

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/429

Utilização de ensaios de Inderbitzen para avaliação da erodibilidade do solo da bacia do Ribeirão Guaratinguetá

Júlia dos Santos Oliva

Discente do Curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, julia.oliva@unesp.br

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Professora Assistente Doutora, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, mariana.motta@unesp.br

Paulo Valladares Soares

Professor Assistente Doutor, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, paulo.valladares@unesp.br

Gabriel Orquizas Mattiello Pedroso

Professor Assistente Doutor, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, gabriel.pedroso@unesp.br

RESUMO: O processo erosivo envolve a desagregação e transporte de partículas do solo, influenciado por fatores naturais e humanos. Enquanto a erosão natural é antiga e benéfica para a formação do solo, a atividade humana acelera esse processo, causando danos ambientais e econômicos. Por isso, o estudo da erodibilidade é essencial para desenvolver estratégias de prevenção e correção da erosão. Neste sentido, esta pesquisa procura entender a erodibilidade de um solo da bacia do Ribeirão Guaratinguetá por meio do ensaio de Inderbitzen, simulando diferentes condições de campo: variação no teor de umidade inicial (amostras secas ao ar e saturadas por capilaridade), para diferentes declividades de rampa – 10°, 20° e 45°, a uma vazão constante de 0,003 m³/min. Verificou-se que, para todos os ensaios, a maior perda de solo ocorre nos primeiros minutos de teste, tendendo a uma estabilização desta perda ao longo do tempo. Ademais, quanto maior a declividade da rampa e menor o grau de saturação inicial, maior é a erodibilidade do solo em questão.

PALAVRAS-CHAVE: Erodibilidade, Inderbitzen, Erosão, Solo indeformado.

ABSTRACT: The erosion process involves the disintegration and transport of soil particles, influenced by natural and human factors. While natural erosion is ancient and beneficial for soil formation, human activity accelerates this process, causing environmental and economic damage. Therefore, the study of erodibility is essential to develop erosion prevention and correction strategies. In this sense, this research seeks to understand the erodibility of a soil from the Ribeirão Guaratinguetá basin based on the Inderbitzen test, simulating different field conditions: variation in the initial moisture content (samples dried in air and saturated by capillarity), for different slopes ramp – 10°, 20° and 45°, at a constant flow of 0.003 m³/min. For the twenty minutes of testing carried out, it was found that, for all tests, the greatest loss of soil occurs in the first minutes of the test, tending to stabilize this loss over time. Furthermore, the greater the slope of the ramp and the lower the degree of initial saturation, the greater the erodibility of the studied soil.

KEYWORDS: Erodibility, Inderbitzen, Erosion, Undisturbed soil.

1 INTRODUÇÃO

O processo erosivo é caracterizado pela desagregação, transporte e sedimentação dos constituintes do solo, que pode ocorrer tanto por fatores naturais, quanto por fatores antrópicos (Campos, 2014). Na visão de Pruski (2009) a erosão é um processo oriundo de fenômenos naturais que agem modificando a crosta continuamente, de maneira tão antiga quanto à própria terra e benéfica para a formação dos solos como um todo.

As ações praticadas pelo homem desequilibram esse processo e dão origem à erosão acelerada, que causa prejuízos tanto ao meio ambiente, quanto a exploração da agropecuária, de obras de engenharia, entre outras diversas atividades econômicas (Silva *et al.*, 2016; Da Silva *et al.*, 2020). Por isso, segundo Fácio

(1991), o estudo da erodibilidade tem ganhado muita importância conforme o homem tem a necessidade de aumentar o espaço territorial. Nestes estudos são empregados diversos métodos de ensaios, diretos e indiretos, para a avaliação de diferentes solos, estes são indispensáveis para a criação de projetos de prevenção e correção de seu avanço.

No Brasil, com o clima tropical e constantes precipitações pluviais, há um favorecimento do processo erosivo (Magalhães, 2013). De acordo com Magalhães (2013), a ocorrência de fortes chuvas em determinados períodos, associado ao manejo inadequado do solo, tem aumentado a erosão hídrica, principalmente nas áreas agrícolas.

No entorno de rios e bacia hidrográficas, o volume de solo erodido geralmente acaba sedimentando nos cursos d'água, resultando em processos de assoreamento. A perda da fertilidade do solo, a destruição de estradas e obras de engenharia, o risco de desmoronamento de casas, entre outros problemas, são oriundos da erosão de solos (Silva *et al.*, 2016; Da Silva *et al.*, 2020).

A erosão hídrica tem como principal agente deflagrador o impacto das gotas de chuva sob o terreno descoberto, o que tem como resultado o desprendimento de partículas do talude. Esse processo, é dividido pela literatura em três partes, sendo elas: desagregação, transporte e deposição (Stephan, 2010; Campos, 2014).

Consoante com Campos (2014), a desagregação consiste no desprendimento das partículas da massa de solo, o transporte é justamente o processo de deslocamento dessas partículas, que na erosão hídrica, é feita pelo fluxo de água que é formado na superfície da encosta. Por sua vez, a deposição é o processo de sedimentação desse material, que pode ser em rios e vales e causar o assoreamento dos cursos d'água.

Inderbitzen (1961) propôs um modelo de ensaio muito utilizado para o estudo da erodibilidade. Este propõe uma rampa, que utiliza uma inclinação conhecida, com um orifício no centro destinado à amostra indeformada de solo. Com a utilização de um simulador de chuva, de vazão conhecida, coleta-se as massas de solo erodido de acordo com o tempo.

Bastos (1999), utilizando da proposta de Inderbitzen (1961), faz uma análise entorno dos tempos de ensaio e das inclinações de rampa. Assim, ele chegou a conclusão de que o ideal para a análise da erosão no solo é realizar o ensaio por, no mínimo, 10 minutos.

Stephan (2010) utilizou a proposta de Inderbitzen (1961) para analisar voçorocas na cidade de Ipanema, em Minas Gerais. Este realizou ensaios no decorrer de uma hora, coletando dados de 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minutos. As análises feitas por Stephan (2010) contaram com amostras indeformadas circulares e quadradas, na qual foram estudadas as diferenças entre a realização dos ensaios de rampa com as variações de geometria das amostras.

Mendes *et al.* (2021) utilizaram um simulador de chuva automatizado, tendo como objetivo elevar o nível de análises feitas com o ensaio de Inderbitzen (1961). O simulador proposto tem todas as suas variáveis controladas, em que é possível determinar os tempos de ensaio, pressão da água, vazão, entre outros. O estudo em questão procurava utilizar o simulador não apenas para o ensaio de rampa, mas também para análises de desempenho hidrológicas.

Dessa maneira, verifica-se a importância do estudo da erodibilidade dos solos e, por isso, diversos autores tentaram desenvolver modelos matemáticos para prever e calcular o processo erosivo, mesmo com a sua dificuldade e complexibilidade (De Oliveira *et al.*, 2021). Bastos (1999), por exemplo, propôs a determinação do coeficiente de erodibilidade (K) de forma a auxiliar em projetos de correção e prevenção de processos erosivos.

Ainda, diversos outros autores procuraram criar parâmetros para a classificação da erodibilidade dos solos, como Fragassi (2001), que classifica a erosão de solos utilizando uma vazão de 1,5 l/min e especificou critérios para o fenômeno de acordo com a velocidade de erosão (g/cm²/hora).

Neste contexto, a presente pesquisa busca apresentar considerações sobre o processo erosivo hídrico, avaliando a erodibilidade de um solo na bacia do Ribeirão Guaratinguetá, por meio de ensaios de laboratório. O estudo levou em consideração os ensaios propostos por Inderbitzen (1961) com o objetivo de avaliar a condição mais crítica para o solo em questão, em função do teor de umidade inicial e da inclinação da rampa.

O conhecimento acerca do potencial de erodibilidade da área pode embasar o aprimoramento e adequação de projetos de controle e remediação, e servir de elemento básico para o planejamento e concepção de novas obras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo Estudado

A caracterização física do solo estudado é indicada na Tabela 1. A determinação dos limites de plasticidade e liquidez foram realizadas de acordo com as normas ABNT NBR 7180 (2016) e 6459 (2016), respectivamente. A classificação ABNT foi realizada com base nos ensaios de granulometria, descritos pela norma ABNT NBR 7181 (2021), na qual foi obtida a curva de granulometria. Desta maneira, obteve-se a porcentagem das frações granulométricas do solo estudado, apresentado na Tabela 2.

A partir das informações obtidas nas Tabelas 1 e 2, verifica-se que o solo pode ser classificado como Argilo arenoso, identificado pela SUCS como Silte de alta plasticidade (MH).

Tabela 1: Parâmetros físicos do solo.

Parâmetro	Unidade	Valor
Densidade relativa dos grãos	-	2,64
Massa específica seca	g/cm ³	1,30
Índice de vazios	-	1,02
Porosidade	%	51,0
Limite de Liquidez	%	52,7
Limite de Plasticidade	%	31,1
Índice de Plasticidade	%	21,6
Classificação SUCS	-	MH (Silte de alta plasticidade)
Classificação ABNT	-	Argilo Arenoso
Umidade Natural	%	26,5

Tabela 2: Porcentagens das frações granulométricas do solo.

Tipo	Porcentagem (%)
Pedregulho	1,0%
Areia Grossa	1,0%
Areia Média	26,0%
Areia Fina	15,5%
Silte	12,5%
Argila	44,0%

2.2 Ensaio de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen consiste na utilização de uma rampa com a inclinação deliberada de acordo com a especificidade do estudo. Nesta, a amostra é inserida de forma plana na face da rampa e, com o auxílio de um simulador de chuva, é determinado um valor de vazão para submeter o solo.

Assim sendo, colocou-se um cronômetro e obteve-se o escoamento superficial (água com solo erodido) nos tempos de 0-1 minuto, 1-5 minutos, 5-10 minutos e 10-20 minutos (Bastos, 1999). A massa de solo erodido foi obtida a partir do peneiramento do percolado, com o material retido na peneira #400, com abertura equivalente a 0,0038 mm.

A Figura 1 ilustra o sistema utilizado nesta pesquisa.

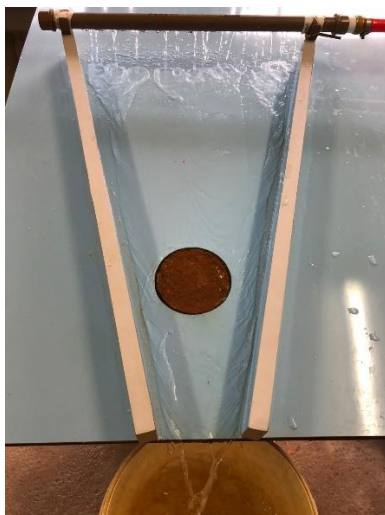


Figura 1: Rampa de Ensaio de Inderbitzen utilizada.

As amostras indeformadas foram retiradas na bacia do Ribeirão Guaratinguetá, na Fazenda Santa Terezinha, localizada nas seguintes coordenadas: 22°43'50"S, 45°16'48"W.

O local conta com taludes de diferentes declividades, no qual foram retiradas seis amostras indeformadas para realização dos ensaios de laboratório. Optou-se por avaliar a erodibilidade do material em três inclinações diferentes: 10°, 20° e 45° (Bastos, 1999; Campos, 2014). Consoante com Bastos (1999), as inclinações escolhidas e o tempo de ensaio de 20 minutos se mostram suficientes para a análise da erodibilidade em relação à desintegração superficial do solo.

Dessa maneira, para cada inclinação, foram ensaiadas duas amostras com condições de umidade diferentes: amostras secas ao ar por 3 dias e amostras saturadas por capilaridade por 3 dias (Da Silva *et al.*, 2020). Vale ressaltar que em todos os casos, a vazão utilizada de 0,003 m³/min foi constante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro critério analisado nos resultados dos ensaios de Inderbitzen foi a perda do solo ao longo do tempo.

A Figura 2 demonstra a massa acumulada de solo erodido tanto das amostras secas, quanto das saturadas por capilaridade, enquanto a Figura 3 apresenta a quantidade de solo acumulado no tempo de 20 minutos, ou seja, ao final do ensaio.

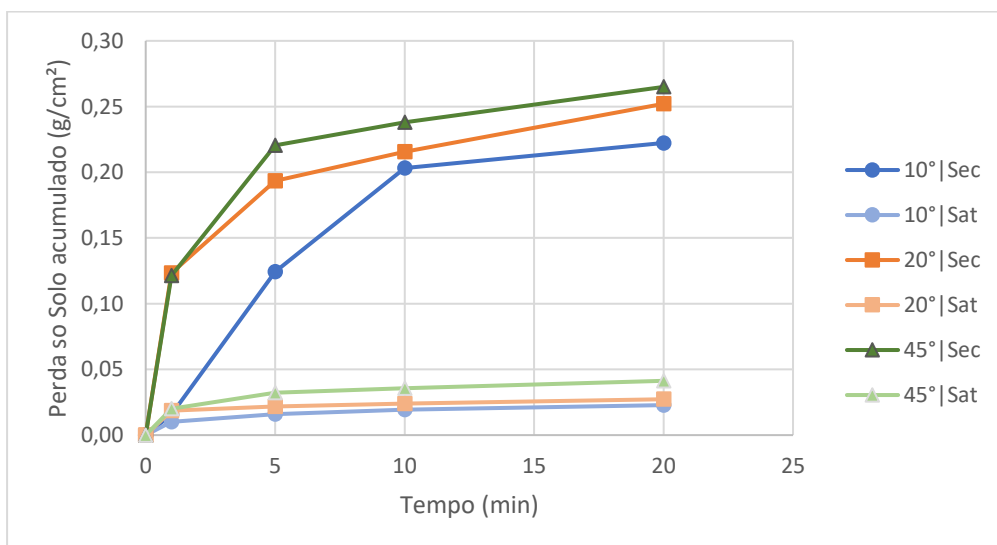


Figura 2: Perda do solo acumulado de acordo com o tempo.

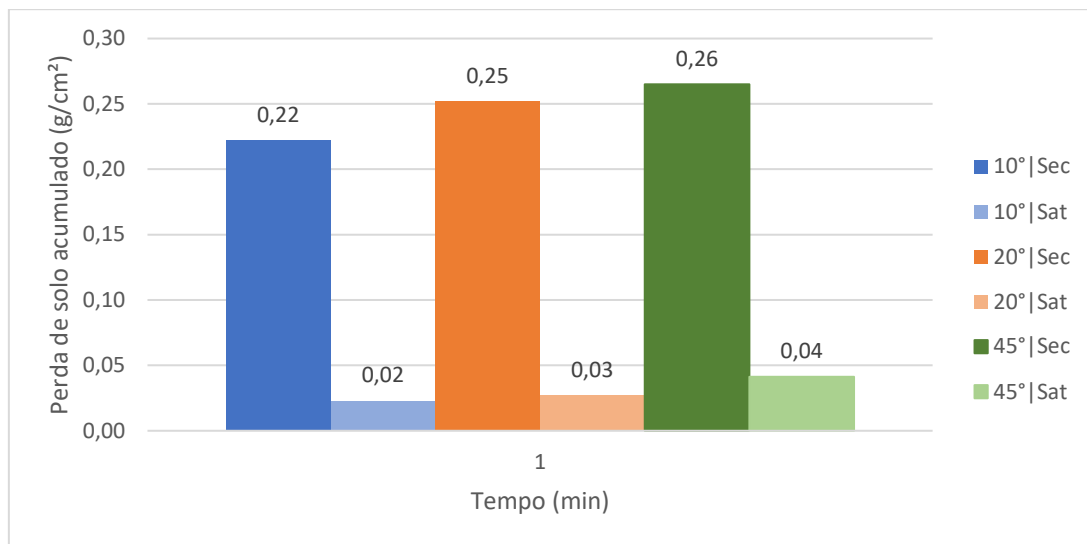


Figura 3: Perda do solo acumulada em 20 minutos.

À princípio, nota-se que o solo saturado teve um desempenho melhor em relação à erodibilidade do que o solo seco. Isso pode ser explicado pelo fato de que, o solo seco em temperatura ambiente, no início do ensaio, começa a receber umidade sobre sua superfície, por meio das gotas que simulam a chuva, que causam remoção das partículas (Sales *et al.*, 2017; Ziolle e Assis, 2024). Tal processo forma uma lâmina d'água que provoca uma frente de percolação na superfície da amostra.

Em solos com menor grau de saturação, o ar presente nos poros é comprimido, criando um bloqueio a percolação de água, contribuindo para o carreamento de partículas da superfície, aumentando a erosão. Ainda, a inundação da camada superior do solo, eleva o grau de saturação da amostra como um todo e reduz a sucção, o que implica diretamente na diminuição da coesão, ou seja, na perda de resistência do solo (Sales *et al.*, 2017.). Os processos combinados, facilitam o processo de erosão superficial na amostra seca onde, na Tabela 3, é possível observar o aumento entre a perda de solo acumulado nas amostras secas em relação às amostras saturadas, de acordo com as respectivas declividades.

Tabela 3: Aumento entre perda do solo acumulado das amostras secas em relação às amostras saturadas, no tempo de 20 minutos.

Inclinação	Perda do solo acumulado da amostra seca (g/cm²)	Perda de solo acumulado da amostra saturada (g/cm²)	Aumento de perda de solo da amostra seca em relação à saturada (%)
10°	0,22	0,02	89,73%
20°	0,25	0,03	89,17%
45°	0,26	0,04	84,41%

Nota-se que na amostra com inclinação de 10°, após 20 minutos de ensaio, houve um aumento de 89,73% de perda de solo. O mesmo ocorre nas outras inclinações, onde para a inclinação de 20° esse aumento foi de 89,17% e nas amostras com 45° o aumento foi um pouco menor, de 84,41%. Isso demonstra que, as amostras secas ao ar, ou seja, o solo com menor grau de saturação, possui maior susceptibilidade à erosão superficial.

Consoante com Campos (2014), quanto maior a sucção inicial do solo, maior a sua erodibilidade. Dado que a sucção do solo é inversamente proporcional à sua saturação, ou seja, quanto maior o grau de saturação, menor a sucção, as amostras que passaram por três dias de saturação possuem uma sucção menor, logo, uma erodibilidade menor.

Além disso, pode-se notar que, de acordo com o passar do tempo, a tendência é que as curvas fiquem constantes. Nos primeiros minutos, há uma maior erosão superficial do solo, que é feita de maneira laminar. Todavia, de acordo com formação da lâmina d'água, a água passa a formar uma frente de percolação e a erosão deixa de ser laminar, tendendo a formar sulcos e descaracterizar a amostra, caso o ensaio seja feito por muito tempo (Bastos, 1999).

De acordo com Bastos (1999), o coeficiente de erodibilidade (K) ($\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$) varia conforme a saturação da amostra e inclinação da rampa. Para valores de K maiores que $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ o solo é considerado de alta erodibilidade, valores entre $0,1$ e $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ são considerados de média erodibilidade e resultados menores do que $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ são determinados como solos de baixa erodibilidade. Assim, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação do solo de acordo com os valores do coeficiente de erodibilidade K.

Inclinação	Saturação	Valor de K ($\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$)	Classificação
10°	Seco ao ar	0,027	Média Erodibilidade
10°	Saturado por capilaridade	0,003	Média erodibilidade
20°	Seco ao ar	0,021	Média Erodibilidade
20°	Saturado por capilaridade	0,002	Média Erodibilidade
45°	Seco ao ar	0,014	Média Erodibilidade
45°	Saturado por capilaridade	0,001	Baixa Erodibilidade

Deve ser mencionado que a granulometria tem uma correlação direta com a erodibilidade do solo e, de acordo com Fragassi (2001), argilas têm menor sucessibilidade à erosão do que outros solos. Isso explica os valores baixos obtidos nos coeficientes de erodibilidade (K), em que nenhuma amostra foi classificada como alta erodibilidade. Porém, pode-se verificar que ao realizar os ensaios em amostras secas ao ar, na inclinação de 45° o valor de K aumenta significativamente, alterando o comportamento do material de baixa a média erodibilidade.

Vale ressaltar também a importância da declividade da rampa na erodibilidade deste solo, onde os maiores valores absolutos de massa de solo erodido foram encontrados na inclinação de 45°. Quando comparadas com as amostras testadas em 10°, o solo na maior declividade teve um aumento de perda de solo no tempo total de 20 minutos de 16% nas amostras secas e 45% nas amostras saturadas. Este fenômeno fica evidente nas Figuras 2 e 3, em que a erosão teve suas maiores curvas nas amostras submetidas à inclinação de 45° e ocorre por conta da maior declividade, que aumenta a velocidade de escoamento (V), a tensão hídrica (τ_h) e a perda do solo (Silva e Melo, 2016; Thoma, 2022; Ziolle e Assis, 2024).

Todavia, apesar da quantidade de massa erodida das amostras testadas com 45° ser maior, o coeficiente de erodibilidade (K) é maior nas amostras testadas em 10°. Isso porque, de acordo com Bastos (1999), o coeficiente de erodibilidade (K) e a tensão hidráulica (τ_h) são inversamente proporcionais. Ou seja, em declividades menores, há menor velocidade (V) e menor tensão hidráulica (τ_h), ocasionando no aumento do valor do coeficiente de erodibilidade K.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo avaliar a erodibilidade do solo da Fazenda Santa Terezinha, localizada na bacia do Ribeirão Guaratinguetá, para compreender o processo erosivo da região e auxiliar na implementação de práticas de conservação do solo, planejamento e organização da área rural.

De acordo com as análises feitas, foi notório que neste solo estudado a variação no teor de umidade inicial/grau de saturação inicial das amostras apresentou maior influência na erodibilidade que a variação na declividade da rampa. Considerando a combinação de ambas as variáveis, o pior desempenho para a massa de solo erodido, sem incorporar os parâmetros de tensão hidráulica, foi para o solo seco em temperatura ambiente, na inclinação de 45°.

Os resultados obtidos para K mostram que o solo é de baixa à média erodibilidade. Isso pode ser explicado justamente pela granulometria, em que 44% do solo é caracterizado como argila, a qual tem menor suscetibilidade à erosão. Entretanto, de forma geral, as amostras secas em temperatura ambiente tiveram um pior desempenho nos ensaios de Inderbitzen (1961), alterando a condição do solo para média erodibilidade.

Assim, deve-se ressaltar a importância do monitoramento da erosão no local, principalmente em chuvas após períodos de seca, onde o solo perde grande parte da sua umidade. Nestas condições, o solo apresentou

maior suscetibilidade ao processo erosivo, tendo maiores resultados de erodibilidade nos períodos de variabilidade hidrológica.

Salienta-se que outras variáveis ainda precisam ser estudadas e verificadas, tais como a variação de vazão nos ensaios de Inderbitzen (1961) e a utilização de métodos indiretos de classificação de erodibilidade, para uma análise conclusiva a respeito do solo em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade..* Rio de Janeiro, 1984a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 7181. *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984b.

BASTOS, C. A. B. (1999) *Estudo Geotécnico Sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados*. Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia. UFRGS, Porto Alegre.

CAMPOS, C. J. M. (2014) *Avaliação de Erodibilidade Pelo Método Inderbitzen em Solo Não Saturado da Região de Bauru-SP*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. UNESP, Bauru.

DA SILVA, J. C. R., MONTEIRO, L. F. G. (2020) *Construção do Aparelho de Inderbitzen Para Avaliar Erodibilidade dos Solos: Aplicação Nas Margens do Rio das Antas*. Monografia, Programa de Graduação em Engenharia Civil. UNIEVANGÉLICA, GO, Anápolis.

DE OLIVEIRA, V.N.; GITIRANA, G.D.F.N., JR.; DOS ANJOS MASCARENHA, M.M.; SALES, M.M.; VARRONE, L.F.R.; DA LUZ, M.P. *An Enhanced Flume Testing Procedure for the Study of Rill Erosion*. Water 2021, 13, 2956.

FÁCIO, J. A. (1991) *Preposição de Uma Metodologia de Estudo de Uma Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal, Brasília/DF*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. UNB, Brasília.

FRAGASSI, P. F. M. (2001) *Estudo da Erodibilidade dos Solos Residuais de Gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFV, Viçosa.

INDERBITZEN, A. L. (1961) *An Erosion Tests For Soils*. Materials Research & Standards. v.1, n.7.

MAGALHÃES, G. M. F. (2013) *Análise de Eficiência de Terraços de Retenção em Sub-Bacias Hidrográficas do Rio São Francisco*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 17, n.10, p.1109-1115.

MENDES, T.A.; PEREIRA, S.A.D.S.; REBOLLEDO, J.F.R.; GITIRANA, G.D.F.N.J.; MELO, M.T.D.S.; LUZ, M.P.D. *Development of a Rainfall and Runoff Simulator for Performing Hydrological and Geotechnical Tests*. Sustainability 2021, 13, 3060.

PRUSKI, F. F. (2009) *Conservação do Solo e Água: Práticas Mecânicas Para a Erosão Hídrica*. 2ª edição. UFV, Viçosa.

SALES, M. M., DE CARVALHO, J. C., LUZ, M. P., SOUZA, N. M., ANGELIM, R. R. (2017). *Erosão em Borda de Reservatório*. Escola de Engenharia Civil e Ambiental. UFG. Vol. 3.

SILVA, A. P. N., MELO, M. T. S. (2016) *Análise do Histórico de Desenvolvimento de Modelos de Aparelho de Inderbitzen Para a Confecção de Tabelas Comparativas*. Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão. São Paulo. cap. 3, p. 51-64.

STEPHAN, A. M. (2010) *Análise de Processos Erosivos Superficiais Por Meio de Ensaio de Inderbitzen*. Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFV, Viçosa.

THOMA, A. C. et al. *Erodibilidade de Neossolo Litólico pelo ensaio de Inderbitzen modificado e eficiência de blocos de solo para controle da erosão hídrica*. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 27, p. 511-522, 2022.

ZIOLLE, B., DE ASSIS, R. A. (2024) *Avaliação da Aplicação de Enzimas Biocatalizadoras na Erodibilidade do Solo*. Monografia de Graduação em Engenharia Civil. UNESP, Guaratinguetá.