

“DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE EM PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO MAPEAMENTO A LASER”

por Heinz Dieter Fill⁽¹⁾ e Cristiane Burmester⁽²⁾

RESUMO

O uso da tecnologia do mapeamento a laser ainda é recente no Brasil, sendo que alguns trabalhos estão em estudo. Este trabalho pretende investigar a aplicação dos dados adquiridos via essa tecnologia nos problemas de escoamento em canais naturais. Quando se dispõe de registros de níveis de água para grandes cheias ao longo do trecho em estudo, a estimativa da rugosidade (coeficiente de Manning) das planícies de inundação pode ser realizada através de calibração. Quando não se dispõe desses registros, usualmente o coeficiente de rugosidade é estimado a partir de tabelas ou fotos de canais similares. Esse procedimento pode levar a erros consideráveis em estudos de remanso. Dada a natureza do escoamento turbulento rugoso, uma maneira de estimar os parâmetros de rugosidade é correlacioná-los com as dimensões e a geometria das irregularidades da parede, como por exemplo no caso do conceito de rugosidade de areia.

Esse artigo mostra que é possível estimar os parâmetros hidráulicos de rugosidade, expresso pelo coeficiente de Manning, particularmente para superfícies cobertas de vegetação como planícies de inundação, a partir das informações coletadas pelo mapeamento a laser, usando diretamente uma medida característica da cobertura vegetal.

Palavras-chave: Coeficiente de Rugosidade, Perfilador a Laser, Planícies de Inundação

1. Professor titular de hidráulica e hidrologia, DHS/UFPR, heizfill@yahoo.com.br

2. Engenheira civil, mestre em engenharia ambiental e recursos hídricos, crisburmester@yahoo.com.br

ABSTRACT

The use of laser mapping technology is still recent in Brazil. This paper intends to investigate the application of data acquired by this technology in problems of natural channel flow. When registers of water levels are available for the stretch in study, the estimate of the roughness (Manning coefficient) of flood plains can be carried out through calibration. When these registers are not available, the roughness coefficient is usually estimated from tables or photos of similar channels. This procedure may lead to considerable errors in backwater studies. Given the nature of rough turbulent flow, one way to estimate the roughness parameters is to correlate them with the roughness elements, as for example in the case of sand roughness.

The idea of this paper is to estimate the hydraulica parameters of roughness, (Manning coefficient), particularly for surfaces covered with vegetation such as flood plains, from the information collected by laser mapping, using a characteristic measure of the vegetation cover.

1. INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia do mapeamento a laser conhecida pela sigla LiDAR (Light Detection and Ranging) é bastante recente no Brasil, e diversas aplicações encontram-se, no momento, em estudo. O presente artigo descreve a aplicação dessa tecnologia na estimativa da rugosidade (coeficiente de Manning) de planície de inundação de rios naturais. Quando não se dispõe de registros de nível e vazão para grandes cheias, o que é comum na prática, estima-se os parâmetros de rugosidade em função de tabelas publicadas na literatura assim como de analogias com registros fotográficos (CHOW, 1959).

Neste artigo apresenta-se uma metodologia que permita estimar o coeficiente de rugosidade em planícies de inundação a partir de informações do LiDAR relativas a altura dos elementos de rugosidade constituídos pela vegetação e edificações na planície.

O Perfilador a Laser analisa os ecos de um feixe de laser emitido em intervalos regulares. Como o equipamento permite obter o primeiro e o último pulso do laser refletido (eco), pode-se determinar facilmente a altura da camada vegetal.

Escolheu-se para a demonstração do método proposto o trecho do rio Iguaçu entre a cidade de União da Vitória e a localidade de Porto Vitória, onde já se dispunha de dados detalhados do Perfilador a Laser e que puderam ser utilizados diretamente nesta pesquisa. Esse trecho do rio Iguaçu já foi extensamente estudado por um período de mais de 20 anos, procurando estabelecer uma regra de operação do reservatório de Foz de Areia durante as cheias do rio Iguaçu (SUGAI, 1980; SUGAI et al, 1985; GROSZEWICZ, 1996).

Esses estudos foram bastante detalhados e contavam com extenso apoio de campo, de modo que os valores reais do coeficiente de rugosidade deste trecho do rio Iguaçu são bem conhecidos.

Além disso, o trecho analisado apresenta extensas planícies de inundação e, portanto, se presta bem a avaliação da metodologia a ser pesquisada.

2. ESCOAMENTO EM CANAIS

Define-se escoamento em canal como o escoamento de água, sob ação da gravidade em uma direção predominante onde parte do seu perímetro está em contato com o ar. A interface separando ar e água é denominada de superfície livre e o efeito do ar sobre a resistência é normalmente negligenciado.

O escoamento em canais é, na maioria dos casos, tratado pelo chamado método unidimensional de análise que consiste em considerar a velocidade média em cada seção, em função da direção do escoamento corrigindo os efeitos não lineares da distribuição da velocidade sobre a energia cinética e a quantidade de movimento através de coeficientes corretivos.

Neste caso o escoamento é considerado uniforme se a velocidade média e esses coeficientes permanecem constantes entre seções. Assim, a ocorrência de escoamento uniforme nos canais, exige não só o completo desenvolvimento da camada limite, como, ainda profundidade e seção constantes além de traçado retilíneo e declividade constante. Como nos condutos, o movimento uniforme apresenta aceleração nula em qualquer instante, o que implica em se ter vazão constante e linhas de corrente retilíneas e paralelas.

Em canais naturais é certamente impossível encontrar essas características e mesmo nos canais artificiais, quando a forma da seção e declividade do fundo são constantes (canais prismáticos), a variabilidade da profundidade implica que as linhas de corrente não são retilíneas e paralelas, condição essencial do escoamento uniforme. Entretanto a adoção da hipótese unidimensional, que conduz a uma linha de energia única, é comum na maioria dos problemas práticos, mesmo no caso de canais naturais não prismáticos.

Quando um escoamento não sofre variações ao longo do tempo diz-se que é permanente. Neste caso as linhas de corrente não se alteram no tempo, coincidindo com as trajetórias das partículas, e a vazão permanece constante. Quando as características do movimento variam ao longo do tempo diz-se que é não-permanente. No caso do escoamento uniforme a ausência da aceleração implica na igualdade das forças da gravidade e resistência. Como a profundidade é constante as linhas de corrente retilíneas e paralelas implicam na distribuição hidrostática de pressões, as forças de pressão se anulam em qualquer trecho do canal. A resistência é devida unicamente tensão tangencial no contorno sólido que está relacionada à velocidade do escoamento.

A igualdade entre força de resistência e gravidade implica na expressão:

$$\tau_0 = \gamma \cdot R_h \cdot S_0 \quad (2.1)$$

onde τ_0 : tensão tangencial no contorno

R_h : raio hidráulico

S_0 : declividade do canal

γ : peso específico da água (9810N/m³)

A relação entre a tensão tangencial e a velocidade geralmente é expressa por relações empíricas desenvolvidas desde o século XVIII do tipo $\tau_0 = \alpha \cdot V^2$, o que leva à expressão de Chezy

$$V = C \sqrt{R_h \cdot S_0} \quad (2.2)$$

Resta, entretanto, a questão de equacionar o coeficiente C com as características do escoamento.

2.1. Equação de Manning-Strickler

Para estimar o valor de C, várias expressões empíricas foram propostas (LENCASTRE,1992). Entretanto é quase certo que os dados utilizados nas diversas fórmulas foram os mesmos. Segundo CHOW (1959) Hagen e Gauckler, de forma independente, concluíram que esses dados ajustavam-se bem a uma expressão simples:

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (2.3)$$

Sendo n um coeficiente que depende apenas da natureza das paredes.

Substituindo (2.3) em (2.2) e considerando o paralelismo entre a linha de energia e o fundo do canal, resulta a conhecida fórmula de Manning, apresentada originalmente em 1889 (CHOW, 1959)

$$V = \frac{R_h^{2/3} S_f^{1/2}}{n} \quad (2.4)$$

Sendo

V: velocidade média do escoamento (m/s)

R_h : raio hidráulico (m)

S_f : declividade da linha de energia (m/m)

n: coeficiente de rugosidade (m^{-1/3}s)

O coeficiente de rugosidade pode ser expresso em função da rugosidade equivalente de areia de Nikuradse através da expressão (HENDERSON, 1966):

$$n = 0,038 \varepsilon^{1/6} \quad (2.5)$$

com: ε a rugosidade equivalente de areia (m)

g a aceleração da gravidade (m/s²)

Essa equação permite, quando se conhece o valor da rugosidade equivalente de areia da textura do contorno, a determinação objetiva do coeficiente n. Observa-se que n é independente do raio hidráulico, contrariamente ao que ocorre com as várias equações empíricas tais como Bazin, Ganguillet, Kutter e outros (PINTO et al., 1997) que fornecem o valor de C. A equação (2.5) apresenta bons resultados para canais regulares aproximadamente prismáticos com fundo de areia. Entretanto, principalmente no caso de canais naturais, essas condições não prevalecem e a resistência constitui-se em um fenômeno muito

mais complexo influenciado por macro irregularidades, vegetação nas margens, obstruções, contrações e expansões e outros fatores de difícil quantificação.

2.2. Coeficiente de resistência

A formulação da resistência no escoamento em canais mais difundida é sem dúvida a fórmula de Manning, a equação (2.4). Essa expressão originalmente proposta para o escoamento uniforme foi estendida com sucesso para o escoamento variado e mesmo para o escoamento não permanente (HENDERSON, 1966; CHOW, 1959) considerando-a válida localmente e instantaneamente. A única restrição importante a validade da fórmula de Manning é que o escoamento seja turbulento rugoso, o que se verifica na imensa maioria dos canais naturais dado ao elevado valor do número de Reynolds. A fórmula de Manning contém um coeficiente empírico função da rugosidade equivalente cuja estimativa correta nem sempre é fácil.

Na falta de uma teoria abrangente sobre os detalhes do microescoamento ao redor dos elementos de rugosidade essa estimativa requer perícia. A habilidade para estimar os coeficientes de rugosidade deve ser desenvolvida através da experiência e análise criteriosa de situações similares.

BARNES (1967) apresenta fotografias e dados descritivos para 50 tipos de canais, listando o coeficiente de rugosidade obtido por calibragem em cada caso.

CHOW (1959) apresentou tabelas extensas fornecendo valores numéricos e fotografias com valores de n .

LIMERINUS (1970) pesquisou uma relação entre os valores do coeficiente de rugosidade Manning e um índice do tamanho das partículas do leito. SCHLICHTING (1982) analisa os efeitos da rugosidade em escoamentos turbulentos e mostra a dificuldade em correlacionar as características geométricas dos elementos de rugosidade com o valor da rugosidade equivalente de areia.

STRICKLER (1923) analisa a relação entre o diâmetro das partículas de canais com leitos arenosos com o valor do coeficiente de Manning obtendo a relação

$$n = 0,0526d_{50}^{1/6} \quad (2.6)$$

onde d_{50} é a dimensão da malha da peneira que permite a passagem de 50% do material.

Resultados obtidos de estudos teóricos ou experimentos em laboratório muitas vezes não se aplicam em canais naturais por dois motivos. Primeiro porque as relações teóricas derivadas em laboratório são válidas apenas nas condições de partículas idênticas e na distribuição uniforme de elementos de rugosidade no canal; essa condição quase nunca ocorre em canais naturais. Segundo, porque a distribuição de velocidade na seção dos canais naturais influencia a distribuição das partículas do leito afetando o efeito da rugosidade.

PINTO et al (1997) apresentam o caso de canais com rugosidades não-uniformes. Neste caso pode-se determinar um coeficiente de rugosidade equivalente único para efeito do cálculo. Há várias hipóteses para a determinação da rugosidade equivalente, entre elas a proposta por Einstein e Horton (apud PINTO et al., 1997) que a velocidade média em todas as seções parciais e na seção total é a mesma. Sendo as rugosidades nos vários trechos do perímetro n_1, n_2, \dots, n_n a rugosidade equivalente será:

$$n = \frac{(P_1 n_1^{1.5} + P_2 n_2^{1.5} + \dots + P_n n_n^{1.5})^{2/3}}{P^{2/3}} \quad (2.7)$$

Sendo P_1, P_2, \dots, P_n os perímetros molhados parciais e P o perímetro molhado total ($P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$) como mostra a figura 2.1.

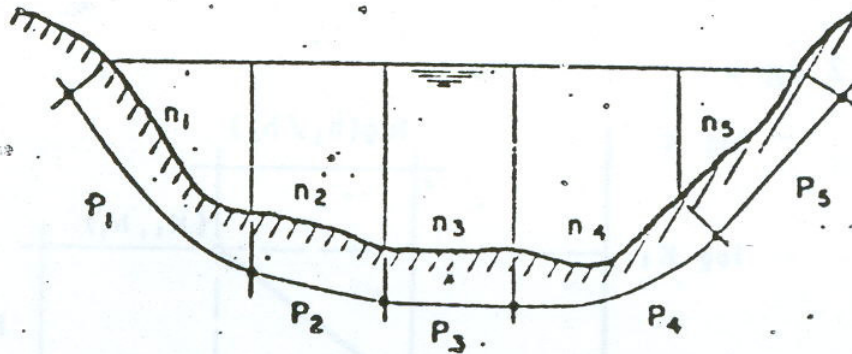


Figura 2.1: Seções parciais **Fonte:** Pinto et al, 1997

No caso de rios naturais, é comum a ocorrência de regiões com velocidades bastante diferentes entre si. Geralmente o canal principal no centro da seção apresenta velocidade superior as áreas laterais de pouca profundidade e cobertas de vegetação. Esta situação é em geral modelada com o uso dos canais de seções compostas, onde se distinguem as regiões do canal principal (centro) e planícies de inundações laterais como mostra a figura 2.2:

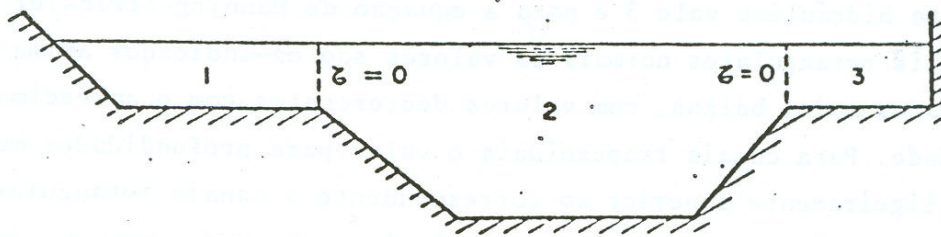


Figura 2.2.: Canais com seções compostas **Fonte:** Pinto et al, 1997

O cálculo nesse caso é efetuado subdividindo a seção e determinando independentemente a vazão correspondente a cada parcela, considerando inexistente a tensão tangencial nas superfícies limítrofes líquidas das subseções e ainda assumindo a mesma declividade da linha de energia em cada subseção. No caso figurado (3 subseções) a vazão total seria obtida por:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.8)$$

$$Q_i = \frac{A_i^{5/3}}{P_i^{2/3}} \frac{S_f^{1/2}}{n} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.9)$$

onde: A_i é a área da seção (m^2)

P_i é o raio hidráulico da seção (m)

n é o coeficiente de rugosidade ($m^{-1/3}s$)

S_f é a declividade (m/m)

Na avaliação do perímetro molhado P_i não se computa os contatos líquidos entre subseções.

STEPHAN e GUTKNECHT (2002) analisaram a influência na rugosidade causada pela vegetação aquática, particularmente as macrofitas submersas em toda a superfície livre. Essas plantas são muito flexíveis e mantêm um comportamento diferente dependendo da situação do fluxo. Os vórtices produzidos pela vegetação são tridimensionais e dispersos por toda seção e não são confinados a região próxima do contorno como no caso de rugosidades nas paredes.

Na presente dissertação procura-se demonstrar a viabilidade de estabelecer regressões entre uma medida da altura da vegetação e o coeficiente de rugosidade de Manning em planícies de inundação.

3. TECNOLOGIA A LASER

Mapas topográficos altimétricos da superfície da Terra promovem informações cruciais para uma série de aplicações científicas ambientais, militares e comerciais para o setor público e privado. Recentemente, o mapeamento a laser, conhecido como LiDAR (Light Detection and Ranging), tem se tornado uma ferramenta operacional bastante útil em empresas de mapeamento e aerolevantamento.

A utilização do laser como instrumento do sensoriamento remoto vem, na verdade, acontecendo há mais de 30 anos. Nas décadas de 60 e 70, vários experimentos demonstraram o poder do uso do laser em satélites, no mapeamento da superfície lunar, em monitoramentos atmosféricos na locação de estruturas subterrâneas, medida de distâncias e estudos oceanográficos. Na década de 80, a altimetria a laser passou a ser essencialmente feita através de instrumentos transportados por aeronaves.

O princípio de funcionamento do LiDAR está baseado na emissão de um feixe de laser no espectro infravermelho em direção à superfície terrestre.

Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor. Para cada feixe emitido é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave. A partir do tempo de percurso do laser é possível determinar a distância percorrida utilizando para tal a velocidade da luz. A posição, orientação e altitude da aeronave são determinados por sensores GPS. Uma vez processados os dados registrados pelo laser scanner, pelo GPS (Global Positioning System) e pelo INS (Inertial Navigation System), é possível gerar modelos digitais do terreno e da superfície da área levantada.

As especificações do equipamento utilizado no presente trabalho são listadas na tabela 3.1.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER ALTM	
Altitude de Operação	200 – 2000 m nominal
Precisão Vertical	<15 cm a 1200 m (1 sigma) <25 cm a 2000 m (1 sigma)
Ângulo de Abertura	Variável (0 a $\pm 20^\circ$)
Largura da Faixa de Perfilamento	Variável (0 a $\pm 0.72 \times$ altitude)
Frequência de Perfilamento	0 – 100 Hz, dependendo do ângulo de abertura
Precisão Horizontal	1/2000 x altitude (1 sigma)
Receptor GPS	Novatel Millennium
Taxa de Repetição do Pulso Laser	50 kHz
Divergência do Feixe	200m @ 0.66 mrad; 650m @ 0.2 mrad, nominal
Intensidade	Registra a intensidade do retorno dos sinais dos pulsos laser
Medidor de intervalo duplo de tempo	Simultâneos primeiro e ultimo retorno do pulso provindo de cada disparo de laser
Classificação do Laser	Classe IV (FDA CFR 21)
Requerimentos de Potência	28 VDC @ 35 ^A
Temperatura Operacional	10 – 35° C
Umidade	95%

Tabela 3.1: Especificações técnicas do equipamento a laser

O equipamento digital a laser funciona com alta precisão, 15 cm na altimetria e 50 cm na planimetria. Consegue em um único vôo obter entre 500.000 e 4.000.000 pontos por km², sendo que o mapeamento pode ser feito de dia ou de noite, resultando em uma alta produtividade. O processamento dos dados é bem ágil, sendo 100% digital.

4. ANÁLISE DE REGRESSÃO

4.1. Geral

A análise de regressão constitui-se em uma técnica de longa história e múltiplas aplicações, principalmente para estimar grandezas físicas que guardam uma relação causal com muitas variáveis das quais algumas são mais relevantes e outras menos relevantes são desconhecidas ou de difícil mensuração. Assim ao modelar sistemas físicos ou sociais complexos (como por exemplo uma bacia hidrográfica ou um ambiente econômico) a análise de regressão constitui-se em uma ferramenta poderosa para estimar a resposta desse sistema para um dado estímulo. Seja Y essa resposta e X o estímulo. Então dado que existem outros fatores além de X para definir Y o modelo resulta:

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (4.1)$$

onde ε é o erro do modelo resultante do fato de existirem outras variáveis causais além da função $f(X)$ ser em geral uma simplificação considerável da realidade.

O modelo (4.1) é também freqüentemente chamado de modelo “caixa preta” porque normalmente a função $f(X)$ não está diretamente relacionada com as leis físicas que regem o processo em pauta.

Quando essa relação é linear, embora a variável X possa ser uma transformação não linear de algum atributo que influi no valor de Y , dizemos que a dependência de Y com X constitui uma regressão linear simples, dado por.

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad (4.2)$$

Onde:

α e β são os parâmetros do modelo, constantes mas desconhecidos;

Y é a variável dependente;

X é a variável independente ou explicativa;

ε é o erro do modelo, que é uma variável aleatória

Na equação (4.2) $\alpha + \beta X = \hat{Y}$ é o componente determinístico e o erro ε representa o componente aleatório, correspondente às variações de Y que não são explicados pela parte determinística.

Evidentemente é possível que o modelo (4.2) incorpore mais de uma variável explicativa, sendo então, X e β vetores. Nesse caso o modelo é denominado regressão múltipla.

É importante frisar que na equação (4.2) X e Y podem ser transformações não lineares das grandezas físicas envolvidas.

Como exemplo, a expressão (4.3) é uma especificação não linear do componente determinístico.

$$\hat{Y} = \alpha X^\beta \quad (4.3)$$

Entretanto essa especificação pode torna-se linear ao tomar os logaritmos nos dois lados da equação, resultando:

$$\log \hat{Y} = \log \alpha + \beta \log X \quad (4.4)$$

que é linear em $\log \hat{Y}$ e $\log X$.

Vale a pena considerar neste ponto as hipóteses fundamentais adotados na análise de regressão simples.

Considere o modelo linear com uma variável explicativa dado por:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (4.5)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

Onde:

Y_i é o i -ésimo valor da variável resposta;

α e β são os parâmetros denominados coeficientes de regressão;

ε_i é o erro do modelo;

X_i é o i -ésimo valor da variável explicativa;

Sobre os componentes da equação (4.5) geralmente se assumem certas hipóteses que constituem a base para a análise estatística da regressão.

No caso mais comum essas hipóteses são:

- 1) ε_i e Y_i são variáveis aleatórias normalmente distribuídas;
- 2) $E(\varepsilon_i) = 0$ (erros de média nula);
- 3) $Var(\varepsilon_i) = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2$ (erros homoscedásticos)
- 4) $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0$ para $i \neq j$ (erros não correlacionados)
- 5) X_i são valores fixos não estocásticos

Pela expressão (4.5) resulta:

- 1) $E(Y_i) = \alpha + \beta X_i$
- 2) $Var(Y_i) = \sigma^2$

4.2. Estimativa dos parâmetros

Como os parâmetros α e β são desconhecidos utilizam-se os dados observados para obter estimadores a e b de α e β para:

- quantificar uma relação aproximada entre Y e X ; que melhor se ajuste aos dados;
- prever uma resposta Y_0 para um novo valor de X_0 , não incluído entre os dados de ajuste

Os estimadores mais utilizados na análise de regressão são os chamados estimadores de mínimos quadrados (OLS) que apresentam propriedades estatísticas bastante atraentes. O método determina os valores dos estimadores, de α e β tais que a soma dos quadrados dos resíduos, isto é os erros quando os verdadeiros parâmetros são substituídos por seus estimadores, seja mínima.

O método OLS tem uma longa história, tendo sido proposto por LEGENDRE (1805) embora existem evidências de ter sido empregado por C.F. Gauss já em 1796.

A hipótese teórica fundamental assume que os resíduos sejam independentes e identicamente distribuídos com média nula. Sob essa hipótese prova-se pelo teorema de Gauss-Markov (JOHNSTON, 1984) que os estimadores OLS são os estimadores lineares não tendenciosos de mínima variância.

Sejam a e b os estimadores de α e β , respectivamente. Então $e_i = Y_i - a - bX_i$ são os resíduos da regressão e o método OLS consiste em estimar a e b (que são variáveis aleatórias) de modo que

$$\sum e_i^2 = \sum (Y_i - a - bX_i)^2 = \text{mínimo} \quad (4.6)$$

Observa-se da equação (4.10) que $\sum e_i^2 = f(a, b)$ que terá um mínimo para:

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial a} = \frac{\partial \sum e_i^2}{\partial b} = 0 \quad (4.7)$$

Substituindo e_i^2 e efetuando as derivadas resulta:

$$na + (\sum X)b = \sum Y \quad (4.8a)$$

$$(\sum X)a + (\sum X^2)b = \sum XY \quad (4.8b)$$

As equações (4.8) são denominadas equações normais e sua solução fornece os valores de a e b . De posse dos valores de a e b é possível estimar valores de Y_0 correspondentes a X_0 por:

$$\hat{Y} = a + bX_0 \quad (4.9)$$

5. APLICAÇÃO E RESULTADOS

5.1. Geral

Como já foi exposto na introdução, o objetivo principal do trabalho é o estabelecimento de uma relação entre uma medida representativa da vegetação obtida a partir da tecnologia LiDAR e o coeficiente de rugosidade da Manning em planícies de inundação. A viabilidade do estabelecimento dessa relação será demonstrada utilizando um trecho do rio Iguazu entre União da Vitória e Porto Vitória no estado do Paraná. Essa região foi escolhida porque havia dados disponíveis de vôos já realizados e por existirem diversos estudos que definem com boa precisão o coeficiente de rugosidade para diferentes níveis de água na planície.

A comparação dos dados obtidos pelo LiDAR com os coeficientes de rugosidade calibrados nos estudos de remanso foi efetuado usando a técnica de regressão linear simples descrita na seção anterior, tendo como variável explicativa uma medida representativa da altura da vegetação detectada pelo LiDAR. Considerou-se como variável dependente o coeficiente de rugosidade de Manning para diferentes níveis de água na planície de inundação.

Todos os estudos de remanso efetuados no trecho (SUGAI, 1980; SUGAI et al., 1985; GROSZEWICZ et al., 1996; CASTANHARO, 2003) consideram 5 seções principais onde existem réguas linimétricas para controle de nível. No entorno dessas seções, mostradas na figura 5.1, foram coletados os dados obtidos pelo LiDAR e os coeficientes de rugosidade de Manning obtidos nos estudos de remanso.

Considerou-se para modelar a dependência entre o coeficiente de Manning e a altura da vegetação, por razões explicadas mais adiante, uma regressão simples do tipo log-linear

$$\lg n = \alpha + \beta \lg h + \varepsilon \quad (5.1)$$

onde n é o coeficiente de Manning

h é uma medida representativa da altura da vegetação

α e β são coeficientes

ε é o erro do modelo

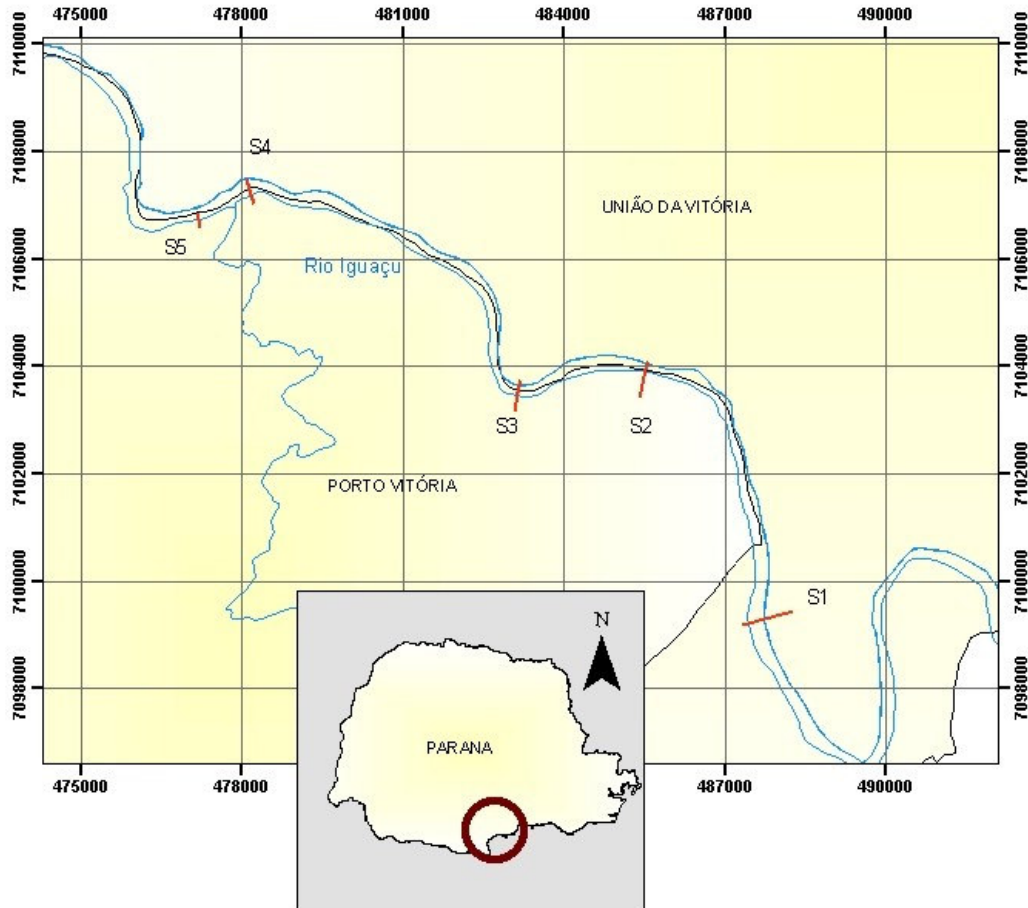


Figura 5.1: Seções transversais

5.2. Coeficientes de rugosidade locais

Inicialmente, dividiram-se as seções em trechos limitados por diferentes cotas e obtiveram-se valores de “ n ” distintos para cada trecho. Os estudos de remanso (CASTANHARO, 2003) estimavam uma rugosidade “ n ” equivalente média variável em função do nível de água na seção.

O coeficiente de rugosidade local por trecho da seção foi obtido invertendo-se a equação (2.7), resultando:

$$n_j = \left(\frac{\bar{n}_j^{-1,5} \sum_{i=1}^j P_i - \sum P_i n_i^{1,5}}{P_j} \right)^{2/3} \quad (5.1)$$

Onde \bar{n}_j é o coeficiente de rugosidade equivalente médio até o nível do trecho “ j ”, n_i é o coeficiente de rugosidade local no trecho “ i ” e P_i é a extensão do perímetro molhado do trecho “ i ”.

A equação (5.1) permite calcular sucessivamente os coeficientes de rugosidade locais para sucessivos trechos a partir da rugosidade média equivalente para cada nível e dos coeficientes de rugosidade locais anteriores. Estipulou-se para o primeiro trecho da planície de inundação o valor inicial calibrado por CASTANHARO (2003) para a primeira faixa da seção para a planície de inundação.

Os valores de \bar{n}_j eram tabelados em função da vazão e para convertê-los para faixas entre níveis de água foram utilizadas as curvas de descarga do projeto HG-175 (MULLER e CASTANHARO,2002). Os valores obtidos são mostrados na tabela 5.1.

Foram utilizadas quatro faixas em cada seção com exceção da primeira onde cinco faixas foram utilizadas.

Valores do coeficiente de Manning (n)					
Seção	Faixa	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)	\bar{n} (equiv.médio)	n (por faixa)
S1	N1	741,8-742,4	688	0,0367	0,0367
S1	N2	742,4-743,0	975	0,0355	0,0294
S1	N3	743,0-745,0	2125	0,0650	0,1200
S1	N4	745,0-746,0	2750	0,0835	0,2950
S1	N5	746,0-749,0	5000	0,2790	0,3910
S2	N1	741,0-742,2	750	0,0362	0,0362
S2	N2	742,2-744,0	1875	0,0500	0,0740
S2	N3	744,0-746,0	3375	0,1290	0,1660
S2	N4	746,0-748,1	5000	0,2790	0,8200
S3	N1	741,0-742,1	750	0,0362	0,0362
S3	N2	742,1-744,0	2062	0,0600	0,0760
S3	N3	744,0-746,0	3750	0,1500	0,2710
S3	N4	746,0-747,5	5000	0,279	0,4910
S4	N1	741,9	875	0,0356	0,0356
S4	N2	741,9-743,0	2000	0,0560	0,1300
S4	N3	743,0-744,0	3375	0,1290	0,5960
S4	N4	744,0-745,1	5000	0,2790	0,4550
S5	N1	741,8	875	0,0356	0,0356
S5	N2	741,8-743,0	2188	0,0690	0,2490
S5	N3	743,0-744,0	3625	0,1430	0,5030
S5	N4	744,0-744,8	5000	0,2790	0,5130

Tabela 5.1: valores do coeficiente de Manning por seção e trecho

5.3. Estabelecimento da regressão

5.3.1. Escolha do modelo

Para a forma de regressão foi adotado um modelo log-linear. Esse modelo tem uma longa tradição na modelagem de vários fenômenos físicos e no presente estudo foi escolhido, baseado nas seguintes considerações.

- A forma matemática da equação de STRICKLER (equação 2.5), obtido a partir de considerações dimensionais da fórmula de Manning.
- A inspeção de tabelas do coeficiente de rugosidade publicadas em manuais de hidráulica também sugere uma relação não linear entre essas grandezas.
- Tentativas de ajuste dos dados usados no presente trabalho indicam o modelo loglinear como o de menor dispersão.

Adotado o modelo log-log, foram estimados os coeficientes da regressão considerando $\lg n$ como variável dependente e $\lg h$ como variável explicativa, sendo n o coeficiente de Manning local de cada faixa e h uma dimensão característica da vegetação na mesma faixa. A partir da distribuição da altura da vegetação procurou-se obter uma medida representativa que fosse razoavelmente correlacionada com o coeficiente de rugosidade.

Foram efetuadas uma série de tentativas, para o estabelecimento de \bar{h} , considerando média, mediana, médias censuradas e quantis.

Obtiveram-se os melhores resultados em termos de ajuste da regressão linear utilizando uma média dos valores da altura da vegetação censurada em relação a profundidade da água na planície de inundação. Isto é:

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^N \min(h_i, h_{\max}) \cdot f(h_i) \quad (5.2)$$

Onde \bar{h} é a média censurada (medida representativa adotada)

h_i é a altura da vegetação

$f(h_i)$ é a frequência relativa de células com altura de vegetação h_i

h_{\max} a profundidade da água na planície de inundação

O valor \bar{h} calculada pela expressão (5.2) é denominada texto simplesmente de média censurada.

5.3.2. Consistência de dados

Do total de 21 pontos possíveis (ver tabela 5.1) só foi possível aproveitar 14 pontos na regressão. Isso se deve ao fato de que para 4 pontos (S1N1, S3N1, S4N1, S5N1) não se dispunha de dados do LiDAR, porque essas faixas estavam submersas na ocasião do voo. Outros 3 pontos (S1N4, S5N2, S2N4) foram eliminados por apresentarem-se bastante afastados da tendência geral da reta de regressão e foram considerados não representativos.

5.3.3 Estimativa dos coeficientes

Após a eliminação desses pontos os 14 pares de valores restantes, listados na tabela 5.2, foram utilizados na estimativa dos coeficientes da regressão pelo método OLS

Seção	n	h	lg n	lg h
S1N2	0,0294	0,412	-3,526761	-0,886732
S1N3	0,1200	1,438	-2,120264	0,363253
S1N5	0,3190	2,188	-1,142564	0,782988
S2N1	0,0362	0,372	-3,318696	-0,988861
S2N2	0,0740	0,908	-2,603690	-0,096511
S2N3	0,1660	1,140	-1,795767	0,131028
S3N2	0,0760	0,780	-2,577022	-0,248461
S3N3	0,2710	1,273	-1,305636	0,241376
S3N4	0,4910	1,042	-0,711311	0,041142
S4N2	0,1300	0,908	-2,040221	-0,096511
S4N3	0,5960	1,529	-0,517515	0,424614
S4N4	0,4550	0,880	-0,787458	-0,127833
S5N3	0,5030	1,310	-0,687165	0,270027
S5N4	0,5130	1,772	-0,667479	0,572109

Tabela 5.2: Valores das variáveis

Os valores obtidos para estimar os coeficientes da regressão foram:

$$a = -1,7438$$

$$b = 1,6031$$

Para validar a regressão estimada foram aplicados testes de significância dos coeficientes, da normalidade dos resíduos e da homoscedasticidade dos resíduos.

Para significância dos coeficientes foi utilizado o teste clássico de Student que resultou em um valor $p = 0,0009$ para o coeficiente $\beta = 0$, o que leva a rejeitar a hipótese nula $\beta = 0$ e a regressão é significativa.

Para testar a normalidade dos resíduos utilizou-se o teste também clássico do χ^2 que resultou em $\chi^2 = \sum (f_e - f_0)^2 / f_e = 0,2$, menor do que $\chi_{0,95}^2 = 3,84$ e portanto a normalidade dos resíduos não pode ser rejeitada.

Finalmente a homoscedasticidade dos resíduos foi testado com o teste de Glesjer (JOHNSTON, 1984) não sendo possível rejeitar a hipótese da homoscedasticidade dos resíduos.

5.3.4 Previsão do coeficiente de rugosidade

Uma vez validada a regressão, é possível utilizá-la para estimar o coeficiente de rugosidade em planícies de inundação similares, ou seja com elementos de rugosidade constituídos essencialmente de vegetação perene.

$$\hat{Y}_0 = 1,6031X_0 - 1,7438 \quad (5.3)$$

onde $Y_0 = \ln(n)$ e $X_0 = \ln(h)$

Para permitir uma avaliação da precisão dessa estimativa foram estabelecidos intervalos de confiança para um nível de significância de 95%.

O intervalo de confiança para previsões por regressão linear e sob as hipóteses usuais (erros independentes e normalmente distribuídos) é dado por (JOHNSTON, 1984):

$$Y_0 \in [a0b \pm t_{\alpha} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum x^2}}$$

Considerando $s=0,661$, $\Sigma x^2=3,2531$, $t=2,179$, $\bar{X} = 0,02726$, obtém-se os limites do intervalo de confiança dados na tabela 5.3 .

X_0	\hat{Y}_0	Y_{sup}	Y_{inf}
-1,2	-3,668	-2,081	-5,254
-1	-3,347	-1,788	-4,906
-0,8	-3,026	-1,491	-4,562
-0,6	-2,706	-1,189	-4,222
-0,4	-2,385	-0,882	-3,888
-0,2	-2,064	-0,570	-3,559
0	-1,744	-0,253	-3,235
0,2	-1,423	0,069	-2,916
0,4	-1,103	0,397	-2,603
0,6	-0,782	0,730	-2,294
0,8	-0,461	1,068	-1,991

Tabela 5.3: Limites dos intervalos de confiança

Embora a faixa de incerteza ainda seja ampla, acredita-se que a estimativa do coeficiente de Manning pelo procedimento proposto seja mais preciso que o uso de tabelas ou analogias com rios aparentemente similares. A comparação dos intervalos de confiança com os erros na estimativa do “n” no primeiro estudo de remanso efetuado por MILDNER-KAISER (1976) são uma clara demonstração dessa assertiva.

6. CONCLUSÕES

Como principal conclusão desse estudo, pode-se afirmar que a técnica LiDAR, pode contribuir significativamente para uma estimativa razoável do coeficiente de rugosidade de Manning em planícies de inundação. Para o estudo de caso o coeficiente de Manning pode ser estimado como sendo:

$$n = 0,175h^{1,603} \quad (6.1)$$

A comparação dessa equação com expressões clássicas para rugosidade de canais com fundo de areia, mostra claramente a diferença entre efeitos de uma vegetação submersa e de rugosidades tipo areia.

Para o objetivo de pesquisas futuras dentro da mesma linha propõe-se:

- Incorporar outras características geométricas da vegetação como variáveis explicativas e utilizar a técnica da regressão múltipla como ferramenta de análise

- Para permitir uma maior generalização dos resultados, recomenda-se ampliar o universo dos pontos coletados para outros locais com disponibilidade de dados do LiDAR.

Acredita-se que após um aprofundamento maior do tema proporcionado por pesquisas futuras, o procedimento proposto poder-se-á tornar útil na estimativa de curvas de remanso, obtenção de mapas de enchentes e avaliação dos efeitos de obras hidráulicas nos níveis de cheia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNES, N. H. Roughness characteristics of natural channels. U.S. Water Supply Paper, Washington, 1967.
- CASTANHARO, G.: Aplicação de Modelos Hidrodinâmicos no Contexto de Previsão de Afluências a Reservatórios, UFPR, 2003.
- CHOW, V. T.: Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill. 1959.
- GROSZEWICZ, R. C., ILLICH, I., KAVISKI, E.: Projeto HG-79, Análise do escoamento em regime não permanente no rio Iguçu entre Fluviópolis e Foz do Areia, CEHPAR, Curitiba, 1996.
- HENDERSON, F.M.: Open Channel Flow, MacMillian Company, 1966.
- JOHNSTON, J., Econometric Methods, McGraw-Hill, New York, 1984.
- LENCASTRE, A.: Hidráulica Aplicada, Edição Luso-Brasileira. 1992.
- LEGENDRE, A.M. Nourivelles Méthodes pour la Determination des Orbites des Cometes, Courcier, Paris, 1805.
- LIMERINUS: US Geological Survey, Manning Coefficient from Bed Roughness in Channels, Water Supply Paper, 1898 B, Washington, BC, 1970.
- MILDER – KAISER: Usina hidrelétrica Foz do Areia, Memorando de projeto nº 10, 1976.
- MULLER, I., CASTANHARO, G.: Projeto HG-175 Estudo de revisão do comportamento hidráulico do rio Iguçu no trecho entre União da Vitória e Foz do Areia, CEHPAR, Curitiba, 2002
- PINTO, N., NEIDERT, S., FILL, H., LAMBROS, D., REIS, F., TOZZI, M., OTA, J. Apostila de Mecânica dos Fluidos I e II, Engenharia Civil – UFPR, 1997.
- SCHLICHTING, H., Grenzschicht Theorie, 8. ed. G. Braun, Karlsruhe, 1982 .
- SPIEGEL, M.R., Estatística, McGraw-Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1993.
- STEPHAN, U., GUTKNECHT, D.: Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation, Journal of Hydrology, 269, 27-43, 2002.
- STRICKLER, A.: Contributions to the question of velocity formula and roughness data for streams, channels and close pipelines, 1923.
- SUGAI, M.: Influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de enchente em União da Vitória, COPEL, Curitiba, 1980.
- SUGAI, M., MASSUCCI, L. A., BUSETTI, D. C., FONSECA, A. dos S., Influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de enchente em União da Vitória: revisão e atualização, COPEL, Curitiba, 1985.