

28

LOS PRINCIPIOS DE LA INGENIERÍA

aplicada a la

IRRIGACIÓN

por

Newell y Murphy.

(Continúa.)

Comparación del Esguerrimiento. - Una comparación del esguerrimiento de distintas vertientes conduce a menudo a conclusiones interesantes, especialmente cuando se consideran los diversos factores que influyen en él. Si se hace una comparación sin considerar primero la cantidad y el carácter de la precipitación pluvial, el carácter del suelo y las pérdidas originadas por la evaporación, los resultados son no tan sólo confusos, sino que también conducen frecuentemente a que se incurra en errores importantes en las obras de ingeniería. Por ejemplo, los primeros datos de que se disponía provenían de las vertientes de la Nueva Inglaterra o del Estado de Nueva York. Estos datos concordaban bastante entre sí, y fue posible deducir reglas que se podían aplicar localmente, al efecto de que se podía encontrar en la corriente cerca de un 30 por ciento de la precipitación pluvial. Algunas veces ha sucedido que los ingenieros han tomado estas conclusiones e intentado aplicarlas a la región occidental, con el resultado de que se han equivocado grandemente en sus suposiciones respecto a la provisión de agua disponible.

Esto ha sido debido no tan sólo al hecho de que no se podía hacer una comparación directa, sino también a otro hecho que debía haber sido más obvio: a saber, que las mediciones de la precipitación pluvial en el oeste se han practicado en su mayor parte en los valles, y muy raras veces en las partes más elevadas del área de desagüe, de las cuales proviene la mayor parte del agua.

En algunos casos es importante y necesario que se hagan deducciones, basadas en las comparaciones del esguerrimiento de varias vertientes, puesto que no ha sido posible medir el esguerrimiento contenido en cada corriente. Sin embargo, al hacerse tales comparaciones, hay que tener gran cuidado de elegir áreas que sean de un carácter semejante. Está reconocido que el esguerrimiento de un área de 1,000 millas cuadradas puede ser de un carácter distinto que el de un área de 100 millas cuadradas, aun en una misma región, de manera que cuando se desee estudiar la cantidad de agua probablemente disponible en la cuenca de un río que tenga una extensión de mil millas cuadradas, es importante que se recurra a mediciones que se refieran a un área igual, y no a una que sea considera-

blemente mayor o menor.

Hay que reconocer que, en las conclusiones deducidas de semejantes comparaciones, se está expuesto, a lo mejor, a incurrir en graves errores, y que el valor preciso del escurrimiento sólo puede obtenerse por medio de una medición directa.

Medición del Agua. -- La medición del agua puede considerarse propia mente bajo dos títulos, a saber, la medición de la provisión y la medición de la cantidad que se requiere para el consumo.

La medición de la provisión se hace con el objeto de determinar la cantidad de agua disponible para la irrigación, el desarrollo de fuerza motriz y los usos domésticos. Comprende la medición del escurrimiento que contienen las diversas corrientes, y también, en un grado limitado, la determinación de las corrientes subterráneas que se pueden aprovechar por medio del bombeo o del flujo de los pozos artesianos. La medición de la cantidad que se requiere para el consumo comprende la determinación de la cantidad necesaria para la irrigación, el desarrollo de fuerza motriz y otros objetos.

En toda empresa que implique el aprovechamiento de agua, es necesario practicar mediciones de las dos clases antedichas; la primera, con el objeto de determinar la cantidad disponible; y la segunda, con el objeto de determinar la extensión de la empresa a la que una provisión determinada pueda abastecer.

Los métodos para medir el agua de las corrientes naturales, de una manera sistemática y económica, se han desarrollado en el curso de los últimos veinte años, debido, en gran parte, a los esfuerzos de la Comisión Geológica de los Estados Unidos. Se ha hecho un progreso notable en la simplificación de los detalles, así como en la adaptación de éstos para que se pueda efectuar el trabajo metódicamente en una gran extensión del país. Ha habido una evolución gradual de los instrumentos empleados para el objeto, especialmente en el sentido de lograr que sean más ligeros y más portátiles.

En pocas palabras, el trabajo consiste en medir y registrar la cantidad total del agua que pasa por un punto determinado de una corriente,

y en determinar, de esta manera, el escurrimiento de cada una de las vertientes principales. Hasta ahora, no ha sido posible medir todas las corrientes del país; no obstante, se están practicando mediciones de un número suficiente de ellas para que se puedan hacer cálculos aproximados de la provisión total, y el trabajo se está extendiendo gradualmente a medida que va aumentando la demanda de datos relativos a la provisión de agua. Además, tanto el Gobierno de los Estados Unidos como las compañías que explotan los servicios públicos están haciendo mediciones de la cantidad de agua empleada por diversas empresas.

Unidades para la Medición. - Se usan comúnmente dos clases de unidades para la medición del agua, representando la primera la cantidad, y la segunda la velocidad de la corriente.

La cantidad se mide en los términos de alguna unidad de capacidad bien definida, y se emplea para expresar la cantidad de agua contenida en un depósito, o la que se aplica a una determinada área de tierra en el proceso de la irrigación. Las unidades de cantidad que se emplean comúnmente son el galón, el pie cúbico y el pie-acre. Se emplean el galón y el pie cúbico para expresar la cantidad de agua almacenada o aprovechada para los usos domésticos, pero, debido a lo pequeño de estas unidades, se emplean muy rara vez en los cálculos de ingeniería relativos a las obras de irrigación. En lugar de ellas, se emplea el pie-acre como la unidad común. Éste se define como la cantidad de agua necesaria para cubrir 1 acre con una capa de agua de 1 pie de profundidad, es decir, 43,560 pies cúbicos. Las capacidades de los grandes depósitos se expresan generalmente en pies-acres, de manera que las cifras correspondientes se pueden aplicar inmediatamente para calcular las áreas agrícolas que se pueden regar.

La velocidad de la corriente puede definirse como la cantidad de agua que corre por un tubo o un cauce en una unidad de tiempo determinada, la que es generalmente el segundo. Las unidades que se emplean son la pulgada minera y el pie-segundo. A la pulgada minera, la que es la primera unidad que se empleó generalmente en los Estados Unidos para expresar la velocidad de la corriente, se le supone que representa la cantidad

de agua que fluye continuamente por un orificio de 1 pulgada cuadrada bajo una presión determinada. La presión sobre el orificio se ha definido de diversas maneras en diferentes lugares, pero se fija generalmente como la presión de cerca de 4 pulgadas de agua sobre el borde superior del orificio.

El pie-segundo se define como 1 pie cúbico por segundo. Un cajón o un conducto de 1 pie cuadrado que llevara agua con una velocidad de 1 pie por segundo descargaría 1 pie-segundo. El pie-segundo, debido a que está tan bien definido, es la unidad más conveniente para expresar la velocidad de la corriente, y es la que usan generalmente los ingenieros americanos e ingleses. Éstos lo escriben "cusec".

La pulgada minera es una unidad poco definida, puesto que la cantidad de agua que fluirá por un orificio de 1 pulgada cuadrada, bajo una presión determinada, depende del espesor del material en que se hace el orificio. Por ejemplo, la cantidad del flujo por un orificio cortado en un tablón de 2 pulgadas de espesor será muy distinta de la del flujo por un orificio del mismo tamaño cortado en una lámina delgada de metal.

En la Figura 8 se ve uno de los métodos empleados para medir por pulgadas mineras, en el cual un orificio rectangular está dispuesto de tal manera que puede ajustarse a diversas anchuras por medio de una pieza corrediza, de manera que es posible medir cantidades de desde 1 pulgada minera hasta 75 pulgadas. Este método es bastante satisfactorio para estas cantidades más pequeñas, pero es prácticamente imposible medir 10,000 pulgadas mineras con un aparato semejante, debido al hecho de que el orificio tiene que tener una gran extensión horizontal para evitar las complicaciones que originaría el aumento de la presión en el caso de que el orificio se aumentara verticalmente.

Con el objeto de evitar la confusión originada por el uso de esta unidad, la mayoría de los Estados han definido la pulgada minera en los términos del pie-segundo. No obstante, no existe ningún acuerdo completo respecto a esto entre los diversos Estados. En Idaho, Kansas, Nebraska, Nuevo México, la Dakota del Norte y la del Sur, 50 pulgadas mineras son iguales a 1 pie-segundo. En Arizona, California, Montana y Ore

-31-

gón, 40 pulgadas mineras son iguales a un pie-segundo.

Debe abandonarse el uso de la pulgada minera, tanto en vista de su carácter poco definido, como en atención a que no está bien adaptada para expresar los resultados de los cálculos relativos a la velocidad del flujo por los saetines, las presas y otros aparatos que se usan para medir.

Por "pies-segundos por milla cuadrada" se entiende el promedio del número de pies cúbicos de agua que fluyen por segundo de cada milla cuadrada del área de desagüe, suponiendo que el escurrimiento se encuentra distribuido uniformemente tanto con respecto al tiempo como al área.

Por "escurrimiento en pulgadas" se entiende la profundidad hasta la cual el área de desagüe estaría cubierta si toda el agua que fluye de ella en un período determinado se conservara y estuviera distribuida uniformemente sobre la superficie. Se emplea este término para comparar el escurrimiento con la precipitación pluvial, la cual se calcula generalmente por su profundidad en pulgadas.

Equivalentes Cómodos. - La siguiente es una lista de equivalentes cómodos que se pueden emplear en los cálculos hidráulicos:

- 1 pie-segundo equivale a 7.48 galones de los Estados Unidos por segundo; equivale a 448.8 galones por minuto; equivale a 646,272 galones en un día.
- 1 pie-segundo equivale a 6.23 galones imperiales británicos por segundo.
- 1 pie-segundo durante un año cubre 1 milla cuadrada hasta una profundidad de 1.131 pies o 13.572 pulgadas.
- 1 pie-segundo durante un año equivale a 31,536,000 pies cúbicos.
- 1 pie-segundo equivale a cerca de 1 pulgada-acre por hora.
- 1 pie-segundo cubre en un día 1 milla cuadrada hasta una profundidad de 0.03719 de pulgada.
- 1 pie-segundo cubre en un mes de 30 días 1 milla cuadrada hasta una profundidad de 1.116 pulgadas.
- 1 pie-segundo en un día equivale a 1.983 pies-acres.
- 1 pie-segundo durante un mes de 30 días equivale a 59.50 pies-acres.
- 100 galones de los Estados Unidos por minuto equivalen a 0.223 de

pie-segundo.

100 galones de los Estados Unidos por minuto durante un día equivalen a 0.442 de pie-acre.

1,000,000 de galones de los Estados Unidos por día equivalen a 1.55 pies-segundos.

1,000,000 de galones de los Estados Unidos equivalen a 3.07 pies-acres.

1 pie-acre equivale a 325,850 galones.

1 pulgada de agua sobre 1 milla cuadrada equivale a 2,323,200 pies cúbicos.

1 pulgada de agua sobre 1 milla cuadrada equivale a 0.0737 de pie-segundo por año.

1 pie equivale a 0.3048 de metro.

1 milla equivale a 1.60935 kilómetros.

1 acre equivale a 0.4047 de hectárea.

1 acre equivale a 43,560 pies cuadrados.

1 acre equivale, aproximadamente, a un cuadrado de 209 x 209 pies.

1 milla cuadrada equivale a 2.59 kilómetros cuadrados.

1 pie cúbico equivale a 0.0283 de metro cúbico.

1 pie cúbico equivale a 7.48 galones.

1 pie cúbico de agua pesa 62.5 libras.

1 metro cúbico por minuto equivale a 0.5886 de pie-segundo.

1 caballo de vapor equivale a 550 libras-pies por segundo.

1 caballo de vapor equivale a 75 kilográmetros por segundo.

1 caballo de vapor equivale a 746 vatios.

1 caballo de vapor equivale a 1 pie-segundo que cae desde una altura de 8.80 pies.

1 1/3 caballos de vapor equivalen a cerca de 1 kilovatio.

Para calcular rápidamente la fuerza hidráulica:

$$\frac{\text{Pies-segundos} \times \text{altura en pies}}{11} = \text{caballos de vapor}$$

netos en la rueda hidráulica que rinden un 80 por ciento de la fuerza teórica.

Métodos para Practicar la Medición. - La medición del agua se hace casi en todos los casos midiendo el volumen y la velocidad del flujo durante un tiempo determinado, y computando la cantidad de la descarga por medio de estos factores. Cuando el volumen y la velocidad del flujo son constantes, se obtiene la cantidad multiplicando el volumen por el tiempo. Cuando el volumen y la velocidad del flujo varían de un día para otro o, como sucede frecuentemente, de una hora para otra, hay que medir estas variaciones. Esto se hace computando la cantidad de la descarga durante breves períodos de tiempo, por ejemplo, de un día o de una hora, y sumando estas cantidades para todo el período del flujo. En las mediciones practicadas por la Comisión Geológica de los Estados Unidos, se toma la descarga de cada día como la base para determinar el promedio de la descarga mensual o anual.

La medición del volumen y de la velocidad del flujo, o la medición de la corriente, como se le llama generalmente, se basa principalmente en las mediciones del área transversal y de la velocidad media con que el agua corre por la sección medida. En algunos casos, muy especialmente tratándose de las pequeñas corrientes o de los canales de irrigación o abastecimiento, las mediciones se hacen por medio de aparatos especiales, como, por ejemplo, las presas.

La Figura 9 representa la disposición ideal de una estación completamente equipada para practicar mediciones. En la parte delantera se ve una pequeña caseta que contiene un aparato registrador automático para registrar la subida y la bajada del agua en un pequeño pozo que está conectado con el río por medio de un tubo horizontal, y cerca de la caseta se encuentra una vara de medir vertical para que se puedan comprobar las observaciones por medio de lecturas directas. La instalación de los aparatos de esta especie es algo costosa; además, es necesario que los ajusten frecuentemente personas expertas. En el fondo se ve un cable que atraviesa el río, y del cual está suspendido un asiento o una pequeña carretilla, desde donde el hidrógrafo puede efectuar sus trabajos de medir el ancho, la profundidad y la velocidad de las diversas partes de la corriente. (Véanse también las Figuras A y B en la Lámina II, que

representan las mediciones practicadas desde un pequeño puente o vadeando el río.)

El área de la sección transversal de una corriente se mide practicando sondeos a intervalos regulares, por ejemplo, de 5 o 10 pies, a través de la corriente, y computando el área de cada una de las pequeñas secciones comprendidas entre los sondeos por su ancho y profundidad media. La suma de las pequeñas áreas así medidas da el total del área de la sección transversal. La velocidad se determina ya sea por medio de un aparato para medir la corriente (véase la Figura C en la Lámina II), colocado en la corriente, o por medio de flotadores puestos en la superficie. El primer método es el que puede proporcionar resultados más exactos, y es el que se emplea generalmente para medir la velocidad de las corrientes. Al computar la descarga, hay que tomar en cuenta el hecho de que la velocidad varía en las diferentes partes de la corriente, y que es necesario dividir toda la sección transversal en partes y computar separadamente la descarga correspondiente a cada una de ellas. Esto se puede hacer fácilmente si las mediciones se practican en diversos puntos de la corriente por medio del aparato para medir la velocidad. Cuando la velocidad se mide por medio de flotadores, se supone generalmente que la velocidad media equivale a cerca de 0.8 de la velocidad de la superficie. Las mediciones hechas por este método son, a lo mejor, solamente cálculos aproximados, y, por esta razón, no debe confiarse en ellas en los casos en que se requieren resultados razonablemente exactos.

En donde las condiciones permitan su instalación y empleo, la presa es probablemente el método más exacto para medir el agua. Sin embargo, las condiciones que se requieren para que se puedan practicar mediciones exactas por medio de presas son tales que sucede frecuentemente que no se puede contar con ellas en las corrientes de cierta importancia. Para que se puedan practicar mediciones exactas por medio de una presa, es necesario, en primer lugar, que el agua arriba de la presa esté en un estado de quietud y que la altura sea suficiente para que la superficie del agua de la corriente del lado inferior de la presa quede debajo del nivel del agua en el interior de la misma. Se ve fácilmente que es difícil

obtener estas condiciones en las corrientes de alguna importancia.

Resultados de la Medición de las Corrientes. - Los resultados de la medición de las corrientes indican que hay una gran fluctuación en la cantidad del flujo, tanto de un mes para otro, como de un año para otro. Por lo general, el flujo mínimo se presenta cuando se necesita más el agua para la irrigación, es decir, durante los meses de julio y agosto. Aumenta gradualmente a medida que la temperatura va siendo más fresca, pero continúa siendo de una cantidad relativamente pequeña durante el invierno, y llega al estado de creciente en los meses de la primavera. La creciente máxima viene después de las lluvias de la primavera y de los deshielos, presentándose generalmente a fines de mayo o en junio.

Además de las variaciones anuales de sequía y de fuertes lluvias, hay lo que se llama a veces la alternación "no periódica" de los años lluviosos y de los secos. Durante varios años sucesivos, las crecientes suelen ser altas y prolongadas, y la estación en que el agua está haja proporciona una regular cantidad de agua para la irrigación; después vienen uno o dos o, a veces, hasta tres años sucesivos de sequía excepcional, en los cuales las crecientes son muy pequeñas y el escurrimiento no es suficiente para llenar los depósitos que se hayan construido. Al proyectar las obras de irrigación, debe tomarse plenamente en consideración el hecho de que es frecuente que estos años de sequía se presenten sucesivamente.

Se ha intentado descubrir alguna regla que rija el fenómeno de los años lluviosos y de los años secos. Hay quien haya elaborado una teoría de que las sequías se presentan a intervalos de siete años, mientras que otro está igualmente seguro de que un período de once años es más aproximadamente exacto, y, por otra parte, hay quienes sostienen que el período es de diecisiete años. En la práctica, no hay ninguna regla por la cual uno se pueda guiar, excepto la de que lo que haya sucedido en cuanto a la gran sequía o a las fuertes lluvias puede volver a suceder, y de que es probable que a una serie de años de lluvia le seguirá una serie de años secos, desconociéndose la duración de cada uno de estos períodos.

Las publicaciones de la Comisión Geológica de los Estados Unidos dan

las cantidades efectivas de agua que ha habido en las principales corrientes en cada mes y en cada año, expresándose estas cantidades tanto en el volumen medio o número de pies cúbicos por segundo, como en la cantidad total de pies-acres suministrada durante cada período.

Calidad de la Provisión de Agua. - Además de su cantidad, es menester examinar también la calidad de una provisión de agua que se quiera usar para la irrigación. El agua, al fluir, disuelve y se lleva del suelo o de la roca por donde pasa pequeñas cantidades de sales minerales o alcalinas. A consecuencia de esta acumulación paulatina, no son absolutamente puras las aguas de ningunas corrientes. Algunas de estas sales son inofensivas, mientras que otras son altamente perjudiciales para el crecimiento de las plantas.

En la región árida del occidente, en donde la precipitación pluvial es limitada, y en donde, como sucede frecuentemente, el carácter de la roca es tal que la disgregación es rápida, la cantidad de sales en solución es mucho mayor que en las regiones más húmedas del oriente. En donde las rocas son en su mayor parte cristalinas, como en el caso de los granitos, las aguas de las corrientes están más libres de materias en solución, pero en donde el agua fluye sobre esquistos, se encuentra frecuentemente cargada de dichas materias. Si las aguas empleadas para la irrigación contienen alguna cantidad considerable de sales en solución, existe el peligro de que el suelo se impregne suficientemente de ellas para quedar inutilizado para el cultivo de las cosechas. Esto sucede especialmente si los suelos mismos, antes de irrigarse, ya contienen una pequeña cantidad de estas sales solubles perjudiciales.

No hay ninguna regla fija respecto a la cantidad de sales solubles o de álcali que basta para que el agua sea peligrosa para los objetos de la irrigación. Esto dependerá del carácter de las sales, de las condiciones naturales del suelo, de la cantidad de agua empleada para la irrigación, y de la eficacia del desagüe subterráneo para impedir las acumulaciones de álcali en la superficie. Son pocas las aguas de las corrientes naturales que sean inapropiadas para los objetos de la irrigación, si se toman las precauciones debidas al emplearlas, y si las tierras a

que se aplican no se hallan ya fuertemente cargadas de álcali. Es importante que se conozca la calidad de las aguas, no con el objeto de condenarlas, sino de asegurar que sean empleadas debidamente.

Se dice frecuentemente que un décimo del 1 por ciento de sales solubles, es decir, 100 partes de sales en 100,000 de agua, es el límite de seguridad para las aguas que se quieran emplear para la irrigación. Sin embargo, hay casos en los cuales se han empleado aguas que contienen dos o tres veces esta cantidad de sales sin que se haya originado ningún perjuicio notable. Por otra parte, se han conocido casos en que las aguas que contienen menos de la mitad de dicha cantidad han perjudicado grandes áreas, cuando se han empleado descuidadamente. Al dictaminar respecto a la calidad de las aguas que se quieran usar para la irrigación, deben tomarse en consideración el carácter de las sales solubles que contengan y las condiciones en las cuales se hayan de usar.

La Cantidad de Agua que se Requiere para la Irrigación. - La cantidad de agua que se requiere para cultivar las cosechas con éxito depende del clima, del suelo, y de la clase y del número de las cosechas que se cultiven. Por lo general, cuando el agua es abundante, se aplica una cantidad excesiva a la tierra, especialmente tratándose de los agricultores inexpertos en la irrigación. El agricultor que es muy experto en la irrigación obtiene los mejores resultados con la cantidad mínima de agua. El secreto del éxito consiste más bien en la perfección del cultivo que en el uso de un exceso de agua, y el agricultor que intenta ahorrarse el trabajo del cultivo aplicando una cantidad adicional de agua generalmente reduce el rendimiento de la cosecha, y pone en peligro no tan sólo su propia tierra, sino también la de su vecino.

En términos generales, puede decirse que la cantidad de agua que se requiere para tener éxito en la irrigación varía de desde 1 hasta 3 pies-acres al año, es decir, una cantidad suficiente para cubrir la tierra de agua hasta una profundidad de desde 1 hasta 3 pies. En algunos distritos extremadamente áridos, en los cuales las condiciones del clima son tales que se pueden cultivar cosechas durante prácticamente todo el año, se puede emplear mayor cantidad de agua que la que se acaba de expresar.

Por lo general, los suelos pesados, en los cuales el agua se filtra muy lentamente, requieren menor cantidad de agua que los más porosos. Sin embargo, estos suelos requieren un cultivo perfecto para conservarlos en las condiciones debidas, de manera que puedan absorber y retener el agua que se les aplica. En las condiciones producidas por las sequías, se han levantado excelentes cosechas y se ha logrado que las huertas produzcan una gran abundancia de fruta aplicando el agua cuidadosamente en una cantidad de no más de 1 o 1 1/2 pies-acres al año.

Capítulo IV.

Proyectos y Construcción de Canales.

Capacidad. - Por la capacidad de un canal, en cualquier punto determinado, se entiende la cantidad de agua que pasará por ese punto en condiciones normales. Al hacer los planos para la construcción o el ensanche, es necesario conocer el área agrícola a la que el canal deba servir, así como la cantidad máxima de agua que se tenga que suministrar durante el período en que se requiera el máximo de irrigación. Al considerar el total de la demanda anual de agua, conviene dividir la demanda entre los meses, o entre períodos más breves que abarquen toda la temporada de irrigación. En los casos en que no se dispone de datos para determinar la cantidad efectiva de agua necesaria para el máximo de irrigación durante cualquier mes determinado, hay que recurrir a diversas suposiciones, y estos cálculos aproximados deben ser lo suficientemente amplios para cubrir todas las emergencias futuras. Por ejemplo, si se sabe que durante una temporada de irrigación de una duración de, digamos, seis meses, se requiere una cantidad de agua de 30 pulgadas de profundidad, o de 2 1/2 pies-acres, por cada acre, es probable que sea acertado suponerse que se necesitará por lo menos un 40 por ciento más que esta cantidad media, o sea una profundidad de 7 1/2 pulgadas, en un solo mes durante el período de la irrigación máxima.

Habiéndose determinado la cantidad de agua que se requiere en el mes de la demanda máxima, se encuentra la capacidad que debe tener el canal multiplicando la profundidad en pies del agua necesaria por el número total de acres que se tienen que regar y dividiendo el producto entre el número de días del mes. Esto dará el número de pies-acres que se necesitan diariamente, los cuales se pueden reducir a pies-segundos dividiéndolos entre 1.98, puesto que el flujo continuo de 1 pie-segundo durante veinticuatro horas equivale a 1.98 pies-acres.

El cálculo anterior resulta satisfactorio si se trata de proyectar los canales principales, o los grandes canales laterales en los cuales se puede sostener un flujo prácticamente continuo un día tras otro. Si se trata de proyectar los canales más pequeños o laterales, destinados

para servir solamente a una pequeña área, debe tenerse en cuenta el hecho de que es posible que no se usen continuamente. Debe calcularse la capacidad del canal de manera que pueda entregar la cantidad de agua necesaria durante el período de tiempo en que sea probable que se efectúe la irrigación por medio de él. Por ejemplo, un canal que tenga una capacidad de 10 pies cúbicos por segundo entregará aproximadamente 20 pies-acres por día, o 600 pies-acres por mes. Un canal semejante que tenga que suministrar un riego máximo de $1/2$ pie-acre por mes es capaz, teóricamente, de regar 1,200 acres. Es probable, sin embargo, que la irrigación de esta extensión de terreno no tenga que ser continua para que se obtengan buenos resultados económicos, sino que la irrigación se efectúe en toda el área durante un período de diez a quince días, y que no se requiera una nueva aplicación de agua hasta después de igual período de tiempo.

Al fijar la capacidad de un canal, es necesario tener en cuenta el tiempo efectivo durante el cual el canal ha de funcionar, y calcularla de manera que se pueda entregar la cantidad de agua necesaria durante dicho período. También hay que tomar en consideración las pérdidas probables originadas por la filtración y la evaporación. La cantidad de éstas dependerá de la extensión del canal, del carácter del material y de las condiciones del clima. No se pueden fijar reglas definidas para determinarlas. En los casos en que se dispone de datos relativos a las pérdidas ocasionadas por la filtración y la evaporación, es fácil determinar dichas pérdidas. En los casos en que no se dispone de estos datos, hay que hacer cálculos aproximados. La capacidad de un canal debe ser suficiente para suministrar la cantidad neta de agua que se necesite para la tierra, y para poder fijar esta cantidad hay que tener en cuenta las pérdidas por evaporación y filtración que se puedan esperar.

Un método conveniente para determinar la capacidad necesaria de un canal para un área determinada consiste en determinar primero el área que podrá ser servida por un flujo continuo de 1 pie cúbico de agua por segundo, lo cual se puede computar de la manera siguiente:

Suponiendo -

que a represente el área,

- " d " la cantidad máxima del agua necesaria, es decir,
la profundidad total que se requiere en la tierra
en un período de tiempo determinado,
" t " el número de días en el período que se considera,
" p " el porcentaje de las pérdidas ocasionadas por la
filtración y la evaporación del canal,

Entonces

$$43,560 ad = 86,400 t(1.00 - p)$$

o

$$a = \frac{86,400 t(1.00 - p)}{43,560 d} = \frac{1.98 t(1.00 - p)}{d}$$

Si suponemos que la cantidad de agua que la tierra necesita durante un período de treinta días llega a 0.6 de pie y que la pérdida originada por la filtración y la evaporación equivale a un 10 por ciento del flujo total,

$$a = \frac{1.98 \times 30 \times 0.90}{0.6} = 79.1 \text{ acres.}$$

Trazado de los Canales. - En el término "trazado" de un canal quedan comprendidos la relación de éste con la fuente de aprovisionamiento, con los puntos en que se tiene que entregar el agua, así como con todas las demás condiciones naturales o de cultivo. Al hacer el trazado de los canales, hay que considerar, entre otros puntos, (a) la economía de su construcción y sostenimiento; (b) la seguridad contra la posibilidad de que ocurran rupturas; (c) la extensión máxima de tierra que se puede irrigar por medio del sistema. Deben hacerse primero mediciones preliminares, que sean suficientes para determinar aproximadamente el área que se quiere regar. Teniendo estos datos, y conociéndose la cantidad de agua que se tiene que suministrar, puede determinarse la capacidad del canal. El siguiente paso consiste en proyectar una sección típica para el canal y en fijar la pendiente de éste. Los diversos puntos que se tienen que considerar al hacer esto se tratan en un párrafo posterior, así es que, por ahora, basta con suponer que se ha fijado la sección del canal y de sus bordes, así como el declive en que se ha de hacer el tra-

zado del canal.

Para que la construcción resulte económica, el canal debe trazarse de manera que las excavaciones den el material necesario para los bordes, haciéndose una deducción razonable por el concepto del encogimiento, por ejemplo, de cerca de un 10 por ciento. El tajo de la profundidad necesaria para esto se define como el tajo normal o económico. Antes de comenzarse el trabajo efectivo del trazado en el campo, deben calcularse los tajos que resulten más económicos en el terreno plano y en los declives laterales de diversos grados, para que el ingeniero encargado del trazado pueda consultar fácilmente los datos respectivos. Los datos de esta especie son útiles en el campo para determinar el trazado que requiere la excavación mínima, puesto que esto constituye uno de los factores importantes del trazado.

Además de la cantidad mínima de excavación, es necesario considerar otros factores. En el terreno que tenga declive es a menudo necesario excavar una cantidad de material mayor que la que se requiere para los bordes, con el fin de que la excavación hecha para formar el canal tenga la profundidad suficiente para darle la seguridad debida a éste. Al hacer un trazado en un declive interrumpido por lomas largas y angostas, resulta frecuentemente económico y de acuerdo con el mejor criterio de la ingeniería, en vista de que así se reduce la longitud y se evita el aumento de la superficie del agua expuesta a la evaporación, cortar las lomas, en lugar de intentar dar la vuelta a ellas siguiendo aproximadamente el perfil del canal. Lo que se acaba de decir se aplica de igual manera a la conveniencia de que se atraviesen las depresiones o barrancos largos y estrechos, en donde la cantidad del material excavado no sería suficiente para formar los bordes, y se tendría que acarrear material adicional de las lomas vecinas o sacarse de excavaciones practicadas para el objeto en las inmediaciones del canal. Antes de adoptar el trazado definitivo, conviene hacer dos o más trazados distintos y hacer cálculos preliminares del costo de cada uno de ellos.

Si se tienen que hacer terraplenes, el trazado debe hacerse con mucho cuidado, en vista del gran peligro de rupturas y del mayor costo del

sostenimiento. Especialmente, si se trata del trazado de los canales principales más grandes, primero debe tomarse en consideración la cuestión de la seguridad. Debe tenerse presente que el costo adicional del sostenimiento de un canal en un terreno poco firme, aunque es un factor importante, es de mucha menor importancia que las pérdidas posibles de las cosechas originadas por la inutilización del canal durante el período de una estación de irrigación en el cual se necesita más el agua. Esto es notablemente cierto en el caso de las regiones extremadamente áridas, en las cuales la aplicación del agua es una necesidad absoluta para la explotación agrícola.

Alineación. - La alineación exacta de un canal le sigue en importancia al trazado económico y seguro. Es deseable que se eliminen las vueltas bruscas y que se reduzca el número de las curvas, para que así se reduzca la extensión del canal y se impida la erosión, la que ocurre a veces en las curvas cortas. Los requisitos respecto a la alineación en el trazado de un canal son menos rígidos que en el caso de las vías férreas. Sin embargo, hay ciertos puntos a los cuales debe dedicarse la consideración debida. Al final de las tangentes largas, en donde la acción del oleaje puede resultar considerable, como sucede en el caso de los canales grandes, las curvas deben hacerse tan suaves como sea posible, con el objeto de evitar que se deslaven los bordes. Deben tomarse precauciones especiales si el borde expuesto a semejante acción está en un terraplén. Si la curva entra en el declive, como sucede en el caso en que se da vuelta a la cabeza de un barranco, se pueden usar curvas más cortas sin el peligro que existe cuando la curva se dirige hacia afuera, como sucede en el caso en que se da vuelta a la punta de una loma. Esto se debe a la mayor velocidad y a la mayor tendencia a la erosión que hay por el lado exterior de las curvas.

No se ha podido determinar de una manera definitiva la resistencia precisa de una curva al flujo del agua en los cauces abiertos. Se cree, sin embargo, que para las velocidades del flujo que se consideran seguras para los canales con cauce y bordes de tierra, puede usarse una curva en la línea central cuyo radio sea igual a dos veces y media el ancho

del fondo del canal, sin que se afecte de una manera apreciable la velocidad media del flujo. Algunos ingenieros creen que ésta es una regla segura para fijar la alineación de los canales. Sin embargo, hay un gran número de ejemplos en los cuales se han usado curvas más pronunciadas y se han obtenido resultados satisfactorios, especialmente en los casos en que la mayor parte del canal se ha formado por medio de la excavación, de manera que la erosión no puede debilitar los bordes.

Sección Transversal. - La elección de la sección transversal de un canal es una cuestión que implica tanto la economía de la construcción y del sostenimiento, como la seguridad contra las rupturas, las cuales pueden resultar desastrosas para un sistema de irrigación. Esto requiere que se considere la teoría del flujo del agua en los cauces y que se ejerza el debido criterio profesional. Desde el punto de vista puramente teórico, parece que la sección que (a) llevará la cantidad necesaria de agua, (b) conservará la pendiente para que se pueda abarcar la mayor área posible y (c) requerirá la menor cantidad de excavación para su construcción, es la que debe elegirse. Tratándose de un canal de una pendiente determinada y que tenga una sección transversal de un área determinada, se obtendrá la mayor velocidad eligiendo la sección que tenga el radio hidráulico máximo. De esto se sigue que una sección semejante necesitará una pendiente menor para la misma capacidad que cualquiera otra sección de la misma área. Puede demostrarse que una sección circular o semicircular tiene el mayor radio hidráulico para un área determinada. También puede demostrarse, en el caso de las secciones rectangulares y trapezoidales, que cuando el ancho de la superficie es igual a la suma de los dos declives laterales, y el radio hidráulico es igual a la mitad de la profundidad del agua, el radio hidráulico representa el máximo. La sección rectangular más ventajosa es la cuyo ancho superior es igual a dos veces la profundidad. En el caso de las secciones trapezoidales, para que se pueda obtener el radio hidráulico máximo, hay que mantener determinadas relaciones fijas entre el ancho y la profundidad del agua, las cuales dependen de lo precipitoso de los declives laterales. Para algunos de los declives que se usan más comúnmente, estas

relaciones son las siguientes:

- Declives (hipotenusas) en los cuales la horizontal es igual a la mitad de la vertical..... - el ancho de la superficie = $2.24 \times$ la profundidad.
- Declives (hipotenusas) en los cuales la horizontal es igual a la vertical..... - el ancho de la superficie = $2.83 \times$ la profundidad.
- Declives (hipotenusas) en los cuales la horizontal es igual a $1 \frac{1}{2}$ veces la vertical..... - el ancho de la superficie = $3.60 \times$ la profundidad.
- Declives (hipotenusas) en los cuales la horizontal es igual a 2 veces la vertical..... - el ancho de la superficie = $4.47 \times$ la profundidad.

Estas secciones, aunque son teóricamente las más ventajosas, no son, por lo general, las más prácticas, debido a la profundidad excesiva que requieren para los canales que tengan una sección transversal de un área grande. En la Figura 10 se ven las secciones que se han adoptado para los canales que se han construido en las condiciones comunes que ofrece un terreno casi plano o con una ligera pendiente.

Al construir los canales de tierra, es necesario, por consideraciones de economía, utilizar los bordes para formar una parte del cauce. En otras palabras, los bordes que se levantan tienen que retener una parte del agua. Con el objeto de reducir la filtración y de disminuir el peligro de las rupturas, es conveniente limitar la fuerza o presión del agua sobre los bordes artificiales. Por lo general, es menos fácil que un canal ancho y de poco fondo presente dificultades originadas por la filtración que un canal estrecho y profundo. Por otra parte, un canal de poco fondo, para una sección de la misma área, necesita tener una pendiente mayor para que pueda llevar el mismo caudal de agua que un canal estrecho y profundo. Las ventajas relativas de las secciones de diversos tipos han sido el tema de muchas discusiones entre los ingenieros que se dedican a las obras de irrigación. Los argumentos aducidos, aunque son valiosos si se trata de un solo caso determinado, no nos llevan a conclusiones generales. La sección estrecha y profunda, aunque generalmente requiere un menor volumen de excavaciones para una capacidad y

una pendiente determinadas, podrá resultar más costosa en la construcción, debido al carácter del material con que se tropiece en las excavaciones, así como a la dificultad de sacar el material de una profundidad mayor. Un canal ancho y de poca profundidad construido en los declives de las lomas tiene la desventaja de exigir grandes excavaciones por el lado superior, y hace que sea difícil conservar el agua debidamente dentro de la parte excavada del cauce por el lado inferior sin un costo considerable.

No se pueden formular ningunas reglas fijas para la elección de la sección de un canal, sino que cada caso determinado debe ser tratado tomando debidamente en consideración la seguridad y la economía de la construcción. En la práctica, es necesario considerar la profundidad máxima de agua que un canal puede llevar con seguridad, la altura de la superficie del agua sobre la superficie natural del terreno, y la profundidad hasta la cual se pueden hacer las excavaciones de una manera económica. En los canales grandes, éstos serán los factores principales que determinarán la profundidad de la sección, y el área que se requiera para tener la capacidad necesaria determinará el ancho. En los canales pequeños, en los cuales la profundidad no es grande y la pendiente es a veces un factor importante, debe tomarse en consideración la sección que tenga el mayor radio hidráulico.

Algunas veces, al construirse los canales en un terreno relativamente plano, se pone el borde a una distancia de unos cuantos pies de la excavación, formando así una berma. Esto tiene el efecto de aumentar el área transversal sin aumentar el volumen de la excavación. Debido a la relativamente poca profundidad del agua cerca de los bordes, se reducen las velocidades en esta parte de la sección y es menor la tendencia a que se produzca la erosión de los bordes. La sección de un canal construido con una berma, excepto en el caso de un terreno muy plano, tiene un área irregular, quedando confinada el agua en un cauce muy estrecho en las partes en donde la excavación es profunda y permitiéndosela extenderse en las partes en donde la excavación tiene poca profundidad. En los casos en que es necesario que los canales funcionen con capacidades varia-

bles, las bermas se encuentran alternativamente mojadas y secas, y las condiciones favorecen el crecimiento de la cizaña y del pasto. En general, se cree que las bermas constituyen más bien una desventaja que una ventaja, y que los resultados más satisfactorios se obtienen adoptando una sección transversal uniforme cuyos declives laterales sean lo suficientemente suaves para impedir la erosión y el desmoronamiento gradual.

Los Declives y el Ancho de los Bordes. - El declive con el cual deben construirse los bordes de los canales depende en gran parte del carácter de los materiales. Como se ha indicado en el párrafo anterior, cuanto más empinado sea el declive del lado interior de los bordes, tanto menor es el volumen de la excavación necesaria para formar un cauce de una capacidad determinada. Esto sucede más especialmente en los tajos profundos, en los cuales una gran parte de la excavación se encuentra sobre el cauce del agua. Por lo tanto, se sigue de esto que, en el caso de los tajos profundos, debe darse a los bordes el declive más empinado que el material pueda soportar sin peligro. El declive (hipotenusa) varía con el material: en el caso de las excavaciones hechas en roca, la horizontal es igual a la mitad de la vertical; y, en el caso de las excavaciones hechas en tierra ligera común, la horizontal es igual a tres veces la vertical. En algunos casos el declive puede hacerse más empinado, siendo la horizontal igual a menos de la mitad de la vertical; por lo general, sin embargo, los declives más empinados que los que resultan de esta última proporción, a no ser que se hagan en roca muy firme, tienden a desmoronarse, debido a la acción de la intemperie, con lo cual se va azolvando gradualmente el cauce.

En el caso de los declives de los bordes hechos de tierra, es raro que se encuentre un material que soporte un declive mayor que el que resulte de una horizontal que sea igual a 1 1/2 veces la vertical. En la parte de la excavación que forma el cauce del agua, la acción de ésta tiende a producir la erosión o desgaste gradual de los lados. La mayor erosión ocurre generalmente a una pequeña distancia debajo de la superficie del agua, y desde este punto va disminuyendo gradualmente hacia el fondo. Esta erosión tiene el efecto de formar un cauce redondeado, en

el cual desaparecen los ángulos bien marcados de las intersecciones de las líneas de los lados y del fondo. El resultado general es que se va aplanando el declive de todo el borde, debido tanto a la erosión como a los efectos de la intemperie sobre el material que se encuentra arriba del punto en que ocurre la erosión. En los bordes construídos con un declive en el cual la horizontal es igual a 1 1/2 veces la vertical, se encuentra, después de unos cuantos años, que el declive corresponde a una horizontal que es igual a 2 veces la vertical, o que ha quedado aun más suave. Cuando se quiere tener un camino en la cara superior de un borde, es necesario hacer éste de una anchura algo mayor que la definitiva que necesite tener, en vista de la reducción de la anchura producida por el aplanamiento de los declives. Cuando los bordes se construyen con declives suaves, se reduce la tendencia a que el ancho de la cara superior disminuya. En los declives exteriores de los bordes la tendencia al aplanamiento es menor, debido, en parte, a que no los toca el agua, por lo cual no se presentan los efectos de la erosión y del ablandamiento del material. Sin embargo, en el caso de los materiales muy ligeros, la acción del viento puede producir una marcada reducción del declive exterior. Uno de los peligros que existe en los declives exteriores demasiado empinados, especialmente en los canales nuevos, consiste en su tendencia a desmoronarse o deshacerse cuando el borde llega a saturarse. Este peligro puede llegar a ser grave en los bordes de una altura considerable construídos de un material ligero y permeable. El ancho que debe tener la cara superior de los bordes, así como la altura de éstos sobre la superficie del agua del canal, son cuestiones que se tienen que decidir en cada caso especial, y dependerán de la profundidad del agua y del carácter de los materiales con los cuales se construyen los bordes. Tratándose de los canales más grandes y más importantes, se cree que la altura de los bordes sobre el nivel máximo de la superficie del agua no debe ser menor de 3 pies, y que el ancho de la cara superior no debe ser menor de 8 o 10 pies. Si se quiere sostener un camino en la cara superior de un borde, debe aumentarse este ancho.

Material para los Bordes. - Por lo general, es difícil que se puedan

elegir los materiales para formar el cauce de un canal, puesto que, en la mayoría de los casos, para que se pueda conservar el costo dentro de límites razonables, es necesario emplear para este objeto los materiales naturales que se encuentren en el terreno en que se construye el canal. Ocorre frecuentemente que se tienen que construir los canales en suelos o rocas que son sumamente permeables, y el ingeniero tiene que resolver si se puede o no se puede construir un cauce que sea razonablemente impermeable. Esta cuestión implica no tan sólo la parte del cauce formada sobre el nivel de la superficie natural del terreno por medio de bordes artificiales, sino que implica también la parte del cauce que se encuentra en el tajo excavado, especialmente si éste se hace en los declives de las lomas. La arcilla es quizás el menos permeable de los diversos materiales en los cuales se construyen los canales, mientras que la arena gruesa o el cascajo son los que ofrecen la menor resistencia al paso del agua. La cuestión de la permeabilidad del suelo depende de la cantidad de material fino que éste contenga. La arena o los cascajos se componen de partículas sólidas de dimensiones apreciables, habiendo huecos de un tamaño muy perceptible entre estas partículas. Esto también sucede en las formaciones de roca quebrada o deshecha, si los espacios entre la roca no se encuentran rellenos de tierra u otro material fino. La arcilla, al contrario, puesto que se compone de partículas finas, tiene huecos correspondientemente pequeños, tan pequeños que no permiten que el agua pase fácilmente.

Además de la cuestión de la permeabilidad, también debe tomarse en consideración el carácter de los materiales al fijarse la sección transversal, los declives de los bordes y las velocidades que se puedan emplear sin peligro. En los casos en que se dispone de una cantidad limitada de material que se preste para hacer un borde impermeable, es a veces necesario separar los materiales, colocándose el material impermeable ya sea en la cara interior del borde o en la forma de un alma en el centro de éste. Es generalmente más económico poner este material en el declive interior del canal que en el centro del borde. Sin embargo, si se coloca de esta manera, hay algún peligro de que la superficie de

los declives desaparezca a consecuencia de la erosión, o de que éstos se vayan desmoronando y cayendo en el canal, dejando así al descubierto la capa inferior de material poroso.

Lo que se acaba de decir respecto a la disposición de los materiales en los declives laterales se aplica con igual fuerza al fondo de los canales construídos en materiales porosos. Los suelos y las margas que contienen una cantidad considerable de materia vegetal forman generalmente bordes impermeables, pero, debido a que este material es relativamente ligero, éstos tienen que hacerse con declives relativamente suaves. Si se mezcla una cantidad suficiente de arcilla con la arena o el cascajo para llenar los poros y darle solidez, se obtiene un buen material para los bordes. Cuando se trata de la construcción de canales en lugares en donde se encuentran diferentes materiales en las excavaciones, es una práctica recomendable especificar que el material grueso debe colocarse en la parte exterior de los bordes, y los materiales más finos en la parte interior.

Pendientes y Velocidades. - En muchos casos las pendientes de los canales son fijadas más bien en vista de consideraciones de orden práctico que de orden teórico. En los casos en que es necesario reducir la pendiente al mínimo para que se pueda abarcar la mayor área posible de la tierra irrigable, las alturas relativas del punto de partida del canal y de las tierras son los factores principales. En estos casos, se sacrifica la velocidad, así como algo de economía en la construcción del canal, con el objeto de aumentar el área irrigable. El problema que el ingeniero tiene que resolver consiste en hallar el punto de equilibrio entre el costo adicional de la construcción y el valor de las tierras adicionales que se pueden irrigar. En el caso en que se cuenta con una pendiente amplia, de manera que no se tiene que procurar darle al canal la menor pendiente posible, el problema consiste en buscar la mayor economía en el proyecto y la construcción que sea compatible con la explotación segura y económica.

Hay determinadas limitaciones que no se pueden pasar por alto. Si la pendiente de un canal es demasiado reducida y la velocidad correspon-

diente del flujo es demasiado baja, hay una tendencia constante a que el canal se azolve debido a los depósitos formados por las materias que las aguas llevan en suspensión. Si se reduce la velocidad más allá de ciertos límites, también se facilita el crecimiento de cizañas y pastos nocivos en un canal. En los casos en que las pendientes son demasiado marcadas y las velocidades son correspondientemente altas, se produce la erosión del cauce.

La pendiente ideal para un canal es la que ni puede ocasionar la erosión de los bordes ni permitir que se formen depósitos en el fondo. Sin embargo, no puede realizarse completamente esta condición, debido a los diferentes materiales en los cuales los canales se tienen que construir y al carácter variable de las materias que el agua lleva en suspensión. Con el objeto de impedir la erosión de los canales, se ha considerado necesario conservar las velocidades debajo de ciertos límites para determinadas clases de materiales. Estos límites se fijan comúnmente en desde cerca de 2 1/2 pies por segundo para los suelos muy ligeros hasta 5 a 7 pies por segundo para los casos en que el material con que se cuenta consiste en las tierras del carácter más firme. Se considera generalmente que la erosión es una función de la velocidad, y que no es necesario tener en cuenta las pendientes que son necesarias para producir esta velocidad en los canales de diferentes tamaños y de secciones de diferentes formas. Una consideración más amplia del punto parece indicar que la erosión en un canal es una función de la pendiente, del tamaño y de la forma de la sección, así como de la velocidad, o, en otras palabras, que depende, hasta cierto punto, de la cantidad de energía gastada por la corriente para vencer la resistencia de la fricción en el cauce.

Este punto se puede ilustrar considerando dos canales de secciones transversales semejantes, pero cuyos tamaños relativos son tales que el más pequeño requiere dos veces la pendiente del más grande para producir la misma velocidad en el flujo. Es evidente que en el canal más pequeño, es decir, en el de mayor pendiente, la energía gastada por cada unidad de la cantidad de agua para vencer la fricción será mayor y que, en

consecuencia, la tendencia a la erosión será también mayor. El mismo principio se aplica a los canales cuyas secciones transversales tienen exactamente la misma área, pero son de formas tan distintas que se requiere una pendiente mayor en el uno que en el otro para mantener la misma velocidad. La cuestión respecto a la proporción en que la erosión en los canales es afectada por el aumento de las pendientes, siendo las velocidades constantes, es una con relación a la cual se carece de datos basados en experimentos. Las observaciones hechas en los canales grandes y en los pequeños, construídos en materiales del mismo carácter, parecen indicar que los canales pequeños son afectados por la erosión con velocidades menores que en el caso de los canales más grandes. Tomemos, por ejemplo, un canal cuyo fondo tiene un ancho de 4 pies, con declives laterales en los cuales la horizontal es igual a 1 1/2 veces la vertical, y que lleva agua de una profundidad de 3 pies. En el caso de este canal, el radio hidráulico medio sería de aproximadamente 1.7; con una pendiente de 0.00125, o de 6.6 pies por milla, y un valor de $n = 0.025$, la velocidad del flujo sería aproximadamente de 2.90 pies por segundo. Es probable que la erosión ocurriría en estas condiciones, excepto en el caso de los materiales más firmes. Un canal cuyo fondo tuviera 40 pies de ancho, con declives laterales en que la horizontal fuera igual a 1 1/2 veces la vertical, y que llevara agua de una profundidad de 10 pies, tendría un radio hidráulico medio de 7.6, y, siendo $n = 0.025$, requeriría una pendiente de 0.00015, o de 0.3 pies por milla, para darle la misma velocidad media. Esta pendiente y esta velocidad no se considerarían como excesivas, y es probable que no se presentaría la erosión en un suelo medianamente firme.

El azolvo de los cauces es un punto al que se ha dedicado relativamente poca atención en los Estados Unidos, debido a que, por lo general, es relativamente pequeña la cantidad de aluvión que llevan los canales de irrigación. En la India y en Egipto, en donde son grandes las cantidades de aluvión que entran en los canales, se ha dedicado mucha atención a las velocidades y a las formas de las secciones transversales, con el objeto de procurar impedir los depósitos de este material. La velocidad

necesaria para impedir un depósito semejante depende del carácter y de la finura del material que el agua lleve. Ha prevalecido la teoría común de que una velocidad de 2 pies por segundo es suficiente para impedir los depósitos de aluvión. Es probable, sin embargo, que una serie de observaciones cuidadosas, efectuadas en distintas condiciones, demostraría que en algunos casos las velocidades más bajas bastarían para llevarse el aluvión, mientras que en otros resultarían en que éste se depositara.

El señor R. G. Kennedy, que ha hecho extensos estudios y observaciones respecto al azolve de los canales en la India, sostiene la teoría de que la capacidad de un canal para llevarse el aluvión es tanto una función de la profundidad del agua como de la velocidad de ésta. Como resultado de sus experimentos, el señor Kennedy ha elaborado una fórmula empírica que indica la relación entre la velocidad dentro de cuyos límites se depositará el aluvión y la profundidad del agua, que es la siguiente: $V = Cd^m$, en la cual V representa la velocidad a la que comienzan a formarse depósitos de aluvión, d la profundidad del agua, y c y m son constantes. Los valores de estas constantes se han fijado de la manera siguiente: $c = 0.84$, y $m = 0.64$. Esta teoría demuestra que la velocidad que es suficiente para llevarse el aluvión es menor en los canales de poca profundidad que en los profundos.

Se ha encontrado en la práctica que si se varía ya sea la sección transversal o la pendiente de un canal, se presenta en cada caso una tendencia a que se produzca la erosión y se formen depósitos de aluvión, y que se obtienen los mejores resultados conservando una sección y declives uniformes.

La siguiente es una tabla de las funciones hidráulicas de algunos de los principales canales construídos por el Servicio de Reclamación de los Estados Unidos. Los valores que se le asignan a " n " son los que se tomaron por sentados en los proyectos de los canales.

(No se transcribe esta tabla por ser demasiado extensa.)

Excavación. - El término "excavación", aplicado a los canales, comprende generalmente toda la obra de tierra necesaria para la construcción

del canal, para formar los bordes, y para las demás obras incidentales, como la construcción de las entradas a las tajeas y de los caminos para llegar a los puentes, así como el relleno de tierra alrededor de las estructuras.

La excavación de los canales, debido a la magnitud relativa de esta parte de la obra, es uno de los factores más importantes en la construcción de un sistema de irrigación. Las cuestiones fundamentales que implica la excavación consisten en el costo y en la determinación de los métodos por medio de los cuales se pueden obtener los resultados más satisfactorios y más económicos. También implican la medición y la clasificación de los materiales excavados y la dirección de la obra de tal manera que el canal, al quedar concluido, pueda servir como un cauce permanente, con un mínimum de pérdidas ocasionadas por la filtración y con un mínimum de costo para su sostenimiento. La excavación de los canales se hace generalmente ya sea por fuerza animal o por medio de alguna forma de maquinaria excavadora movida por fuerza motriz. La ventaja que cualquiera de estos métodos pueda tener sobre el otro depende, en gran parte, del carácter de los materiales que se tengan que manejar y de las condiciones locales que afecten a la obra. Cuando la obra se extiende sobre un área considerable, como en el caso de los canales pequeños, se hace comúnmente de la manera más ventajosa por medio de cucharas arrastradas por caballos, o de alguna forma de máquina excavadora portátil que pueda ser transportada por caballos o por tractores, como se ve en la Lámina III.

Quando la obra está concentrada en un punto, de manera que se tiene que trasladar muy poco la maquinaria de un lugar a otro, como en el caso de la excavación de canales grandes o de tajos profundos, la maquinaria pesada para excavar, como, por ejemplo, las excavadoras de vapor, las cucharas mecánicas o las dragas, resulta más económica y permite que la obra avance más rápidamente que si se emplea la fuerza animal. También hay que considerar la cantidad de trabajo que se tenga que hacer, para que se pueda determinar el método que resultará más económico y más apropiado. Para una obra pequeña, en la cual el costo de la instalación de

una planta constituye una gran proporción del costo total de la obra, el costo de cada unidad del trabajo efectuado por medio de maquinaria puede exceder del costo que hubiera tenido con un equipo menos costoso, aunque éste hubiera sido de un carácter menos eficaz; mientras que en el caso de una obra grande, el costo de la instalación de la maquinaria más costosa y más eficaz podría haberse distribuido entre una gran cantidad de trabajo, y podría haberse disminuido en proporción el costo de cada unidad de éste. (Véanse las Figuras A y B en la Lámina IV.)

La distancia a la que se tiene que acarrear el material es también un punto importante para determinar el método que se debe seguir. Para el trabajo efectuado por medio de la fuerza animal, en los casos en que la distancia hasta la cual se tiene que acarrear el material no excede de 100 a 200 pies, se ha encontrado que las cucharas "Fresno", tiradas por cuatro caballos, son las más eficientes, mientras que para las distancias mayores se prefieren otros tipos, como, por ejemplo, la cuchara rotatoria. La ventaja de ésta consiste en que el arrastre, el cual ocupa la mayor parte del tiempo, puede hacerse con menor número de animales que el que se necesita para cualquier forma de la cuchara común. Para los arrastres largos, se acostumbra emplear animales adicionales para la maniobra de cargar las cucharas, y desengancharlos tan luego como ésta termina, permitiendo que un solo tronco de animales lleve la carga a su destino. (Véase la Lámina III.)

En la construcción de los bordes, el trabajo efectuado por la fuerza animal tiene una ventaja sobre los demás métodos, debido a que el paso de los animales sirve para consolidar los bordes. Cuando los bordes que han de retener el agua se construyen por otros métodos, es necesario recurrir a algún medio para hacer que la tierra quede más compacta. La manera más común de hacer esto consiste en usar rodillos o pisones. Debido a que es difícil emplear un rodillo en los bordes pequeños, se prefiere generalmente la fuerza animal para esta clase de trabajos.

Debe tenerse presente que cada obra de excavación difiere, por lo menos en ciertos detalles, de otras obras semejantes que se hayan hecho, y

que los métodos que hayan resultado completamente satisfactorios en una obra determinada pueden ser completamente inapropiados para otra. Es por esto que es imposible decir, de una manera general, que un método sea superior a otro. Al calcular el costo de una obra hecha por un método determinado, el proceder más seguro consiste en compararlo con el costo de una obra semejante hecha en alguna otra parte, tomándose en consideración la diferencia de las condiciones locales. Es probable que los resultados obtenidos de esta manera sean mucho más satisfactorios que aquéllos que se basen en consideraciones puramente teóricas.

Como una base para los cálculos del costo, y para fijar los precios por manejar los materiales de diferentes especies, se acostumbra dividir la excavación en clases. Un método consiste en clasificar los materiales por sus denominaciones naturales, como, por ejemplo, tierra, tepetate, roca suelta, roca maciza, etc. Un segundo método consiste en clasificar los materiales según la manera de que se pueden manejar, como, por ejemplo, los materiales que se pueden arar, y los que se tienen que barrenar. Ambos métodos son, hasta cierto grado, inexactos y dejan la resolución de muchos puntos al juicio del ingeniero.

Al intentar seguir el primero de los dos métodos, es a veces imposible establecer una línea de demarcación precisa entre los diferentes materiales. La distinción entre la tierra y el tepetate, o aun entre la tierra y la roca, no se puede determinar siempre fácilmente, debido a que una clase de material se va transformando en la otra. Sucede a veces que sólo un geólogo experto puede hacer la clasificación debida conforme a estas denominaciones. Una clasificación geológica semejante puede resultar de muy poco valor práctico como una medida de la cantidad de trabajo que requiere la excavación. Algunas veces puede suceder que sea más difícil y más costoso remover un material que se puede definir propiamente como tierra que algún otro material que se puede designar propiamente como roca.

El segundo método de clasificación, conforme a alguna supuesta operación mecánica, evita el uso de términos vagos, y puede depender más aproximadamente de la cantidad del trabajo que la obra requiere y del cos

to resultante del mismo. Por ejemplo, se puede manejar generalmente con menor esfuerzo y con menor costo el material que se puede arar que el material que se tiene que aflojar con barrenos o por medio de otros métodos costosos. Se ha encontrado que es más satisfactorio este método de basar la clasificación en operaciones bien conocidas y claramente definidas para aflojar o manejar los materiales. Las diferencias de opinión respecto a una clasificación semejante se pueden resolver generalmente por medio de operaciones sencillas en la obra misma, con lo cual se evitan las definiciones que puedan depender de puntos técnicos muy sutiles.

Especificaciones para la Excavación. - La construcción de los canales, ya sea que se haga por contrata o por trabajadores bajo el control directo del ingeniero, debe hacerse de acuerdo con planos y especificaciones bien definidos. En el caso de las obras hechas por contrata, las especificaciones son necesarias para definir exactamente lo que abarca el contrato y para evitar toda mala inteligencia; y, en el caso en que la obra se hace por trabajadores bajo el control directo del ingeniero, son de una importancia casi igual como una guía para los sobrestantes y las demás personas encargadas de ejecutar la obra. Las especificaciones y los planos de la obra deben ser suficientemente completos para contestar a todas las preguntas comunes relativas a los métodos que deben seguirse para efectuar la medición, el pago y la clasificación de los materiales, así como respecto a la manera de que deben efectuarse los trabajos. Las siguientes especificaciones, las cuales se modifican cuando lo requieren las condiciones especiales, son las que usa el Servicio de Reclamación de los Estados Unidos:

(a) Clasificación. - Todo el material que se tenga que excavar en conexión con la construcción del canal se medirá en el sitio de la excavación, y se clasificará para el pago correspondiente de la manera siguiente:

Clase 1. - Todo el material que esté suelto y se pueda manejar con cucharas, así como todo el material que pueda ser arado por seis caballos, debiendo pesar cada animal no menos de 1,400 libras, que tiren de

un arado apropiado, el cual deberá estar manejado por no menos de tres hombres; también toda la roca suelta, en pedazos cuyo volumen no pase de 2 pies cúbicos, que se presente en el material suelto o en el material que se pueda arar de la manera antedicha.

Clase 2. - Todo el material que no esté comprendido en las Clases 1 y 3.

Clase 3. - Toda la roca fija que no se pueda remover sin emplear pólvora, y todas las masas de roca suelta que tengan un volumen que exceda de 10 pies cúbicos.

(b) Sección del Canal. - Las secciones del canal y de los bordes están indicadas en los planos, pero la incertidumbre que existe respecto a la estabilidad del material que debe formar los bordes del canal puede hacer que sea necesario, durante el progreso de la obra, variar los declives y las dimensiones que dependen de éstos. Las variaciones de este carácter no le darán derecho al contratista a que se le paguen cuotas distintas de las que fija el contrato. El canal se excavará hasta la profundidad y la anchura fijadas, y deberá acabarse de manera que sus líneas y pendientes tengan la precisión debida. Los declives de tierra se acabarán debidamente con cucharas planas u otros aparatos apropiados. Los fondos y los bordes de roca no deberán presentar ningunas puntas de roca que sobresalgan más de 0.3 de pie en la sección fijada. Sobre el nivel del agua, se permitirá que la roca quede en el ángulo más pronunciado que no ofrezca peligro, y no se exigirá ningún trabajo de acabado más allá de la remoción de las masas de roca que estén sueltas y expuestas a caerse.

(c) Material que Deberá Separarse. - Siempre que lo ordene el ingeniero, los materiales encontrados en las excavaciones, como arena, cascajo o piedra, que sean apropiados para su empleo en las construcciones, o que se necesiten de otra manera para objetos especiales, se separarán y conservarán en algún lugar conveniente que aquél designe.

(d) Material para los Bordes del Canal. - Todo el material apropiado que se excave dentro de las líneas prescritas del canal quedará disponible para la construcción de los bordes. La cantidad necesaria del

61

mismo será puesta en los bordes, conforme a las instrucciones del ingeniero. En los casos en que sea inadecuada la provisión de material obtenida de esta manera, se podrá obtener el material adicional sacándolo de los lugares que apruebe el ingeniero. A no ser que el ingeniero le dé al contratista órdenes específicas por escrito para que saque de dichos lugares un material que no sea el de la Clase 1 para la construcción de los bordes, todo el material obtenido de dicha manera se pagará al precio fijado en el contrato para el material de la Clase 1, sin que se tome en consideración el carácter real del material así obtenido.

(e) Construcción de los Bordes. - Todo el terreno en el cual se han de construir los bordes que tengan que soportar la presión del agua se limpiará de matorrales, árboles y raíces. Se arará bien la superficie para los cimientos de los bordes. En el caso de que el ingeniero ordene que se excave y remueva el material inapropiado del sitio del borde, el material así excavado se pagará a los precios fijados para las demás excavaciones. Todo el material depositado en los bordes que tengan que soportar la presión del agua se consolidará perfectamente. La consolidación deberá ser equivalente a la producida por el paso bien distribuido de los animales que arrastren las cucharas y depositen el material en capas que tengan un espesor de 6 pulgadas cuando hayan quedado consolidadas.

(f) Desaguaderos. - No se cortarán desaguaderos en los declives de las excavaciones del canal bajo el nivel que deberá tener el agua del canal.

(g) Barrenos. - No se permitirán ningunos barrenos que pudieran perjudicar la obra. Si los declives quedan despedazados o rotos por los barrenos, se harán excavaciones en estos puntos hasta llegar al material firme, y los huecos resultantes se rellenarán, de acuerdo con la pendiente o los declives, con el material y de la manera que el ingeniero indique, todo lo cual se hará a expensas del contratista.

(h) Excedente del Material Excavado. - El material excavado al hacerse el canal, que exceda de la cantidad necesaria para los bordes del canal, se utilizará para ensanchar los bordes, de acuerdo con lo que orde

ne el ingeniero. El material proveniente de los tajos que no sea apropiado para la construcción de los bordes, así como el demás material que no se necesite para los bordes o para ensanchar éstos, se podrá tirar en el derecho de paso perteneciente a los Estados Unidos, siempre que no se deposite en los cauces de desagüe ni a una distancia menor de 25 pies de la orilla de la excavación del canal.

(i) Acarreo Adicional. - Tratándose del acarreo del material excavado necesario para los bordes o para otros objetos útiles, o que se tenga que depositar a un lado para su aprovechamiento subsiguiente, se considerará la distancia de 200 pies como el límite del acarreo libre, y cualquier acarreo que exceda de esta distancia se denominará acarreo adicional. Cada vez que el ingeniero exija que dicho material se acarree a una distancia de más de 200 pies, se le pagará al contratista el acarreo adicional a razón de uno y medio centavos por yarda cúbica por cada 100 pies que pasen de los 200 pies antes mencionados. No se pagará ningún acarreo adicional del material de desperdicio.

(j) Medición y Pago. - Las mediciones se harán conforme a las líneas de las excavaciones indicadas en los planos o señaladas por el ingeniero en el terreno mismo. La excavación se pagará al precio por unidad expresado en el contrato, y dicho precio comprenderá el costo de toda la mano de obra, de todos los materiales y de las demás cosas incidentales a los trabajos de hacer las excavaciones y de colocar el material para formar los bordes, de preparar la superficie, de extender el material, de aplanarlo, de apisonarlo, etc., que sean necesarios para acabar la obra de acuerdo con las especificaciones.

Para Impedir la Filtración en los Canales. - Las pérdidas del agua que lleva un canal, especialmente en el caso de uno recién construido, constituyen una proporción notable de la cantidad de agua que el canal recibe. Deben hacerse observaciones y estudios cuidadosos de estas pérdidas para averiguar los puntos en que ocurren y para que se puedan dar los pasos necesarios para remediarlas, no tan sólo con el objeto de impedir la pérdida del agua, la que es valiosa de por sí, sino también de impedir que esta filtración arruine las tierras vecinas. En la Figura 12

se puede ver el volumen de estas pérdidas, indicándose en cada caso la cantidad total del agua desviada del río al canal y la cantidad de ésta que se pierde al pasar por el mismo.

(Véase la Figura en el original.)

Se indican en cada caso la cantidad de agua recibida por el canal durante los meses de abril a septiembre u octubre, correspondiendo uno de los espacios verticales de la figura a cada mes, y la cantidad perdida al pasar por el canal. En la mayoría de los casos, ésta se divide en las pérdidas ocurridas en el canal principal y en las ocurridas en el sistema de canales laterales. Debe notarse que, en general, las pérdidas guardan proporción con la cantidad de agua desviada, aunque, por lo menos teóricamente, las pérdidas ocurridas en la primera parte de la temporada deberían haber alcanzado una proporción mayor que las que ocurrieron más tarde.

Cuando es necesario emplear un material poco consistente para construir los bordes de los canales, o cuando los canales se excavan en un material suelto o poroso, hay que tomar precauciones especiales para impedir la pérdida de agua por la filtración. La filtración del agua de los canales puede ocurrir ya sea en el fondo y en los lados debajo del nivel de los bordes artificiales, o en los bordes mismos. Cuando ocurre en la primera forma, penetra frecuentemente hasta alguna profundidad en el material natural y vuelve a salir a la superficie a una distancia considerable del canal. La filtración de esta clase es la más difícil de impedir. Se puede evitar algunas veces cortando una trinchera profunda debajo del borde del canal y rellenándola de cemento hidráulico o de otro material impermeable. Cuando se emplea este método, es necesario llevar esta alma hasta el material impermeable, y es frecuentemente posible hacerlo en las obras que se encuentran en los declives de las lomas.

Otro método para impedir la filtración consiste en cubrir los declives y el fondo del canal con material fino, como tierra vegetal o marga, el cual, cuando el agua actúa sobre él, es llevado a los intersticios del material que se encuentra debajo y así forma, con el tiempo, una ca-

pa impermeable en toda la superficie.

Los procedimientos para remediar las filtraciones en los bordes artificiales son prácticamente iguales a los que se acaban de mencionar, es decir, consisten en construir un alma de cemento hidráulico o de otro material impermeable en el centro del borde, o en revestir el declive interior de tierra vegetal o de otro material fino.

Cuando se ha revestido un canal para impedir la filtración, debe tenerse cuidado, en los trabajos posteriores que se efectúen para la conservación y la limpia del canal, de evitar que se quite o se rompa esta capa delgada de material impermeable.

Al construir los canales, se puede hacer mucho para impedir la filtración por los bordes con exigir que se coloque el material grueso en la parte exterior de los bordes, y el material fino en la parte interior de los mismos. Al construir los canales en los climas fríos, debe tenerse especial cuidado de que no se coloque el material cuando éste o el borde está congelado. El material, cuando está congelado, especialmente si está húmedo, ocupa mayor espacio que después de que se haya deshelado, y, al deshelerse, es probable que deje pequeñas aberturas por las cuales el agua puede escaparse.

Otro método para impedir la filtración, al que se recurre algunas veces, consiste en revestir el canal de mampostería, de mortero o de madera.

En uno de los canales del Servicio de Reclamación, en donde fue necesario llevar el agua por un canal construido sobre un gran terraplén, se construyó un revestimiento provisional de madera, para que se usara hasta que los bordes se asentaran perfectamente. Los planes futuros disponen que cuando los bordes se hayan asentado y se tenga que renovar el revestimiento, éste se substituirá con alguna forma de material permanente.

Algunas veces la filtración es producida por la erosión de los bordes, debido a la cual el agua se va llevando el material más fino de la superficie de éstos. Es más probable que esto ocurra en el declive exterior de las curvas.

Canales Revestidos. - En la construcción de los canales, se emplea frecuentemente un revestimiento permanente de concreto. Un revestimiento semejante tiene dos objetos: primero, impedir la filtración cuando se construye un canal en material poroso; y, segundo, aumentar la velocidad y así reducir la sección del canal cuando se tienen que hacer excavaciones profundas. Por ejemplo, si se tiene que construir un canal de una profundidad dos o tres veces mayor que la del agua, resulta frecuentemente más barato excavar una sección más pequeña y revestir la parte inferior por donde debe correr el agua que excavar un canal de tierra que tenga una sección que dé la capacidad necesaria. Cuando se emplea un revestimiento de concreto, resulta económico hacer los declives laterales tan empinados como sea posible. Como se ha visto en la página 44, en teoría, la sección más ventajosa es la que tiene los bordes verticales. Esto, sin embargo, es impracticable. No obstante, sucede frecuentemente en los tajos profundos que el material se puede sostener debidamente en los declives tan pronunciados que la horizontal es igual a la mitad de la vertical, la cual es una sección que se emplea muy comúnmente en los canales revestidos. Al poner el revestimiento en los canales cuyos declives son tan pronunciados que la horizontal es igual a la mitad de la vertical, es generalmente necesario emplear moldes en los declives interiores, e introducir el relleno de concreto entre los moldes y los bordes de tierra o de roca. Cuando la excavación pasa más allá de las líneas definitivas del canal, el espacio detrás del revestimiento se puede rellenar de roca suelta. Si se trata de colocar el revestimiento en los declives en los cuales la horizontal es igual a la vertical, o que sean aun más suaves, es posible hacer este trabajo sin emplear moldes. (Véase la Figura C en la Lámina IV.)

El revestimiento de los canales se construye generalmente en láminas de un ancho de 10 o más pies, las cuales se hacen en secciones alternadas, con el objeto de que quede en las juntas el espacio necesario para la expansión, y de que así se eviten las grietas producidas por los cambios de temperatura. Algunas veces se aplica papel o una delgada capa de aceite a los bordes de las láminas para impedir que éstas se unan.

Sin embargo, esta protección es generalmente innecesaria si, antes de hacerse la segunda serie de láminas, se permite que fragüe el concreto de la primera. El espesor del concreto que se emplea para el revestimiento permanente de un canal varía de desde 3 hasta 6 pulgadas, dependiendo de lo empinado de los declives, del carácter del material y de las condiciones del clima. Las heladas tienden a aflojar el revestimiento de los bordes, debido a la expansión producida por la cristalización de la pequeña cantidad de agua contenida en la tierra. En un clima frío, en donde es probable que las heladas penetren el revestimiento, el espesor acostumbrado para estas condiciones es de cerca de 6 pulgadas. En los climas en donde las heladas son poco comunes, es suficiente un espesor menor.

Algunas veces el revestimiento se desmorona debido a la presión ejercida por el agua que se acumula detrás de él. Esto se puede remediar haciendo aberturas de desagüe, a intervalos frecuentes, en la parte inferior del revestimiento. Las aberturas de desagüe constituyen también una protección adicional contra las heladas, puesto que conservan el material detrás del revestimiento bien desaguado y reducen el volumen de la expansión cuando ocurre una helada.

Camino en los Bordes. - Los caminos en los bordes de los canales tienen ciertas ventajas, puesto que hacen fácil el acceso al canal para los objetos de la explotación y del sostenimiento del mismo. En las áreas altamente cultivadas, en donde la tierra alcanza un valor alto, se ahorra el terreno que se necesitaría, en caso contrario, para el trazado de los caminos. Existe también cierta ventaja en el efecto consolidador que el tráfico tiene sobre los bordes. Sin embargo, esto es de poco valor, excepto en el caso de los canales nuevos.

Las desventajas de los caminos contruidos en los bordes de los canales consisten en que, en el caso de ciertos materiales, el tráfico tiene la tendencia, durante la época seca, a destruir las capas superficiales y a convertirlas en polvo, el cual es llevado rápidamente por los vientos. Hay también la tendencia a que los bordes se desgasten por las rodadas, las cuales, durante la época de lluvias, se llenan de agua, la

que finalmente rebasa los bordes y ocasiona la erosión de los declives.

La conveniencia de que se construyan caminos en los bordes de los canales depende, en general, de las condiciones locales, todas las cuales tienen que tomarse en cuenta para determinar lo que sea acertado hacer. Cuando se construyen caminos en los bordes, es necesario que la parte superior de éstos tenga un ancho mayor que el que sería necesario en el caso de que no se construyeran dichos caminos. En el caso de los materiales comunes, los bordes contruídos con la parte superior de un ancho de cerca de 10 pies son generalmente suficientemente fuertes para resistir la presión del agua. Si es necesario que haya un camino en el borde, la parte superior de éste debe tener un ancho de no menos de 12 pies, o, preferiblemente, de desde 12 hasta 16 pies. En un clima en donde predominan la nieve y el hielo durante una porción del año, los caminos en los bordes, a no ser que sean de una gran anchura, son peligrosos y debe evitarse que se empleen para el tráfico público.

Desagüe Lateral. - Con el objeto de resguardar completamente un canal, especialmente si se encuentra en un declive, es necesario atender al desagüe lateral. Si éste se descuida, pueden formarse charcos arriba del canal, los cuales, en los períodos de lluvias extremadamente fuertes, pueden rebasar los bordes. El volumen del desagüe lateral que se tiene que prever constituye una cuestión cuya resolución es algo difícil. Debe dedicarse un estudio especial a cada caso determinado. El método más satisfactorio para determinar el volumen del desagüe lateral de un canal determinado consiste en recurrir a los datos relativos a la cantidad del flujo en las épocas anteriores. Sin embargo, los datos de esta especie generalmente faltan, puesto que comúnmente no se observan las condiciones de las crecientes en los barrancos o los pequeños arroyos que el canal de irrigación tiene que atravesar. Algunas veces es posible determinar el área de la sección transversal de una corriente por las huellas del agua, y hacer un cálculo aproximado de la velocidad y del volumen correspondiente del agua por los declives generales del distrito. Cuando se encuentran disponibles semejantes datos, sirven de guía para determinar el volumen del desagüe al que se tiene que dar salida.

En los casos en que hay una falta absoluta de datos relativos al flujo, puede hacerse un cálculo aproximado del volumen del escurrimiento del área de la vertiente, suponiéndose una precipitación pluvial máxima por milla cuadrada. La cantidad de la precipitación pluvial que se tiene que suponer en este caso variará grandemente en diversas partes del país. La extensión del área de desagüe es también un factor importante para la determinación del escurrimiento de cada unidad de dicha área, puesto que, en las áreas pequeñas, el agua se junta más rápidamente y se aproxima más a la cantidad total de la precipitación pluvial del área. En el caso de las áreas pequeñas, como, por ejemplo, las de 1 a 5 millas cuadradas, el escurrimiento máximo en un período determinado puede ser aproximadamente igual a la cantidad total del agua que cae en el área de desagüe durante dicho período. Sin embargo, esto es excepcional. Cuando se trata de atender al desagüe lateral con el objeto de proteger los canales, es necesario considerar los casos extremos, y la buena práctica exige que los errores se cometan a favor de la seguridad, es decir, que más vale estar prevenido para un escurrimiento mayor que el que pueda ocurrir, que no estar prevenido para las condiciones extremas.

Se puede atender al desagüe lateral desviando el agua de manera que entre en el canal, o llevándola ya sea debajo o encima de éste. El método que resultará más conveniente para cualquier caso determinado dependerá de las condiciones locales. Cuando el volumen del agua proveniente del desagüe lateral es pequeño y éste no ocurre durante la temporada de irrigación, es frecuentemente posible llevar el agua al canal y disponer de ella llevándola a los cauces naturales por medio de algún desagüero. Cuando se tiene que atender al desagüe lateral durante la estación de irrigación, este método resulta poco seguro, debido a que se incurre en el peligro de que el caudal de agua exceda de la capacidad del canal. El método empleado para desviar el desagüe a un canal consiste generalmente en hacerlo por medio de un conducto o de un cauce poco profundo que baje por el declive del lado superior del canal.

Cuando el volumen del desagüe no es excesivamente grande, se puede desviarlo por debajo del canal por medio de un sifón o de una tajea.

Este método está especialmente bien adaptado para los lugares en donde el canal se construye en un terraplén, por lo cual resulta posible construir un sifón o una tajea debajo del canal con una excavación mínima. En tal caso, el borde del lado superior también sirve para represar una pequeña cantidad de agua, lo que ayuda a controlar el desagüe. Al llenarse la depresión que se encuentra arriba del canal, aumenta la presión en la tajea o el sifón, y así aumenta su capacidad para efectuar el desagüe en una creciente.

Cuando son grandes las cantidades de agua provenientes del desagüe que se tienen que llevar por debajo de un canal, se acostumbra comúnmente hacer que el canal pase por encima del cauce de dicha agua por medio de un conducto sostenido por un puente o por otra estructura apropiada. Al elegirse el lugar para tal estructura y al proyectarse ésta, debe tenerse especial cuidado de que la abertura debajo de la estructura sea suficientemente grande para el flujo máximo. Un buen ejemplo de un canal grande que cruza un barranco es el conducto construido sobre el cañón Spring en el proyecto North Platte, Nebraska. Aquí un canal de una capacidad de 1,400 pies-segundos cruza un cañón por medio de un conducto de hormigón sostenido por tres arcos de hormigón armado. El ojo del arco más grande es de 50 pies, y la distancia total que la estructura atraviesa es de 110 pies. (Véase la Figura A en la Lámina VII.)

El tercer método para atender al desagüe lateral, es decir, llevándolo por encima del canal, se puede realizar empleando un conducto o alguna otra estructura para llevar el agua proveniente del desagüe, o haciendo que el canal pase por debajo del cauce natural de desagüe por medio de un sifón invertido.

En general, cuando el volumen del desagüe lateral es pequeño, se puede resolver el problema haciendo que el desagüe entre en el canal, o llevándolo por medio de un saetín o conducto construido ya sea debajo o encima del canal. Sin embargo, cuando el volumen del desagüe es grande, o cuando el área de desagüe es considerable, el método que resulta mejor y más seguro consiste en permitir que el desagüe siga por su cauce natural y en desviar el canal ya sea por debajo o encima de la corrien

te.

Derecho de Paso para los Canales. - Habiéndose determinado la sección transversal y el trazado de un canal, puede fijarse el ancho necesario del derecho de paso. En vista del valor tan alto que alcanzan generalmente las tierras irrigables, es conveniente que no se ocupe más que la extensión necesaria para el derecho de paso, mientras que, por otra parte, es esencial que se procure que el ancho sea suficiente para permitir que la explotación y el sostenimiento resulten económicos. El ancho que necesita tener el derecho de paso depende, en gran parte, del tamaño y de la importancia del canal. En el caso de los canales principales, el derecho de paso debe tener la anchura suficiente para que comprenda todos los bordes, y, en general, debe tener el suficiente ancho adicional para que se puedan efectuar trabajos en los bordes sin invadir la propiedad contigua.

El derecho de paso debe incluir, especialmente en las inmediaciones de los bordes, un determinado espacio del cual se pueda sacar el material necesario en los casos de emergencia. El éxito de un sistema de canales o de un canal puede depender de que se tenga inmediatamente disponible el material necesario para las reparaciones. A no ser que se prevea esto al adquirir el derecho de paso primitivo, no se tendrá la seguridad de que se podrá obtener inmediatamente el material que se necesitará en los años posteriores. A medida que las tierras se van regando y el distrito se va haciendo más poblado, aumenta en proporción el valor de la tierra y se hace más difícil adquirir las fajas necesarias para ampliar el derecho de paso.

El derecho de paso para los canales más pequeños y menos importantes puede ser más angosto que para los canales más grandes. En todo caso, sin embargo, el derecho de paso debe ser suficiente para que el canal quede accesible en toda su extensión para las reparaciones y para que se pueda contar con los materiales necesarios para conservar los terraplenes. En el caso de un pequeño canal lateral que se encuentra en un terreno relativamente plano y que casi no tiene bordes que se elevan sobre el nivel de la superficie de éste, el único derecho de paso que se

requiere, además del cauce, es el que sea necesario para que se pueda caminar a lo largo del canal. Un canal del mismo tamaño situado en un terreno desigual o en un terraplén alto requeriría una extensión considerable de derecho de paso adicional para que se pudiera contar con el material necesario para reparar las rupturas en los casos de emergencia.

No se puede establecer ninguna regla fija respecto al ancho del derecho de paso que se requiere para un canal de cualquier tamaño determinado. Debe tenerse presente que, para que se pueda explotar un sistema de canales con éxito, es necesario que se tenga un acceso sin restricciones a todas sus partes, y que, para que el sostenimiento del sistema resulte económico, es necesario tener el espacio suficiente para su explotación y el material necesario para reparar las rupturas en los casos de emergencia.

Los derechos de paso son de dos clases: primera, los que consisten en un permiso para que el canal pase por una faja de tierra, conservando el dueño primitivo el dominio absoluto de ésta; y, segunda, los que consisten en el dominio absoluto. Por lo general, un derecho de paso que permite únicamente la construcción y la explotación del canal es objetable, en vista de determinados derechos que el dueño primitivo de la tierra pueda tener a ésta. Por esta razón, debe adquirirse el dominio absoluto de los derechos de paso de los canales principales, de manera que los dueños del canal tengan libertad para dirigir la construcción, así como la explotación y el sostenimiento subsiguientes, sin restricciones de ninguna especie.
