

XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE 2004

METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA AL FLUJO EN  
CAUCES DE MONTAÑA

*Jaime Ignacio Vélez Upegui (1), Lilian Posada García (2),  
Mónica María Montoya Cardona (3) y Elizabeth Montoya Martínez (4)*

Universidad Nacional, Colombia. Carrera 80 No. 65-223. Medellín –Colombia.

(1) [jivelezu@unalmed.edu.co](mailto:jivelezu@unalmed.edu.co), (2) [lposada@unalmed.edu.co](mailto:lposada@unalmed.edu.co), (3) [monicam3@yahoo.com](mailto:monicam3@yahoo.com), (4) [elimonmar@hotmail.com](mailto:elimonmar@hotmail.com)

**RESUMEN:** Se presenta una metodología para medir la resistencia al flujo en cauces de montaña. Esta metodología se basa en la medición del caudal con el flurómetro que mide el tiempo de viaje de trazador (Rodamina) y su concentración en el tiempo desde la inyección; y permite estimar la velocidad media del flujo en el tramo representativo de la quebrada. Con base en la geometría de las secciones transversales en los extremos del tramo se obtiene la pendiente media de la línea de energía. Así se estiman características representativas del tramo y no puntuales que permiten caracterizar con mejor aproximación las condiciones medias hidráulicas del tramo y a partir de estos parámetros representativos del tramo ( $V$ ,  $Q$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $R_H$ ), se procede a estimar el coeficiente de rugosidad de Manning. Esta metodología, se aplicó en un cauce de montaña en el centro de Antioquia, Colombia y se obtuvieron unos valores del coeficiente de Manning ( $\eta$ ) sensiblemente mayores a los obtenidos con Posada (1998). La diferencia entre los valores encontrados se ha interpretado como la evidencia de la disipación de energía debida a las formas del lecho.

**ABSTRACT:** A methodology to measure the resistance to flow in mountain stream is proposed. This methodology is based on discharge measurement through fluorometer that gauge tracer travel time (Rodhamine) and its concentration in time from injection. Besides, methodology lets evaluate flow average speed in a stream representative stretch. An average energy line slope is obtained with base on stretch extremity cross-sectional geometry. Thus stretch representative values (non precise) allow characterizing with better approach the stream hydraulic average conditions. The roughness using Manning's equation is evaluated considering these stretch representative parameters ( $V$ ,  $Q$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $R_H$ ).

This methodology was applied in a mountain stream in the Antioquia, Colombia. Additionally, greater values of  $\eta$  - different referenced in literature - were obtained. The difference between found values and literature values has interpreted as a consequence of the dissipation of energy due to the bedforms role on the hydraulic behaviour.

**PALABRAS CLAVES:** Metodología cauces de montaña, secuencia escalón – pozo, resistencia al flujo.

## ANTECEDENTES

En Colombia predominan los cauces de montaña. La intervención de este tipo de cauces es poco acertada debido a la gran complejidad de las variables que intervienen en la dinámica del flujo y la ecología. Adicionalmente, las cuencas de alta pendiente, en general, se encuentran poco instrumentadas; por tanto, no se cuenta con registros históricos hidrométricos y ecológicos que ayuden al análisis o modelamiento hidrológico e hidráulico de estos cauces para lograr comprender el comportamiento de las variables involucradas y así tener mejores elementos en la selección de alternativas de solución a los diferentes problemas presentados en una quebrada.

El estudio de los cauces de montaña, se ha tratado mediante la aplicación de teorías de la hidráulica tradicional que generalmente son extrapoladas por similitud a las variables de estos. Lo anterior se debe a que hasta el momento no se ha desarrollado un modelo de simulación de flujo para “Ríos de montaña o alta pendiente” y sólo existen ecuaciones empíricas obtenidas a partir de valores locales que pueden ser aplicadas con cierto margen de error en condiciones similares.

Tradicionalmente, la ecuación de Manning ha sido utilizada para la evaluación del coeficiente de rugosidad en cauces de montaña:

$$V = \frac{1}{\eta} \cdot R_H^{2/3} \cdot S_F^{1/2} \quad (1)$$

Donde:  $V$  es la velocidad promedio de la sección transversal, en[m/s]

$R_H$  es el radio hidráulico de la sección transversal, en [m].

$S_F$  es la pendiente de la línea de energía, se supone en este caso igual a la pendiente del cauce en un tramo dado.

Como se puede observar, las variables asociadas a la determinación del coeficiente de rugosidad, exceptuando la pendiente de la línea de energía, se dan en términos de la sección transversal del cauce, es decir, datos puntuales hallados en campo en un tramo recto (tanto en planta como en perfil) sin tener en cuenta la geomorfología de la quebrada y el comportamiento general de esta. Los valores encontrados con la metodología tradicional son valores ideales que poco revelan o reflejan las condiciones reales de los cauces de alta pendiente, subestimando el coeficiente de rugosidad y despreciando la resistencia al flujo debida a las formas del lecho.

Al aplicar la metodología tradicional para estimar el coeficiente de rugosidad, pueden resultar diseños hidráulicos sobredimensionados que alteran las características naturales de las quebradas de montaña.

## PROPUESTA METODOLÓGICA

Con base en la recopilación bibliográfica, el trabajo de campo y las necesidades de la región, se plantea una metodología que tiene como objetivo principal estimar la resistencia al flujo en cauces de montaña, basada en el análisis geomorfológico e hidráulico en un “tramo representativo” de la corriente.

### CAUDAL DEL TRAMO

Para la medición del caudal del tramo en cauces de alta montaña se sugiere el uso del método de trazadores, ya que estos permiten tener una mejor aproximación al considerar los tiempos de viaje de todas las partículas del flujo y por tanto las características del tramo (irregularidades, formas del lecho, entre otras). En el presente trabajo se usó un flurómetro el cual mide la concentración de la rodamina (sustancia de concentración conocida). Para la estimación del caudal se utiliza la siguiente expresión:

$$Q[m^3/\min] = \frac{1000 \cdot m[g]}{\int C \cdot dt [ppb \cdot \min]} \quad (2)$$

Donde.  $Q$  es el caudal medido

$m$  es masa del trazador (rodamina) inyectado  
 $C$  es la concentración del trazador (rodamina)

#### VELOCIDAD PROMEDIA DEL TRAMO

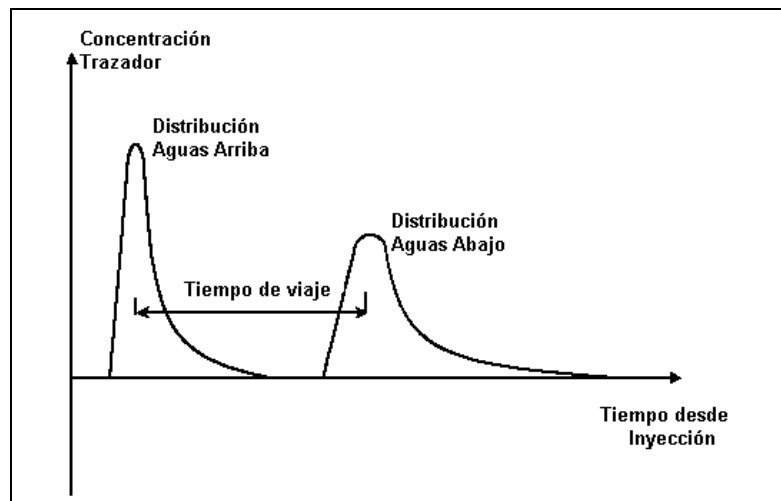
La velocidad promedio en el tramo se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$\bar{V} = \frac{L}{T} \quad (3)$$

Donde:  $L$  es la longitud del tramo, en [m]. Esta variable tiene en cuenta el patrón de alineamiento del cauce y debe medirse por el thalweg (línea de aguas de máxima profundidad de la corriente).

$T$  es el tiempo de viaje, en [s]. Se obtiene mediante la medida del caudal con el trazador, como la longitud al centroide (min) de la curva de concentración vs. Tiempo. Físicamente es el tiempo que tarda en llegar de un punto a otro el centroide de la onda de concentración (Figura 1).

Figura 1 Esquema de tiempo de viaje para el cálculo de la velocidad



#### ÁREA DE LA SECCIÓN DEL TRAMO.

El área representativa de la sección del tramo  $\bar{A}$ , se determina haciendo uso de la ecuación de continuidad, así:

$$\bar{A} = \frac{\bar{Q}}{\bar{V}} \quad (4)$$

Siendo:  $\bar{Q}$  es caudal medio del tramo hallado con trazadores [ $m^3/s$ ]

$\bar{V}$  es la velocidad media del tramo [m/s]

#### ANCHO MEDIO DEL TRAMO

El ancho promedio del tramo representativo del cauce en estudio se puede evaluar haciendo uso de fotografías aéreas o digitales, de la siguiente manera:

$$\bar{W} = \frac{A_L}{L} \quad (5)$$

Donde:  $A_L$  es el área, vista en planta, del cauce en la longitud del tramo de estudio, en [ $m^2$ ].

$L$  es la longitud del tramo, en [m].

Cabe mencionar que esta manera de determinar el ancho promedio es muy práctica cuando no se tiene mucha información de la quebrada. Sin embargo, si no se tienen fotografías aéreas o digitales, el ancho promedio se mide directamente en campo.

### PERÍMETRO MOJADO DEL TRAMO

Se calcula en términos del ancho promedio del tramo dependiendo de la sección dominante en los cauces. En este caso se considera una sección trapezoidal, para la cual se conoce:

$$\overline{P}_e = \overline{W} - 2 \cdot Z \cdot \overline{Y} + 2 \cdot \overline{Y} \sqrt{Z^2 + 1} \quad (6)$$

Donde:  $\overline{W}$  es el ancho promedio del tramo, en [m].

$Z$  es el factor de inclinación del talud del cauce.

$Y$  es la profundidad del agua en [m].

En general, para cauces de montaña el ancho promedio del tramo para caudales medios es mucho mayor que la profundidad media del flujo ( $W \gg Y$ ). Por lo tanto, el perímetro mojado del tramo se puede aproximar, para efectos prácticos al ancho promedio del cauce en el tramo representativo, luego:

$$\overline{P}_e \approx \overline{W} \quad (7)$$

### RADIO HIDRÁULICO DEL TRAMO

El radio hidráulico representativo del tramo  $R_H$  se determina a partir del área y el perímetro promedio del tramo

### PENDIENTE DEL TRAMO

La pendiente de la línea de energía del tramo, se asume igual a la pendiente del cauce medida por el thalweg (línea de aguas de máxima profundidad de la corriente). Esta pendiente se calcula como el cociente entre la diferencia de cotas al inicio y al final del tramo y la longitud del mismo. Las cotas se determinan con nivel de precisión.

### TAMAÑO MEDIO DEL SEDIMENTO ( $D_{50}$ )

Se obtiene a partir del conteo de piedras de Wolman o de la granulometría de una muestra representativa del fondo del cauce.

### COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING:

El coeficiente de rugosidad de Manning del tramo se evalúa teniendo en cuenta las variables del tramo, así:

$$\eta = \frac{1}{\overline{V}^{5/3}} \cdot \left( \frac{\overline{Q}}{\overline{W}} \right)^{2/3} \cdot (\overline{S}_T)^{1/2} \quad (8)$$

Donde:  $\overline{V}$  es la velocidad promedio del tramo de estudio, en [m/s]

$\overline{Q}$  es el caudal en el tramo, en [m<sup>3</sup>/s]

$\overline{R}_H$  es el radio hidráulico del tramo, en [m]

$\overline{W}$  es el ancho promedio del tramo, en [m]

$\overline{S}_T$  es la pendiente del tramo.

Como puede verse con la metodología propuesta se tienen en cuenta los parámetros del tramo y por tanto el coeficiente de Manning considera la resistencia al flujo debida tanto a las formas como a las partículas individuales de sedimento.

## APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Esta metodología se aplicó a la quebrada La Montañita, en Antioquia (Colombia), en la que se identificó claramente como patrón morfológico la secuencia escalón – pozo (Figura 2). Se realizaron mediciones (velocidad, área, secciones transversales, pendiente, caudal) que permitieron estimar el coeficiente de rugosidad de la corriente según la metodología descrita anteriormente. También se calculó el coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Posada (1998), en sistema internacional de unidades, dado que esta fue calibrada para la región Andina Colombiana:

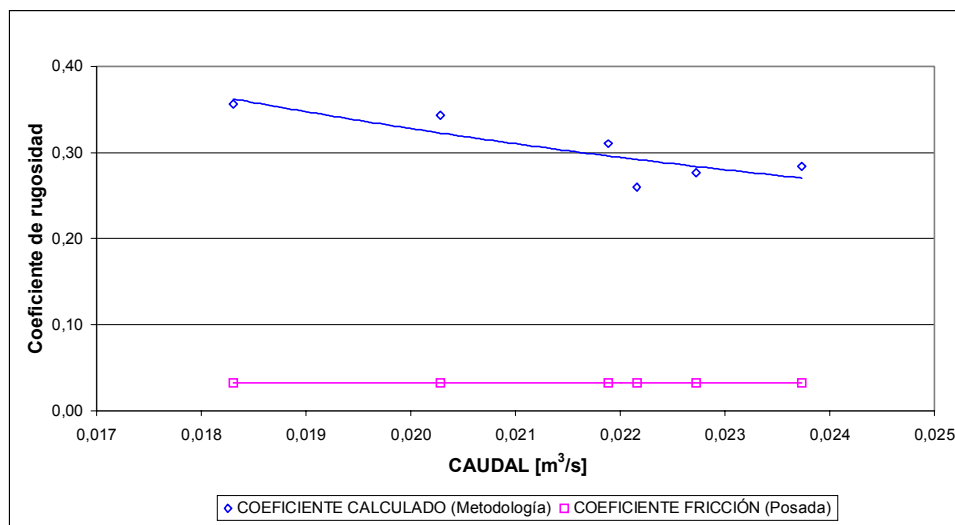
$$\eta = 0.0487 \cdot D_{50}^{1/6} \quad (9)$$

Los resultados se presentan en la figura 3.

Figura 2 Secuencias escalón - pozo



Figura 3 Coeficiente de rugosidad calculado y coeficiente de fricción para un caudal dado.



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al comparar los coeficientes de rugosidad medidos utilizando la metodología planteada con los calculados en función del tamaño medio de las partículas (Posada, 1998) se encontró una diferencia que puede atribuirse a la rugosidad debida a las formas del lecho, en este caso las secuencias escalón – pozo, que no son explícitamente consideradas en la ecuación de Manning . Por lo tanto, se sugiere que la rugosidad total presente en el cauce tiene una componente debida los granos individuales del lecho y otra de mayor magnitud debida a las formas identificadas en el cauce. Esta macrorugosidad puede interpretarse como una forma de disipación de energía del flujo en las secuencias escalón - pozo.

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{GRANOS} + \eta_{FORMA} \quad (10)$$

Donde  $\eta_{TOTAL}$  es el coeficiente de Manning obtenido a partir de la velocidad medida con flurómetro,  $\eta_{GRANOS}$  es el coeficiente de Manning obtenido a partir de la expresión (9) de Posada (1998), y  $\eta_{FORMA}$  es el coeficiente de rugosidad que representa la resistencia al flujo debida a las morfologías del cauce (en este caso se refiere a las secuencias de escalón – pozo).

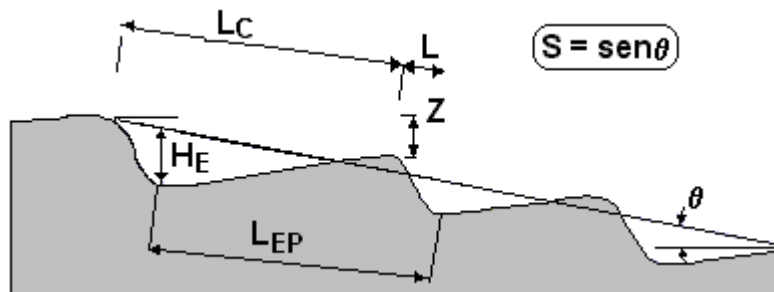
En la literatura se encuentran relaciones que permiten estimar la rugosidad debida a las formas del lecho cuando estas son relativamente pequeñas y a veces móviles. Sin embargo, en los cauces de montaña estas formas son grandes y su movilidad más lenta, por lo tanto las expresiones encontradas en la literatura no representan adecuadamente esta macro rugosidad.

Rápidamente puede verse que a medida que aumenta el caudal la resistencia al flujo que generan las formas disminuye, pues estas parecen pequeñas con respecto a profundidades grandes. Por tanto, existe una relación inversamente proporcional entre el coeficiente de rugosidad debido a las formas y el caudal (Figura No. 3). También puede verse que a medida que aumenta la pendiente la resistencia al flujo debida a las formas debe aumentar para disipar la velocidad y por tanto el coeficiente debido a las formas debe ser mayor.

Al correlacionar los parámetros de resistencia al flujo (longitud entre crestas,  $L_C$ ; altura del escalón,  $H_E$ ; longitud entre pozos,  $L_{EP}$ ; etc.) para cada tramo con las características morfológicas y geométricas de la secuencia escalón pozo (Figura 4) y los elementos del lecho, pudo verificarse que en los cauces de Antioquia también es válida la relación encontrada (expresión 11) por Wohl y Grodek (1994) en la cuenca de Nahal Yael (Israel) y por D’Agostino y Lenzi (1998) para el Río Cordon, Río Caserine y el Río Val Sorda (Italia).

$$S = a \cdot \left( \frac{H_E}{L_C} \right)^B \quad (11)$$

Figura 3 Parámetros de la secuencia escalón – pozo



De esta manera, puede intuirse que la rugosidad debido a las formas es función de:

$$\eta_{FORMA} = f \left( \frac{1}{Q}, \frac{H_E}{L_C} \right) \quad (12)$$

Luego podría plantearse una expresión para el cálculo de la rugosidad debida a las formas de la siguiente forma:

$$\eta_{FORMA} \approx \frac{f}{Q^\beta} \cdot \left( \frac{H_E}{L_C} \right)^\alpha \quad (13)$$

Donde:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $f$  son constantes que dependen de la cuenca. Esta expresión se encontró como una primera aproximación para explicar la relación entre el coeficiente de resistencia al flujo debido a las formas encontrado con la metodología y las relaciones encontradas en la literatura para las secuencias escalón pozo,

sin embargo se aconseja no utilizar esta expresión hasta que esta se valide con una serie de datos más amplia (en más cuencas). Las relaciones encontradas invitan a realizar un estudio más detallado de las formas y su relación con el coeficiente de forma.

## CONCLUSIONES

La importancia de esta metodología radica en conocer el papel de las formas del lecho en la resistencia al flujo al considerarlas como principal mecanismo disipador de energía y generador de micro ecosistemas. Por tanto, comprender y reconocer su papel en el comportamiento de los cauces de montaña es de vital importancia para el ecosistema de los mismos: su ecología, su hidráulica y su morfología. Al validar el papel de las formas en estos cauces se replantean las diversas alternativas de solución a los problemas generados en el entorno de los cauces de montaña que no alteren el equilibrio natural de estos.

Al considerar que la hidráulica de los ríos de montaña no debe ser puntual, ya que las condiciones cambian constantemente tanto espacial como temporalmente y las variaciones de las características entre dos puntos son grandes (por ejemplo, velocidades casi nulas en los pozos y muy altas en los escalones), una representación adecuada del comportamiento hidráulico de un cauce, debe tener en cuenta mediciones en todo el tramo representativo. Así la velocidad debe corresponder a la velocidad media desde el punto inicial de la secuencia hasta el punto final, el ancho y las profundidades deben medirse para el tramo teniendo en cuenta la geoforma disipadora de energía (secuencia escalones – pozos).

La metodología propuesta para relacionar la resistencia al flujo con los rasgos y patrones morfológicos de los cauces de montaña, puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Selección de quebradas de alta pendiente. Las geoformas (formas en el lecho) encontradas en la literatura que ejercen resistencia al flujo son, en orden decreciente de pendiente, las secuencias escalón – pozo, cruce – pozo, rizos, dunas. En los cauces observados en Antioquia la geoforma predominante es la secuencia escalón – pozo, por tanto, la parte de la metodología para las geoformas está implementada sólo para esta secuencia.
2. Seleccionar los tramos en los que se harán las mediciones. Para escoger un tramo representativo se hace un recorrido de la quebrada en su zona de alta pendiente y se observa cual es la geoforma predominante en el cauce y por tanto la principal generadora de la resistencia al flujo. Se selecciona un tramo que presente características geomorfológicas similares y que contenga una buena sucesión de geoformas (más de 5 consecutivas).
3. En cada tramo, tomar mediciones frecuentes de caudal y velocidad, con el flurómetro, en un período de tiempo largo (varias estaciones).
4. Para cada caudal (cada visita al campo) medir los parámetros morfométricos.
5. Hallar relaciones geométricas que representen los rasgos morfológicos.
6. Calcular velocidades y coeficientes de rugosidad con las expresiones mostradas anteriormente.
7. Comparar las velocidades y los coeficientes de rugosidad medidos con los calculados para seleccionar el que represente mejor la resistencia al flujo debida a la fricción con el fondo.
8. Realizar una correlación entre el caudal y los coeficientes de rugosidad.
9. Hallar la rugosidad debida a las formas e integrarla con lo encontrado en los pasos 5 y 8 para encontrar una expresión que se aproxime a la ecuación (13) o una nueva expresión que relacione la hidráulica de los cauces de montaña con la geomorfología de los mismos.

Las características hidráulicas corresponden a la resistencia del flujo, la velocidad y el caudal considerando que en cauces de alta pendiente su medición se hace difícil debido a la gran variabilidad temporal.

Este trabajo es sólo una parte del proceso necesario para llegar a relacionar matemáticamente los rasgos y patrones morfológicos de los cauces de montaña con los parámetros de la resistencia al flujo, para esto se requiere un extenso trabajo de campo que permita llegar a generalizar resultados comunes en estos tipos de cauces.

## PAUTA Y RECOMENDACIÓN

Para un adecuado manejo de un cauce de montaña y sus zonas ribereñas se sugiere conocer que este tiene unas morfologías propias que sirven de mecanismo de disipación de energía. El entendimiento y estudio de estas morfologías es un importante factor a considerar a la hora de intervenirlos. Los patrones que presentan las secuencias de escalones y pozos están asociados con un patrón topográfico que juega un papel muy importante en la hidráulica: la pendiente del cauce. La relación entre la pendiente entre crestas, la longitud entre pozos y la altura del escalón depende de la cuenca en consideración, y de las necesidades de disipación de energía que el cauce tenga.

## AGRADECIMIENTOS

Al postgrado de Aprovechamiento de Recursos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, por facilitar los medios para el desarrollo adecuado de este trabajo y a todos aquellos que contribuyeron de manera especial con la ejecución del mismo. A Grant (Oregon State University, USA), Montgomery (University of Washington, USA), D'Agostino (Universidad de Padua, Italia) por facilitarnos parte de la bibliografía acerca del tema.

## BIBLIOGRAFÍA

- D'Agostino, V.; Lenzi, M. A. (1998) “La massimizzazione della resistenza al flusso nei torrenti con morfología a step-pool”. XXVI Convengo di hidráulica e costruzioni idrauliche. Catania, 9 – 12 settembre, p. 281 – 293.
- Grant, G. E., Swanson, F. J. y Wolman, M. G. (1990) “Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon”. Geological Society of America Bulletin. Vol. 102, p. 340-352.
- Montgomery, D. R. y Buffington, J. M., (1997) “Channel-reach morphology in mountain drainage basins”. Geological Society of American Bulletin. Vol. 109, No. 5, p. 596-611.
- Montoya, E y Montoya, M. (2003) “Rasgos y patrones morfológicos de los cauces de montaña”. Trabajo dirigido de grado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín
- Posada, J. E. (1998) “Determinación de coeficiente de rugosidad en canales naturales. Trabajo dirigido de grado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín
- Wohl, E. E., y Grodek, T. (1994) “Channel bed – steps along Naha Yael, Negev desert”, Israel. Geomorphology. Vol. 9, p.117-126.