

Selección de Velocidades y el Factor Sedimentación en los Canales.

POR

JULIO JUL

Experimentos llevados a cabo por Kennedy en el canal de Bari Doab, Punjab, demostraron que canales de diversas dimensiones no sedimentan ni corroen su cama mientras la velocidad media mantenga una relación definida con la altura del agua en el canal.

La velocidad crítica V , según la definición de Kennedy, es aquella velocidad media con que una altura de agua conocida d mantendrá el canal en buen estado. Esta velocidad crítica la expuso en la ecuación siguiente:

$$V = cd^m = 0.84c^{0.64} \text{ en la que } V \text{ es la velocidad en pies por segundo.}$$

c y m , valores que varían con la calidad del sedimento en suspensión.

Es decir, que un canal cuya base no se embanca ni sufre erosión alguna, la velocidad media V no depende necesariamente del ancho del canal sino que aumenta o disminuye con una mayor o menor profundidad de agua como puede apreciarse por el cuadro N.º 1.

CUADRO N.º 1

Altura agua	Velocidades pies-segds.	Altura agua	Velocidades pies-segds.
1	0.84	6	2.64
2	1.39	7	2.92
3	1.70	8	3.18
4	2.04	9	3.43
5	2.35	10	3.67

La interpretación de estos experimentos es la siguiente: que si tomamos en consideración dos canales con una misma altura de agua y con una velocidad media común, pero uno de ellos de mayor ancho y, por consiguiente, con descarga superior, entonces ambos canales tendrán el mismo poder para transportar sedimento, porque el número de los pequeños remolinos (upward eddies), que son los que realmente soportan en suspensión el sedimento, está en proporción al ancho y por ende al volumen de agua en el canal. En cambio, si se aumenta la altura o volumen de agua en uno de los canales, conservando la velocidad anterior, tendremos que el número y poder de los remolinos con un mayor volumen de agua donde ejerce su acción no será suficiente para sostener en suspensión la misma proporción de sedimento.

Habría, pues, que elevar la velocidad para compensar la pérdida en la fuerza de transporte evitando de esta manera el embanque del canal.

Por el cuadro N.2, cálculo meramente ilustrativo y a base de una descarga aproximada de 42 metros cúbicos por segundo, (1400 pies cúbicos por segundo) pueden verse los casos comparados.

CUADRO N.º 2

Columna N.º	Ancho-medio pies	Altura pies	Sección pies ²	Vel. crít. pies-segds.	Descarga pies ³
1	88.4	6	530.3	2.64	1.400
2	176.8	6	1060.6	2.64	2.800
3	117.8	9	1060.6	2.64	2.800
4	90.7	9	816.3	3.43	2.800

Es decir, que las constantes c y m de la ecuación de Kennedy que en resumen son los valores que guardan relación con los pequeños remolinos, mantienen su carácter de tales en la columna N.º 1, 2 y 4 y fallan en la 3. La velocidad crítica necesaria para llenar las exigencias de la ecuación cuando el canal lleva su carga máxima de sedimento sería 3.43 pies-segds. y no la de 2,64. En otras palabras, tenemos que con esta última velocidad el canal se aconcharía mientras que con la velocidad de 3.43 pies-segds. se conservaría en su estado ideal.

También y para poner de relieve la influencia que ejerce la calidad del sedimento en suspensión sobre la velocidad del agua, consideremos dos canales, idénticos

en sección, ambos con un coeficiente de fricción $n = 0.0225$ que derivan de dos ríos, pero cuyas aguas transportan sedimento de distinta composición. Citaremos para el caso los mismos experimentos de Kennedy en el Punjab y su aplicación a las cifras deducidas por R. B. Buckley en el río Indus que alimenta los canales en Sind. Se supone que en este último río el sedimento en suspensión es de una contextura más fina, más liviana, arenilla delgada y, por consiguiente, la velocidad crítica requerida para trasladar esta arenilla en suspensión, menor que en los derivados del Punjab. El cuadro N.º 3 ilustra el caso.

CUADRO N.º 3

Velocidad crítica aceptada en el Punjab y en Sind insensible al factor sedimentación.

Velocidad crítica Pies-segds. Col. 1	Altura de Agua	Radio Medio	Pendiente solicitada para producir la Vel. en Col. 1	
			Unidad 1 en	Seno S
En el Punjab .. 3.18	8.0	4.5	3.500	0.0002857
	8.0	7.5	6.600	0.0001515
En Sind 2.38	8.0	4.5	5.800	0.0001724
	8.0	7.5	12.400	0.0000806

Mientras la pendiente en el canal sacado del Punjab es 1 en 3500 y la velocidad crítica 3.18 (casi un metro por segundo), en Sind un canal de las mismas dimensiones con aguas del río Indus solicita una pendiente mucho más moderada 1 en 5800 y velocidad crítica de 2.38 pies-segds. (0.725 metros por segundo). La velocidad crítica en Sind es sólo un 75% de la velocidad crítica en el Punjab.

Por correlación se evidencia también que canales grandes de radios medios considerables, anchos en proporción a su altura de agua se conforman con pendientes suaves, mientras que canales chicos de menor radio medio, es decir, angostos y profundos requieren pendientes más fuertes para alcanzar idéntico estado ideal de conservación.

El infrascrito calculó una serie de cuadros basados en la ecuación $V = cd^m$ con valores experimentales de c y m que elevaron la velocidad crítica a un 40% sobre la cifra primitiva de Kennedy. Al lado de los cuadros se estimó la velocidad de Ganguillet y Kutter para arribar a la combinación Kutter-Kennedy

$$V = \left\{ \frac{\frac{1.811}{n} + 41.65 + \frac{0.00281}{S}}{1 + \left\{ 41.65 + \frac{0.00281}{S} \right\} \frac{n}{\sqrt{R}}} \right\} \sqrt{R S}$$

haciendo uso de un diagrama construido ex-profeso por el autor a una escala de 0.1 Pulgada por unidad de «C» para precisar el valor del coeficiente hasta el primer decimal. Los valores de C sacados de este diagrama interpolando S, R y n son lo suficientemente aproximados para evitarse el engorroso cálculo por su fórmula numérica

$$C = \frac{a + \frac{1}{n} + \frac{m}{s}}{1 + \left(a + \frac{m}{s} \right) \frac{n}{\sqrt{R}}} = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{s} + \frac{1.811}{n}}{1 + \left(41.65 + \frac{0.00281}{S} \right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

sustituyendo este valor en la fórmula de velocidad en su carácter más simple $V = CV\sqrt{RS}$. El coeficiente de fricción se ha fijado en $n = 0.0225$ para un canal de tierra en buenas condiciones.

Estos cuadros, objeto original de los cuales fué investigar velocidades adecuadas capaces de producir un proceso de aconchamiento en grande escala para las obras en proyecto de mejoramiento de los bajos de Napier, Nueva Zelandia, ilustran la ventaja evidente de la combinación Kutter-Kennedy sobre otra fórmula sujeta al empleo reducido a los límites de su propia construcción empírica cuando se quiere evitar el riesgo probable de un mayor costo de mantención del canal en limpia. De este estudio se deduce la influencia que ejerce la relación altura de agua y velocidad sobre el factor aconchamiento, erosión y el radio medio máximo para los canales de tierra. Es decir, que se contemplan dos de los factores decisivos en la vida de un canal para que no se «borre» ni se «rompa» con el trascurso del tiempo, los factores erosión y sedimentación.

El método de cálculo es el siguiente y tomaremos el primer caso, la columna 1 del cuadro N.º 4. La velocidad de Kennedy con una altura de agua de 3 pies es $V = cd^m = 0.84 \times 3^{0.64}$

$$\log V = \log 0.84 + 0.64 \log 3 = \bar{1}.92428 + (0.64 \times 0.47712)$$

$$V = 1.70 \text{ mas el } 40\% =$$

$$V = 1.70 + 0.68 = 2.38$$

Con una descarga de 7000 pies cúbicos la sección de canales

$$\frac{7000}{2.38} = 2941.2 \text{ pies cuadrados}$$

$$\text{el ancho medio} = \frac{2941.2}{3} = 980.4 \text{ pies}$$

$$\text{con talud } \frac{1}{2} : 1 \text{ el ancho de fondo} = 980.4 - 1.5 = 978.9 \text{ pies}$$

$$\text{el perímetro mojado } 978.9 + 6.7 = 985.6$$

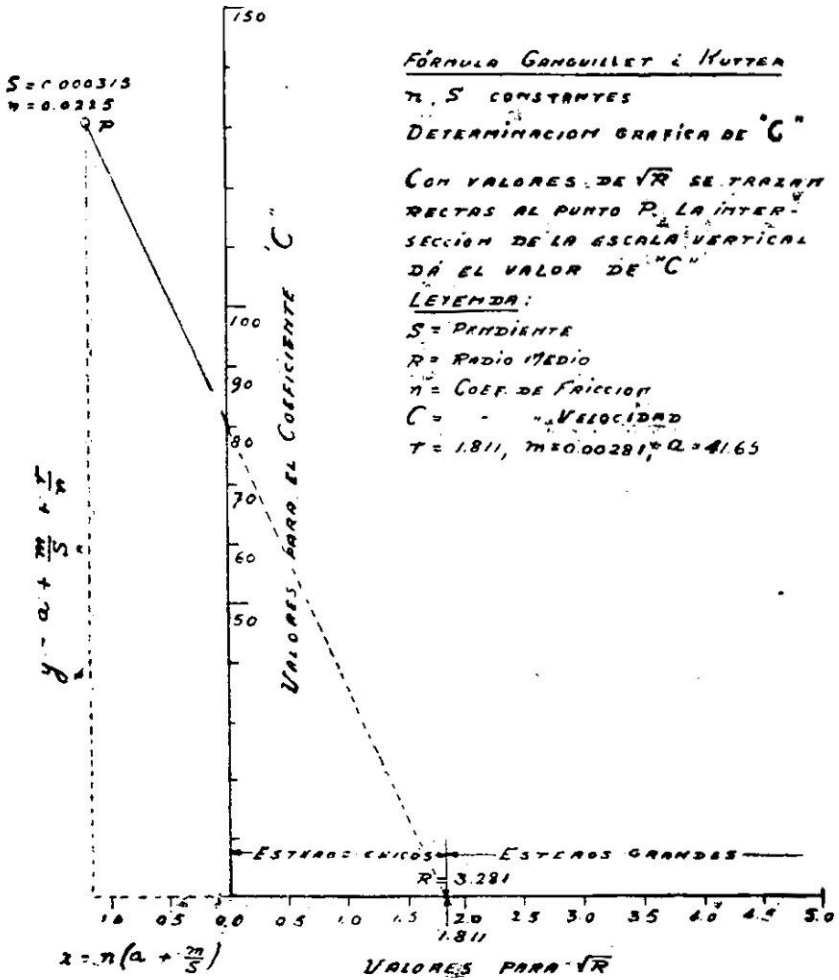
$$\text{el radio medio } R = \frac{1941.2}{985.6} = 2.984$$

$$\sqrt{R} = 1.728$$

Para estimar la velocidad de Kutter se toma el valor $\sqrt{R} = 1.728$ en la escala horizontal del diagrama y desde este punto se traza una recta al punto P, intersección de la pendiente $S = 0.000315$ con el coeficiente de fricción $n = 0.0225$. Esta recta corta la escala vertical correspondiente a los valores del coeficiente de velocidad C en 78.8 luego sustituyendo estas cifras en la fórmula $V = C\sqrt{RS}$ tenemos para la velocidad

$$V = 78.8 \sqrt{2.984 \times 0.000315} = 2.41 \text{ pies-segundos.}$$

Por el cuadro N.º 4 columna 3, vemos que con una descarga de 7000 pies cúbicos (198 metros cúbicos) y pendiente uniforme la velocidad de Kutter disminuye a los nueve pies (2.74 metros) de altura de agua comparada con la velocidad de Kennedy,



o sea, que si se selecciona únicamente la fórmula de Kutter sin alterar la pendiente, el canal bajo esta velocidad sufriría un proceso de aconchamiento. En la columna 4 cuadro N.º 5 ocurre lo mismo con una altura de agua de doce pies (3.66 metros) y volumen doble, mientras que en el cuadro N.º 6, columna 5, con un volumen cuádruple la diferencia se produce a los quince pies (4.57 metros) de altura de agua. Sentaríamos entonces esta verdad: que Kutter satisface las exigencias de la expresión de Kennedy $V = cd^m$ hasta los nueve, doce y quince pies de altura de agua respectivamente. Se desprende luego de estas comparaciones que las velocidades máximas permitidas para eliminar el factor erosión y aconchamiento están sujetas

CUADRO N.º 4

Pendiente S = 0.000315
 Coef. fricc. n = 0.0225
 Talud ½ por 1

Col. N.º	Ancho canal en pies		Altura agua D	Sección en pies.		Perím. mojado R	Radio medio R	VR	Coef. Kutter	Veloc. pies-segds.		Descarg pies ³ segds.
	Fondo	Medio		pies.	pies					C	V + 40%	
1	978.9	980.4	3	2941.2	985.6	2.984	1.728	78.8	2.38	2.41	7.000	
2	312.3	315.3	6	1891.9	325.7	5.809	2.410	88.8	3.70	3.79	7.000	
3	157.5	162.0	9	1458.3	177.6	8.211	2.866	94.0	4.80	4.77	7.000	
4	131.2	136.2	10	1361.9	153.6	8.867	2.978	95.0	5.14	5.01	7.000	
5	95.1	101.1	12	1213.2	121.9	9.952	3.155	96.4	5.77	5.38	7.000	

CUADRO N.º 5

1	627.6	630.6	6	3783.8	641.0	5.903	2.430	89.4	3.70	3.84	14.000
2	319.6	324.1	9	2916.7	339.7	8.586	2.930	94.5	4.80	4.90	14.000
3	229.6	233.1	11	2564.1	254.2	10.087	3.176	96.5	5.46	5.43	14.000
4	196.2	202.2	12	2426.3	223.0	10.880	3.299	97.7	5.77	5.71	14.000
5	171.2	177.7	13	2310.2	200.3	11.535	3.396	98.3	6.06	5.91	14.000

CUADRO N.º 6

1	643.6	648.1	9	5833.3	663.7	8.789	2.965	94.8	4.80	4.97	28.000
2	398.4	404.4	12	4852.7	425.2	11.413	3.378	98.2	5.77	5.87	28.000
3	348.9	355.4	13	4620.5	378.0	12.223	3.496	99.0	6.06	6.13	28.000
4	307.0	314.0	14	4395.6	338.3	12.993	3.605	99.8	6.37	6.37	28.000
5	273.2	280.7	15	4210.5	306.7	13.728	3.705	100.3	6.65	6.58	28.000

a la disconformidad entre una y otra fórmula que se produce justamente después de los nueve, doce y quince pies, en sentido descendente la velocidad de Kutter. Estas velocidades son 4.80, 5.77 y 6.65 pies por segundo (1.46, 1.76 y 2.03 metros por segundo) las velocidades máximas dentro de la ley de Kennedy y por ende insensibles a la erosión y sedimentación.

Ahora, apreciando la fórmula de Kutter en sí, parece que dentro del horizonte experimental de donde fué derivada ésta se puede aplicar con éxito con pendientes superiores a 0.0001 y con radio medio inferior a los 10 pies (3.05 metros). El coeficiente C , que en la fórmula de Kutter toma en consideración los tres factores n , S y R , no sería legítimo para los cuadros N.º 5 y 6, columna 4-5 y 2-3-4-5 respectivamente, porque en todos estos casos el radio medio R excede los 10 pies. Tendríamos aquí otra ventaja al usar la combinación Kutter-Kennedy y es que permite el empleo de la fórmula $V = C\sqrt{RS}$ con un radio medio superior a los 10 pies siempre que la expresión de Kennedy responda en la práctica a su ley y el agua mantenga su carga máxima de sedimento.

En el estudio de los canales de importancia en Chile se ha optado por la combinación Kutter-Bazin para determinar la pendiente. Sin entrar a discutir la bondad de las velocidades que se han fijado, podría decirse de ellas que no han respondido en la práctica a las pendientes calculadas. Tanto la fórmula de Kutter como la de Bazin o la combinación de las mismas, no pueden determinar exactamente la mejor velocidad capaz de mantener un canal sin desperfectos, una vez entregado al servicio, si no se aporta el dato estadístico más adaptable a la zona de riego. Luego, si como hasta el presente al elegir una velocidad media se ha tomado en cuenta la relación de ésta con las velocidades de fondo y de los costados, las velocidades que atacan y deterioran el perímetro mojado de un canal dando en cambio al factor sedimentación una importancia secundaria, basada en estadísticas de canales similares en servicio que han sufrido con éxito velocidades inofensivas bajo el punto de vista erosivo pero ambiguas en cuanto al factor sedimentación, no es para sorprenderse que las pendientes escogidas fallen por su lado más débil, por la escasa importancia que se le dió al factor sedimentación al decidirse por lo que se creyó sería la mejor velocidad.

De aquí la conveniencia de referirnos a la ecuación de Kennedy y combinar esta velocidad con la de Kutter, Bazin o Manning para obtener luego la mejor pendiente.

Ahora, de estas tres fórmulas de velocidad, cada una con ventajas propias para casos circunstanciales es muy posible que la preferida sea la de Kutter por ser ésta la única que incluye la pendiente en el coeficiente C

$$\text{Bazin con su fórmula nueva para } C = \frac{157.6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}}$$

$$\text{Manning con } C = \frac{1.4858}{n} \sqrt{R} \text{ donde } n \text{ tiene un valor análogo al de Kutter}$$

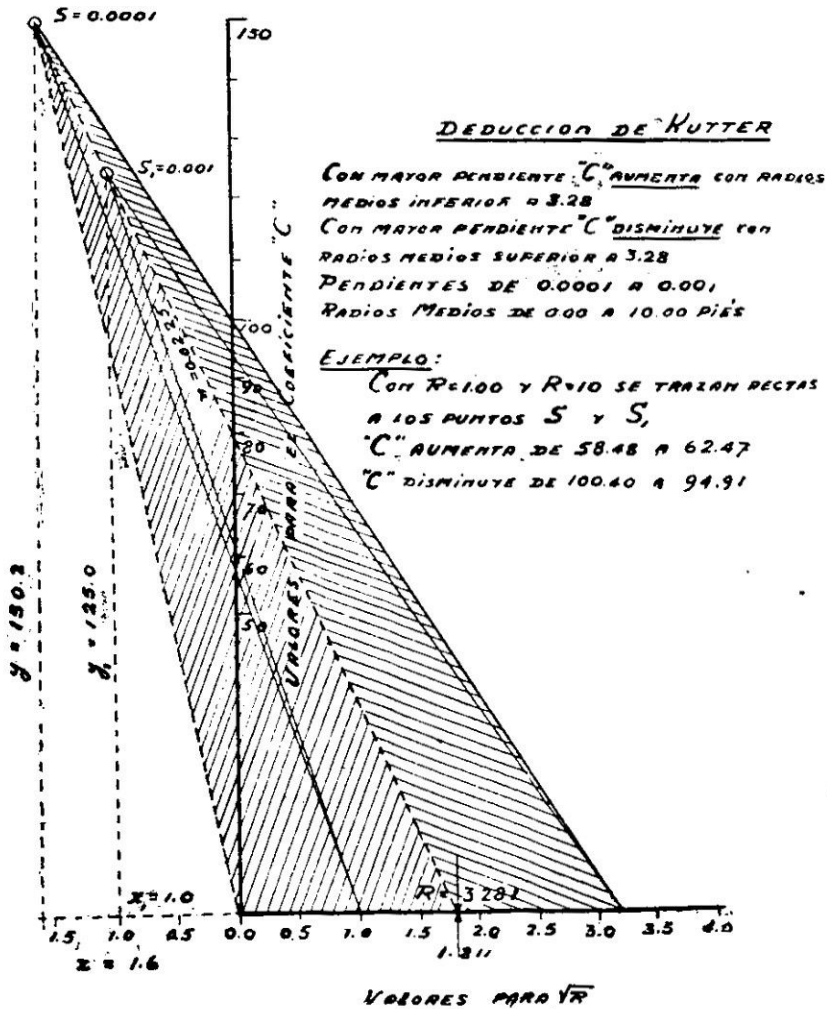
hacen caso omiso de la pendiente por considerarla insignificante.

Las fórmulas de Manning y Bazin para el coeficiente de velocidad que desestiman la pendiente son constantes con un mismo radio medio. Kutter, al introducir la pendiente, aumenta el valor de C cuando la pendiente sube en esteros chicos y disminuye el valor de C cuando la pendiente sube en esteros grandes.

Mientras Manning y Bazin aplican el coeficiente sin clasificar esteros, Kutter distingue al estero chico del grande cuando el radio medio del primero es inferior a un metro, 3.28 pies, en las condiciones que se ilustran por el diagrama N.º 2.

Este es el «punto de cambio» entre pequeños y grandes esteros y la discutida deducción de Ganguillet y Kutter que no convence el todo a las autoridades en la materia por estimarla de escasa evidencia práctica. Sin embargo, el principio de Kutter de introducir la pendiente como función de C y, por lo tanto, el empleo de su fórmula algo compleja compensa y es recomendable para canales grandes con pendientes suaves y un coeficiente de fricción $n = 0.0225$. Es manifiesta la superioridad de Kutter sobre Bazin, si damos algún valor a la comparación de las tres fórmulas por la similitud entre los resultados de Manning y Kutter en el cuadro de velocidades N.º 8. Con radio medio de 10 pies, pendiente 0.0001, la diferencia entre Kutter y Manning es sólo un 3.5%. El promedio del coeficiente de Kutter entre pendientes 0.0001 a 0.001 es 97.65, cifra que nos aproxima más al valor de Manning (Cuadro N.º 7). En cambio este promedio en esteros chicos es demasiado bajo. No erraríamos al recomendar las fórmulas de Manning y Bazin para canales chicos y la fórmula de Kutter para canales grandes. Desde luego mucho depende de la buena selección del coeficiente de fricción y damos por sentado que este valor, difícil de determinar con aproximación ya sea por experimento o por comparación, puesto que es sensible al menor entorpecimiento de las paredes del canal y oscila muchas veces hasta en el mismo día, es en este caso particular $n = 0.0225$, un valor fijo para un canal recién terminado de paredes de tierra o tierras de aluvión cascajo.

Este conflicto de opiniones sobre el principio de Kutter no influye mayormente en la eficacia de la combinación Kutter-Bazin, Kutter-Manning o cada una de las fórmulas aplicadas por separado, siempre que éstas giren sobre el dato estadístico



del factor sedimentación, preciso y seguro para determinar la pendiente adaptable a la zona de riego. Sin este dato que, dicho sea de paso, es difícil de asimilar a nuestros terrenos aunque venga de estadísticas americanas, las más acabadas, tendríamos que tomar como norma para la mejor selección de una velocidad adecuada a una pendiente escogida, aquella que satisfaga las características de las tablas de Kennedy, cuadro N.º 1, previo análisis del sedimento probable en arrastre para precisar con la relativa exactitud los valores de los coeficientes c y m de la ecuación $V = cd^m$.

Así puede llegarse a un estudio más o menos concreto para atenuar el peligro

CUADRO N.º 7

Valores del Coeficiente C en la Fórmula $V = C\sqrt{RS}$ para Canales de Tierra $n = 0.0225$

Radio med. R	Manning	Bazin	Ganguillet y Kutter		
	Toda Pendiente		S=0.0001	S=0.001	Promedio
1.00	66.03	62.05	58.47	62.47	60.47
3.28	80.49	85.17	80.49	80.49	80.49
10.00	96.93	105.93	100.40	94.91	97.65

CUADRO DE VELOCIDADES N.º 8

Radio Medio	Manning			Bazin			Ganguillet y Kuttea			
	C	Velocidad		C	Velocidad		C	Vel.	C	Vel.
		S=0.0001	S=0.001		S=0.0001	S=0.001		S=0.0001		S=0.0001
1.00	66.03	0.66	2.09	62.05	0.62	1.96	58.48	0.58	62.47	1.98
3.28	80.49	1.46	4.61	85.17	1.54	4.89	80.49	1.46	80.49	4.61
10.00	96.93	3.07	9.69	105.93	3.35	10.59	100.40	3.18	94.91	9.49

casi siempre seguro en la práctica de las «sentadas» del canal y el gasto consiguiente en limpieas. Este gasto, con el correr de los años, encarece un canal cuya característica principal ha sido su principio económico. Ríos de cordillera que atraviesan zonas forestales y que por esta causa detienen cualquiera acción erosiva de la pendiente brusca y fuerte trasportan poco o ningún sedimento, sin embargo, a medida que continúan su curso por faldeos suaves o llanuras recojen arcilla, materia desintegrada, etc., que arrastran al principio, luego llevan consigo en suspensión y si la naturaleza del terreno es demasiado sensible al proceso de erosión terminan una vez normalizados en ríos caudalosos por cargar su capacidad potencial hasta el máximo. Tipos de estos ríos podría citarse en Chile el Maule en la misma boca-toma del canal tronco, y el Melado, afluente del primero que recoge probablemente bastante sedimento y de contextura más pesada que el Maule. El canal tronco revestido en parte y con una pendiente fuerte a tajo abierto, pero en roca, lleva en suspensión tal cantidad de sedimento, en su mayor parte proporcionado por el Melado, que fué necesario proyectar un desarenador, aparte de las desripadoras, para desahogar las aguas de la arena gruesa. El autor no cita estos canales como un campo donde encajar la teoría de Kennedy, porque carece de datos concretos para explayarse en comparaciones y luego, porque si existen velocidades inadecuadas, sean estas fuertes y erosivas o demasiado suaves para trasportar sedimento, éstas han sido contempladas y aplicadas en el estudio definitivo por razones técnicas quizás discutibles ahora, pero de una índole económica perentoria entonces. Se refiere más bien como a una hipótesis ilustrativa en apoyo de la ley de Kennedy para recalcar con dos ríos distintos que entran a regar vastas zonas de la región central de Chile dentro de poco, la importancia de encarar en futuras obras de este género el problema de la sedimentación en otra forma, ya que este factor plantea el aspecto comercial de una obra de regadío bajo un nuevo punto de vista para el país que palpa la necesidad de vigorizar sus tierras con abonos artificiales. Así, por ejemplo, y tomando por sentado lo que no es más que una conjetura que las aguas del Melado, ricas en abonos naturales transportados sin mayor costo a la zona de riego, tendríamos que el valor intrínseco de un regador de este río sería mayor al mismo regador sacado del Maule, ya que una vez entregado al servicio el Melado aportará la mayor parte de su sedimento a sus propios derivados dejando al Maule con sus aguas claras.

Por otro lado y mirando el asunto bajo el punto de vista técnico, un canal del Maule con aguas que llevarán sedimento fino y en poca cantidad, requiere una pendiente suave mientras que en el Melado este mismo canal solicitará una pendiente

más fuerte para transportar todo su sedimento. Sería, si se estableciera la dudosa ventaja económica del valor inicial constructivo de la obra sobre el costo anual casi indefinido en mantención del canal en limpias, una verdadera aberración sacrificar pendientes ideales a expensas de un fertilizante. Colocado el problema de la sedimentación en esta forma bajo el carácter de un fertilizante, la mala pendiente o si se quiere, la pendiente económica, no tendría otro objeto para el criterio del agrónomo que producir embanques a lo largo del canal disminuyendo la dotación de aguas mientras no se efectúen las limpias e incrementando año por año el costo de mantención.

Ríos de esta condición que transportan un abono ideal como ocurre con algunos en el sur de Francia y Estados Unidos donde se han sacado canales costosos exclusivamente para conducir a la zona de riego un fertilizante, fluctuando el precio del regador por los componentes del sedimento, necesitan sin lugar a dudas un estudio especial donde la cantidad y calidad del sedimento en suspensión sería el factor decisivo que fijaría las pendientes. El derivado de estos ríos proyectado a base de la velocidad crítica es un buen conductor de regadores y un gratuito transportador de fertilizante.

Desde luego salta a la vista un problema práctico ajeno al fondo de este artículo e inherente a todo canal cuya sección se ha calculado para una dotación máxima y que sufre repentinamente una merma en su carga de agua. Las ventajas de la selección de la mejor velocidad pasan a ser en tal caso completamente nulas, porque la disminución en velocidad reproduce el factor sedimentación. Las limpias serían inevitables toda vez que se producen estas mermas en dotación. Se toma en este caso la medida corriente construyendo el canal con una sección algo mayor a su capacidad máxima para que las limpias se reduzcan a una vez al año sin entorpecer eficazmente la eficiencia del canal.

Se carga el canal con una altura de agua superior a la proyectada. La mayor velocidad empieza su proceso erosivo limpiando de esta manera el canal sin costo alguno.