. 2015. 124f.
- DEMARCHI, J. C.r; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Estimativa de perda de solos por erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão das Perobas (SP) nos anos 1962 e 2011. Raega – O Espaço Geográfico em Análise, v. 46, n. 1, p. 110-131, 2019.
- FÁCIO, J. A. 1991. Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília.
- FENDRICH, R. et al. 1991. Drenagem e controle da erosão urbana, IBRASA, Curitiba, PR, Brasil.
- FONSECA, A. M. M. C. C.; FERREIRA, C. S. M. 1981. Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ, CNPq, ABMS, 646-664 p.
- FREDLUND, D.G. AND XING, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Can. Geotechn. J. 31, 521-532 p.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review. Catena, v. 81, p. 1-11, 2010.
- GOMES, F. S. 2001. Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um solo em Processo Erosivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco.
- GOMES, G. L .M. Diagnóstico de áreas degradadas por voçorocas no município de Alterosa-MG. Dissertação (Mestrado) 2006. 68p. Ribeirão Preto.
- GUERRA, A. J. T., JORGE, M. C. O. 2012. Geomorfologia do cotidiano – a degradação dos solos. Revista Geonorte, Edição Especial, Vol. 4 n. 4, 116-135 p.
- JORGE, M.C.O. & GUERRA, A.J.T. (2013). Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas. 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, pp. 7-30.
- INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. 1998. Geologia de Engenharia. Capítulo 9: Processos de Dinâmica Superficial. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo.
- JACINTHO, E. C. et al. Solos Tropicais e o Processo Erosivo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO. M. T. S. (Org.). 2006. Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 93-156 p.
- LAFAYETTE, K. P. V. 2006. Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em escostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 60-229 p.
- LEE, H. C.; WRAY, W. K. 1995. Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable. Unsaturated Soils, v. 2, 615-622 p.
- LLOPIS TRILHO, G. 1999. Control de la Erosión y Obras de Desague. Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes. Madri, Entorno Grafico S. L.
- MACEDO, C. C. A. 2019. Diagnóstico da erodibilidade e da qualidade hidrica em uma unidade de conservação municipal. Dissertação de Mestrado,

Programa de Pós- Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável – Proder, Universidade Federal do Cariri, 94 p.

MACEDO, C. C. A., CLARINDO, G. S., BANDEIRA, A. P. N., LIMA, M. G. S. & SOUZA NETO, J. B. 2019. Análise da Potencialidade Erosiva de Um Solo de Uma Unidade de Conservação Municipal. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São Carlos, Brasil.

MAGALHÃES, R. A. Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia- GO, 03 a 06 de maio de 2001.

MANNERING, J. V.; MEYER, L. D. The effects of various rats of surface mulch on infiltration and erosion. Soil Science Society of American Proceeding, Madison, v.27, n.1, p.84-86, 1963.

MARINHO, F. A. M. et al. Erosão. In: CAMAPUM DE CARVALHO et al. (Orgs.). 2015. Solos não saturado no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

MEIRA, F. F. A. (2008). Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas. Tese de Doutorado, UFPE. GTG. Engenharia Civil, Recife-PE.

MENDONÇA, J. K. S. e GUERRA, A. J. T. 2004. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. GUERRA, A. J. T. e VITTE, Carlos Antônio (orgs.). Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 225-251 p.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J.. 2010. Análise da Influência do Teor de Umidade na Absorção D'água e Sucção dos Solos em Estudos de Erodibilidade. Geociências (São Paulo), Vol. 29, n. 2, 211-228 p.

MIDDLETON, H. E. 1930. Properties of soils wich influence soil erosion. U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, n. 178, 16 p.

MOTA, S. Planejamento Urbano e Preservação Ambiental. 1991. Edições UFC, Fortaleza, Brasil.

PELLEGRINI, André. Sistemas de cultivo da cultura do fumo com ênfase às práticas de manejo e conservação do solo. 2006. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – UFSM, Santa Maria, 2006.

REGO, J. J. V. 1978. Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

SOUZA NETO, J. B.. 2004. Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso). Rio de Janeiro, Brasil.

VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 892-898 p.