



VARIABILIDAD DEL ANCHO DE ESCURRIMIENTO EN CUNETAS DE CALLES Y CAMINOS

RICHARD ZAPATA Y CLAUDIO MEIER

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

Casilla 160-C Correo 3, Concepción, Chile

Teléfono: (41) 204446; Fax: (41) 207089

e-mail: cmeier@udec.cl

RESUMEN

Cuando llueve, calles y caminos ven disminuido su ancho de circulación por el escurrimiento de agua en las cunetas. El problema es común en ciudades, donde suele provocar atochamiento vehicular por la pérdida de capacidad vial, además de ser molesto para peatones, y en carreteras, donde puede causar aquaplaning. Se estudia la variabilidad espacial del ancho de escurrimiento para la forma de cuneta más utilizada en Chile. Los anchos se midieron experimentalmente en tres tramos de calle de 25 m, con pavimento de hormigón, con pendientes longitudinales medias de 0.43, 4.37 y 6.25%, respectivamente, y bombeo de 2.5%. Los caudales experimentados fueron trece, variando entre 0.3 y 16 L/s. En cada caso, se comparó los anchos estimados por las ecuaciones de diseño con aquellos observados en terreno. Se constató una amplia variabilidad del ancho de escurrimiento, debida principalmente a variaciones locales de la pendiente transversal. Se concluye que los anchos de diseño se asemejan a los anchos promedio reales, pero son bastante menores que los valores máximos observados, que aproximan mejor lo que percibe el usuario. Por ende, se subestima las obras de drenaje vial al diseñar con la ecuación de Manning modificada y los valores comúnmente recomendados para el coeficiente de rugosidad.

ABSTRACT

As it rains, the usable part of streets and highways becomes narrower because of gutter flow. This is a common problem in cities, which delays traffic, due to loss of capacity, and bothers pedestrians, and in roads, were in can cause aquaplaning. The spatial variability of flow width is studied for the most common gutter section used in Chile. Widths were experimentally measured in three 25 m-long concrete street reaches, with mean longitudinal slopes of 0.43, 4.37 y 6.25%, respectively, and transverse slope of 2.5%. Thirteen flows between 0.3 and 16 L/s were tried. In each case, measured widths were compared with those computed with usual design procedures. Flow width was seen to widely vary, mostly because of local fluctuations in transverse widths. It is concluded that design widths are similar to the mean widths of real flows, but are quite smaller than the maximum observed values, which approximate better the user's perception. Thus, road drainage is being underdesigned when using Manning's modified equation with the commonly recommended values for the roughness coefficient.



1 Introducción

Cada vez que llueve, se observa que calles y caminos ven disminuido su ancho de circulación por el escurrimiento del agua en las cunetas. Esto suele provocar atochamiento vehicular, debido a la pérdida de capacidad de las vías, así como molestias para los peatones. En nuestras ciudades, el problema es común en la gran mayoría de las avenidas, y también ocurre en aquellos caminos que tienen solera y cuneta, incluso para lluvias relativamente menores, pudiendo causar aquaplaning.

Por ello, se estimó conveniente llevar a cabo una investigación de los métodos para diseño de drenaje vial utilizados en el país, de modo de analizar la influencia de factores como la pendiente longitudinal, el bombeo y la rugosidad del pavimento en la inundación de las calles. En particular, en el presente trabajo se estudia la variabilidad del ancho de escurrimiento en cunetas. El análisis se realiza sobre la base de datos recabados experimentalmente, los que se comparan con resultados obtenidos aplicando las ecuaciones de diseño actualmente en uso. Se espera así entregar recomendaciones que permitan mejorar la modelación de los anchos de escurrimiento en cunetas, de manera de lograr diseños viales más adecuados.

En su caso más general, el escurrimiento en una cuneta constituye un ejemplo de flujo impermanente, espacialmente variado, con aportes laterales puntuales y distribuidos de caudal. Para facilitar la modelación hidráulica de tales flujos, se suele asumir flujo unidimensional con régimen permanente, así como condiciones de uniformidad por tramos, de modo que sea posible aplicar alguna ecuación de resistencia, como la de Manning o Chézy. Además, se idealiza el sistema, asumiendo que una cuneta es un canal perfectamente prismático, con pendiente longitudinal uniforme, y despreciando todos los otros efectos que puedan alterar el escurrimiento. Se sabe, sin embargo, que el flujo en cuneta no tiene un solo ancho: la presencia de hojas muertas y basura, los rebajes de soleras, las variaciones locales en la pendiente y rugosidad del pavimento, etc., afectan el ancho de escurrimiento, generando una amplia variabilidad. Por cierto, el deterioro de las calles aumenta considerablemente los problemas de evacuación de aguas lluvias, y a medida que aparecen imperfecciones en la vía (hoyos, quebraduras de pavimento, sumideros tapados, entre otras), se genera una variabilidad aún mayor de los anchos de escurrimiento.

De manera de controlar estos factores, el presente estudio se limita a cunetas de calles y caminos nuevos, con carpeta de rodado de hormigón, limpios y sin rebajes. Así, los únicos factores que explicarán la variación del ancho de escurrimiento serán aquellos relativos a la variabilidad local en las pendientes y rugosidades del pavimento.

Otro factor de importancia que está relacionado directamente con la capacidad de drenaje vial y los anchos de escurrimiento son los elementos de captación de aguas, los sumideros. En este trabajo se asume que éstos son capaces de drenar toda el agua aportada por las cunetas, de manera que los anchos de escurrimiento queden determinados sólo por las características de la calzada.



2 Antecedentes Generales

El diseño de cunetas en Chile depende de la función del camino y del organismo que esté a cargo de su construcción, mantención y conservación. En zonas urbanas, es el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), a través de la Secretaría Regional de Vivienda y Urbanismo (SERVIU), que proyecta sus caminos de acuerdo a las “Recomendaciones para el Diseño del Espacio Vial Urbano” y de la “Guía de Diseño MINVU”. Por otro lado, el diseño de carreteras está a cargo del Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de la Dirección de Vialidad, que lo hace de acuerdo al “Manual de Carreteras”.

Cabe señalar que estos manuales presentan los mismos tipos de cunetas y soleras, variando solamente las pendientes longitudinales y transversales máximas permitidas. En general, estas recomendaciones de diseño han sido adoptadas del Manual de Diseño del Estado de California, Estados Unidos, al parecer sin grandes ajustes para reflejar las características locales, por ejemplo climáticas. En todo caso, se debe hacer notar que las intensidades de precipitación son mucho mayores en los Estados Unidos que en Chile, debido a la ocurrencia común de tormentas convectivas.

Para el desarrollo de los cálculos hidráulicos, se considerará la geometría de la solera tipo A, que es en general la más usada en los proyectos de construcción de caminos. Esta tiene una pendiente de 4H:15V en su cara expuesta al escurrimiento.

3 Teoría del Diseño de Cunetas

El cálculo de cunetas se lleva a cabo asumiendo escurrimiento permanente y uniforme en cada tramo, de modo de poder aplicar ecuaciones de resistencia derivadas para flujo uniforme. Al observar detalladamente la figura geométrica de una cuneta, considerando el diseño de la solera tipo A, se observa que la sección triangular no tiene realmente un lado vertical, sino que con pendiente (ver zona 1 en la figura 1).

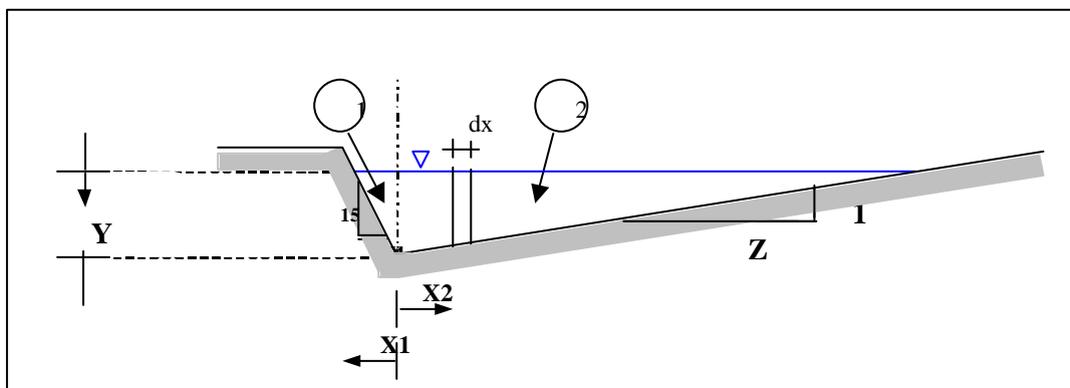


Figura 1. Sección transversal de cuneta con solera tipo A.



Las fórmulas dadas por el Manual de Carreteras, y la literatura en general, para el diseño de cunetas, no usan la fórmula de Manning tradicional. Esto se debe a la geometría de los flujos en cuneta, donde la profundidad de escurrimiento es pequeña respecto del ancho, por lo que no quedan satisfactoriamente explicados por la forma general de la ecuación, sino que es necesario hacer un desarrollo diferencial, que considera la aplicación de la fórmula de Manning a pequeños incrementos de ancho de la sección transversal. Se aplicó entonces la ecuación de Manning a cada elemento de ancho, despreciando la fricción con el agua vecina, y se calculó luego el caudal total integrando sobre las dos partes de la sección (ver detalles en Zapata, 2003).

Para la sección de la figura 1, se encontró que: $Q = Q_1 + Q_2$, con

$$Q_1 = 0.0405 \cdot \frac{\sqrt{I}}{n} \cdot (Y)^{\frac{8}{3}} \quad \text{y} \quad Q_2 = 0.375 \cdot \frac{\sqrt{I}}{n} \cdot Z \cdot (Y)^{\frac{8}{3}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{Z^2}\right)}$$

donde:

- Q Caudal (m^3/s), la suma de Q_1 , caudal pasante por la subsección 1, y Q_2
- n Coeficiente de rugosidad de Manning
- I Pendiente longitudinal de la cuneta, en tanto por uno
- Y Profundidad de escurrimiento (m)
- Z Inverso de la pendiente transversal (bombeo) en tanto por uno

Se calculó $K(Z) = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{Z^2}\right)}$ para distintos valores de Z, encontrándose que es

muy cercano a uno y muy poco variable, por lo que puede despreciarse su influencia (K vale 0.9999 para un bombeo del 2% y 0.9997 para un 3%). Así, se tiene entonces que:

$$Q = \frac{\sqrt{I}}{n} \cdot (Y)^{\frac{8}{3}} \cdot (0.375 \cdot Z + 0.0405) \quad (1)$$

donde el término dependiente de Z es mucho mayor que aquél constante, que representa el caudal portado por el lado de la solera (zona 1). Por ejemplo, si se supone $Z=40$, correspondiente al valor más típico de bombeo, del 2.5%, se tendría:

$$Q = 15.0405 \frac{\sqrt{I}}{n} \cdot (Y)^{\frac{8}{3}}$$

Finalmente, si se asume que la solera tiene cara vertical, pero tomando la pequeña contribución de Q_1 y traspasándola al lado de la calzada, la ecuación que estima el caudal circulante por la cuneta queda expresada de la forma:

$$Q = 0.376 \cdot \sqrt{I} \cdot \frac{Z}{n} \cdot (Y)^{\frac{8}{3}} \quad (2)$$



que es igual a la expresión recomendada por el Manual de Carreteras, excepto que allí tiene una constante de 0.377 en vez de 0.376, y viene como un nomograma, para facilitar su aplicación. Los valores del “n” de Manning recomendados al aplicar esta ecuación son de 0.012 para cunetas de hormigón, 0.014 para pavimentos de hormigón terminados con regla, y 0.016 para aquellos terminados con escoba.

En los manuales de diseño se definen valores máximos de inundación para las vías de tránsito. Estas limitaciones varían según la categoría de la vía, pero el criterio que prima es que siempre al menos una pista por sentido de la vía esté despejada de agua. Los valores máximos de inundación son determinados a partir de eventos de lluvia con períodos de retorno relativamente bajos, del orden de unos pocos años. Para tales eventos, las calles debieran llevar agua sin generar grandes problemas para los usuarios, aunque todos sabemos que esto realmente no funciona en nuestra realidad.

Las restricciones recomendadas anteriormente son poco claras para definir qué valores máximos de inundación se permitirán en las vías, pero en general, se puede deducir que para caminos que se encuentran dentro del entorno urbano, la máxima inundación esperada debe ser de 1.0 m, y por ningún motivo debe ser sobrepasada la altura de la solera. Tales limitaciones están fundadas sólo en aspectos prácticos y se entregan pocas recomendaciones respecto de cómo lograr que se cumplan efectivamente. En las mediciones realizadas en este trabajo, pudo constatarse que las variaciones en el ancho de escurrimiento son importantes, y que incluso con caudales bajos se sobrepasa muy fácilmente los valores de ancho permitidos. En los capítulos posteriores se analizará esto con mayor detalle.

De modo de darse una cota superior de los caudales esperables en una cuneta, se calculó mediante el método racional cuál sería la crecida a la salida de una cuenca con área igual a un cuarto de manzana urbana (4260 m²). Se consideró una lluvia con período de retorno 10 años, en Concepción, y se usaron coeficientes de escorrentía conservadores. Asumiendo que no hay sumideros a mitad de cuadra, los caudales máximos obtenidos estuvieron entre los 20 y 25 L/s, que son valores mucho mayores a aquellos que mantendrían el ancho de escurrimiento dentro de los límites permisibles (por lo menos para pendientes longitudinales y transversales habituales).

4 Mediciones experimentales

Los experimentos consistieron en medir el ancho del agua que escurre a lo largo de la cuneta, en una cantidad de puntos suficiente para reflejar lo mejor posible la geometría del área de calle inundada. El caudal se expulsó desde camiones aljibe y se calculó midiendo el tiempo de llenado de un tambor con volumen previamente calibrado. Además se realizó topografía fina de los tramos estudiados, de modo de determinar las pendientes reales, transversal y longitudinal, logradas en la construcción del camino.

Las mediciones se llevaron a cabo durante el mes de Febrero de 2003 en tres tramos, dos en Chiguayante y uno en Yumbel. Los camiones aljibe expulsaban el líquido por medio de bombas y/o por gravedad, manteniéndose el caudal lo más



constante posible durante la medición, lo que sin embargo no siempre fue posible. Antes de liberar agua, los tramos de medición seleccionados, de 25 m cada uno, fueron debidamente barridos y se marcó con tiza cada eje transversal a medir, haciendo una marca en la solera y otra al centro de la pista.



Figura 2. Medición del caudal y de los anchos de escurrimiento en terreno.

Se dejó un espacio de unos 12 metros desde el lugar en que caía el agua desde el camión hasta donde se iniciaba el tramo de medición. Este espacio era suficiente para que el flujo asumiera una condición más uniforme. El paso de medición se definió en 25 cm. Este valor se obtuvo en terreno tras una inspección visual del escurrimiento generado al liberar agua. Se consideró que esta distancia de separación entre puntos de medición explicaría con suficiente detalle la variación del ancho a lo largo de la calle (son 101 mediciones para cada caudal, en cada tramo de 25 m de longitud).

El grupo de medición estuvo constituido por cuatro personas: Dos para trasladar la huincha, una para hacer la lectura y una para registrar los datos. La persona que midió los anchos fue la misma en todas las ocasiones, para evitar criterios distintos. El tiempo de medición fue aproximadamente de 15 minutos por experimento, desde que se medía el caudal hasta la lectura del último ancho considerado. Además de medir los anchos de escurrimiento, se registraron detalles de cada experimento, como el efecto que generaba la presencia de juntas sobre el escurrimiento. También se relevaron perfiles transversales con un limnómetro con vernier, que se deslizaba sobre un perfil, el cual podía nivelarse tanto longitudinal como transversalmente al eje de la calle.

5 Análisis de datos

En total, se efectuaron mediciones del ancho de escurrimiento para trece caudales diferentes, siete en el primer tramo, y tres en cada uno de los dos siguientes.

A partir de los datos obtenidos en las mediciones se confeccionaron gráficos de variabilidad del ancho de escurrimiento como el mostrado a continuación (figura 4), en que el agua escurre de izquierda a derecha.



Figura 3. Tramo de medición 1, en Calle Manuel Rodríguez, Chiguayante.

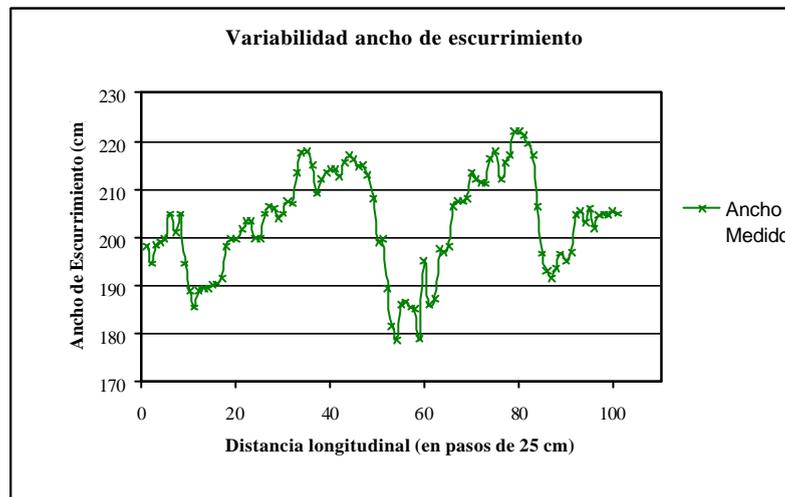


Figura 4. Ancho de escurrimiento en cm para el tramo 1, $Q=16.5$ L/s

Para cada experimento, se calculó el ancho promedio (graficado versus el caudal, para cada tramo, en la figura 5) y el ancho máximo. En la práctica, el ancho percibido por los usuarios es mayor que el promedio, ya que no están dispuestos a salpicar continuamente. Cada conductor define subjetivamente un ancho, que llamamos “ancho percibido”, por el que puede pasar sin molestia o riesgo. En la práctica, éste depende principalmente de la rapidez del móvil, de la seguridad que el conductor sienta al pasar por calles anegadas y de la presencia de peatones. Como primera aproximación, se asumió que corresponde al percentil 80 de los anchos medidos, es decir, al valor superado en un 20 % de las mediciones. Para definirlo mejor, debería estudiarse el comportamiento de los conductores ante anchos de inundación variables.

Por otra parte, para los tres tramos estudiados y para cada caudal probado, puede determinarse dos anchos más: aquél que resulta de reemplazar las pendientes de diseño de los tramos en la ecuación (2), al que le hemos llamado “ancho de diseño”,



y el que resulta si se consideran las pendientes transversales y longitudinales medidas en el tramo (que no tienen porqué coincidir con las de diseño, debido a las fallas constructivas), que hemos denominado “ancho teórico”. Conceptualmente, el ancho de diseño es aquél que se habría predicho antes de construir la obra, conociendo sólo las características de diseño, mientras que el teórico es el que se predeciría para la calle tal como quedó construida. En ambos casos, se asumió un n de Manning igual a 0.016.

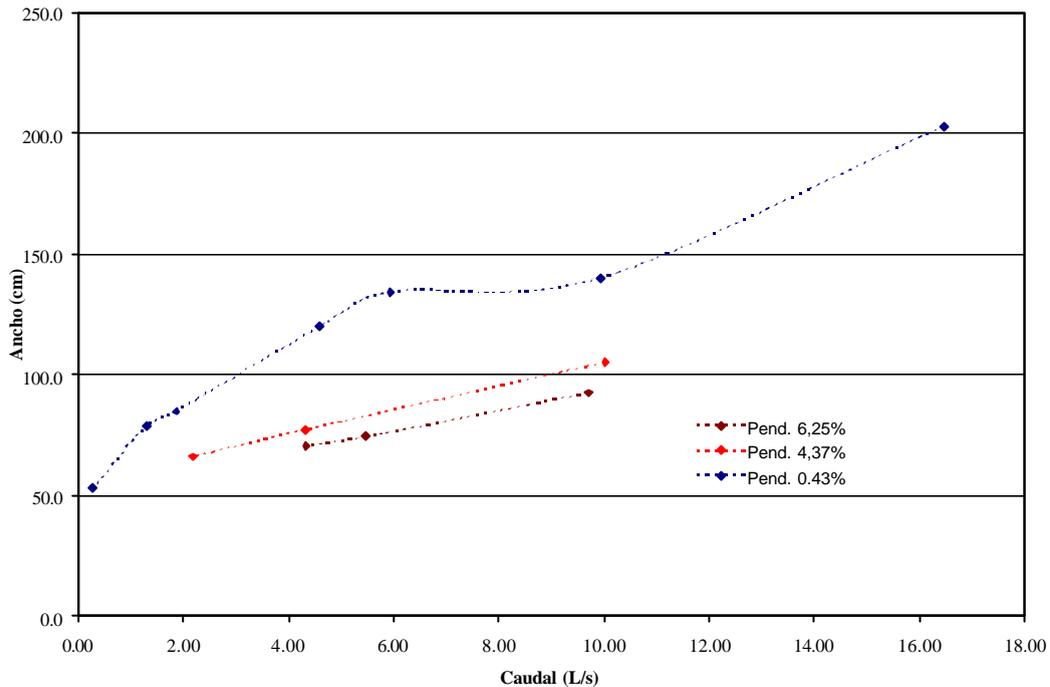


Figura 5. Ancho promedio de escurrimiento versus caudal para los tres tramos.

La tabla 1 entrega todos los anchos medidos y calculados para cada combinación de caudal y tramo de medición.

Se llevó a cabo un análisis para encontrar qué valores del coeficiente de rugosidad de Manning “ n ”, logran reproducir los anchos de escurrimiento b_{Promedio} y $b_{\text{Percibido}}$ determinados experimentalmente, al aplicar la fórmula de Manning (ecuación 4). El detalle para cada uno de los tramos se presenta en la tabla 2, mientras que la figura 6 muestra los valores de “ n ” calculados para los distintos caudales y tramos.

También se analizó la variabilidad espacial de los anchos, observándose que su variación ocurre preferentemente a ciertas escalas de longitud y que el efecto de los obstáculos u imperfecciones se pierde con prontitud (en distancias menores que un paño, que mide de 3.5 a 4 m). Esto es posible verificarlo en los correlogramas, que son gráficos R^2 versus distancia de separación realizados para cada medición. Por ejemplo, en la figura 7 se muestra el correlograma que se obtuvo para un caudal de 4.58 L/s en el tramo 1. Se observa que la correlación espacial entre anchos medidos disminuye hasta tomar un valor prácticamente nulo en aproximadamente cinco a seis pasos de medición, esto es, entre 1.25 y 1.5 m, longitud bastante menor que el largo de un paño.



Tabla 1. Anchos medidos y calculados para cada caudal y tramo.

Tramo	Caudal (L/s)	b _{Diseño} (cm)	b _{Teórico} (cm)	b _{Promedio} (cm)	b _{Percibido} (cm)	b _{Máximo} (cm)
1	16.47	189.9	187.9	202.9	213.7	222
	9.93	157.0	160.5	140.1	145.8	159
	5.94	129.5	132.4	134.2	140.3	156
	4.58	117.5	122.5	119.8	126.2	143
	1.86	83.8	90.2	84.9	91.8	101
	1.30	73.3	78.9	78.8	83.5	94
	0.28	41.0	43.7	52.9	58.1	72.5
2	9.71	90.5	89.8	92.4	97.8	106
	5.47	72.9	70.7	74.3	78.3	88.5
	4.34	66.9	64.8	70.4	75	88
3	10.03	98.2	108.9	105.1	114.7	130
	4.32	71.6	79.4	77.2	87	105.5
	2.18	55.4	60.4	65.9	75.8	93

Tabla 2. Valores de “n” que logran reproducir los anchos promedio y percibido.

Q (L/s)	S (%)	I (%)	b _{Promedio} (cm)	b _{Percibido} (cm)	n _{Promedio}	n _{Percibido}
16.47	0.0239	0.0043	202.9	213.7	0.0196	0.0226
9.93	0.0227	0.0043	140.1	145.8	0.0111	0.0124
5.94	0.0227	0.0043	134.2	140.3	0.0166	0.0187
4.58	0.0220	0.0043	119.8	126.2	0.0151	0.0173
1.86	0.0209	0.0043	84.9	91.8	0.0136	0.0168
1.30	0.0209	0.0043	78.8	83.5	0.0160	0.0186
0.28	0.0212	0.0043	52.9	58.1	0.0266	0.0342
9.71	0.0254	0.0625	92.4	97.8	0.0173	0.0201
5.47	0.0264	0.0625	74.3	78.3	0.0183	0.0210
4.34	0.0264	0.0625	70.4	75	0.0199	0.0236
10.03	0.0212	0.0437	105.1	114.7	0.0146	0.0184
4.32	0.0212	0.0437	77.2	87	0.0149	0.0204
2.18	0.0218	0.0437	65.9	75.8	0.0202	0.0293

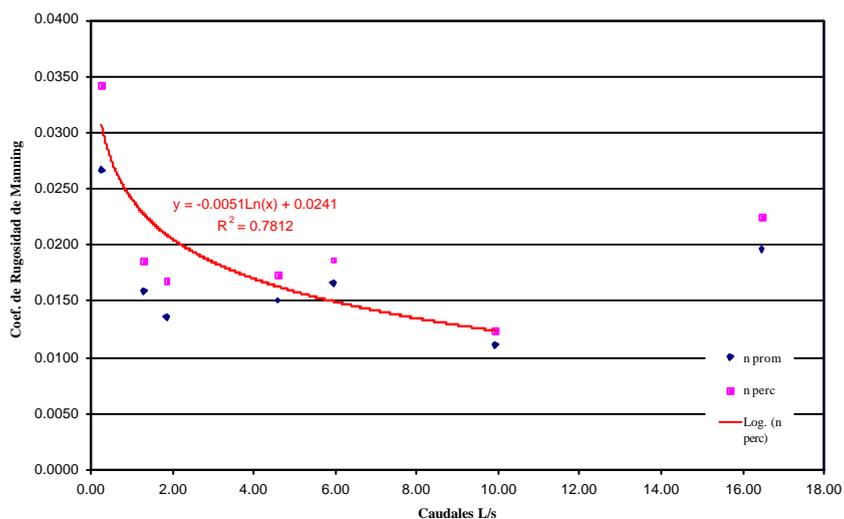


Figura 6. Valores del “n” de Manning que reproducen los anchos medidos.

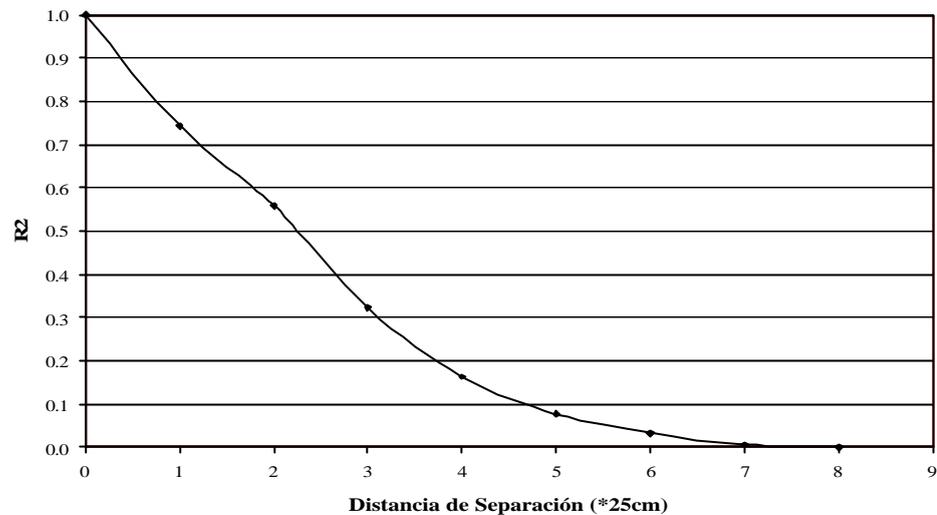


Figura 7. Ejemplo de correlograma espacial del ancho de escurrimiento

6 Conclusiones

El escurrimiento en cunetas de calles corresponde a un flujo no uniforme, con anchos variables. Esto pudo constatarse tanto en las observaciones realizadas en el período de invierno, durante distintos eventos de lluvia, como en la etapa experimental.

La disminución de la capacidad vial no depende del ancho promedio de inundación de la calle, sino que del ancho que percibe el conductor, que es mayor.

Los valores máximos y percibidos del ancho de inundación encontrados experimentalmente superaron con creces aquellos de diseño y teóricos. En general, estos últimos se acercaron más a los anchos promedio. Según esto, la ecuación de Manning estaría prediciendo un valor cercano al promedio del ancho de inundación real de la calle, que como ya se concluyó antes, no es el valor que percibe el usuario y que últimamente reduce la capacidad vial de la calle o camino. Desde este punto de vista, se está subestimando las obras de drenaje vial al diseñar con la ecuación de Manning modificada y los valores comúnmente recomendados del coeficiente de rugosidad "n".

Lo anterior queda rubricado al deducir los valores de "n" que reproducen los anchos máximos o permitidos, de modo de estimar de mejor forma el ancho de escurrimiento que realmente percibirán los conductores. En efecto tales valores de "n" son mayores a los usualmente recomendados para diseño. Cabe recalcar que los valores experimentales presentados en este trabajo fueron determinados en pavimentos relativamente nuevos, los que fueron minuciosamente barridos. Luego, tales valores de "n" están asociados a condiciones muy favorables respecto de las que pueden encontrarse típicamente en las calles durante la ocurrencia de tormentas.

La variabilidad del ancho ocurre preferentemente a ciertas escalas de longitud, perdiéndose prontamente (entre 1 y 1.5 m) el efecto de obstáculos e imperfecciones.



Como los anchos de escurrimiento en cunetas son mayores a los estimados en la etapa de diseño, se propone aumentar el valor del coeficiente de rugosidad de Manning para estimar mejor los anchos de escurrimiento. Actualmente se recomiendan valores en el rango de 0.016 a 0.020, y frecuentemente se usa el valor 0.016. Según los resultados preliminares aquí obtenidos, se recomienda utilizar valores mayores a 0.020, en lo posible cercanos a 0.025, que permitan tomar en cuenta tanto el problema de la suciedad (hojas y basuras) que normalmente presentan las calles durante lluvias, como el hecho de que la fórmula de Manning entrega un solo ancho, que se supone uniforme. Así, se estimará mejor el ancho de escurrimiento que perciben los conductores.

En general, los caudales asociados a precipitaciones de diseño, cuando existe sólo un sumidero por esquina, son mayores que aquellos que pueden escurrir por cunetas como las estudiadas en este trabajo. Al respecto se recomienda, en caso de no realizar cálculos de diseño hidráulico de los elementos de evacuación, colocar más de un sumidero por pista drenante a lo largo de la calle de una cuadra normal (120 a 125 m). Con ello se achica el área de cuenca aportante, y el caudal que evacúa cada sumidero es menor, disminuyendo así los anchos de escurrimiento en la calle

Se sugiere que la inspección que se ejecuta al recibir la construcción de una calle controle que, por lo menos en el ancho de calle que se espera inundar, el bombeo logrado constructivamente no sea menor al de diseño. Además, en zonas con precipitaciones mayores, sería recomendable que el bombeo mínimo fuese mayor, digamos del 3 %. De esta forma, las calles serían capaces de portear los caudales típicos de crecida con anchos de escurrimiento razonables, que no disminuyan excesivamente la capacidad vial.

7 Referencia

Zapata, R. 2003. Variabilidad del Ancho de Escurrimiento en Cunetas de Calles y Caminos. Informe de Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

8 Agradecimientos

Se agradece a la compañía Claro-Vicuña-Valenzuela, en particular a los Señores Alex Leyton y Ramiro Matamala, así como a la Municipalidad de Yumbel, quienes gentilmente facilitaron los tramos de medición y los camiones aljibe, haciendo posible la realización de este trabajo.