



**SECRETARIA GENERAL DE ESTRUCTURAS AGRARIAS
DIRECCION GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS Y COOPERACION**

CURSO INTERNACIONAL DE TECNICAS DE RIEGO Y GESTION DEL REGADIO

Riego por superficie I

**ESCUELA CENTRAL DE CAPACITACION AGRARIA
San Fernando de Henares (Madrid)**

RIEGO POR SUPERFICIE I

- **Transformaciones en regadío.**
- **Riego por superficie. Conceptos básicos.**
- **Técnicas de mejora del riego por superficie.**
- **Medida del caudal en conducciones de riego.**

**CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE REGADIOS (CENTER)
SAN FERNANDO DE HENARES (Madrid)**

**TRANSFORMACIONES EN REGADIO
SELECCION DEL METODO DE RIEGO
DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE RIEGO
CALENDARIOS DE RIEGOS**

**José M^a. Faci González
Dr. Ingeniero Agrónomo
UNIDAD DE SUELOS Y RIEGOS
Servicio de Investigación Agraria
Apdo. 727, 50080 - ZARAGOZA**

INDICE

HISTORIA DEL RIEGO DE SUPERFICIE	1
TRANSFORMACIONES EN REGADIO	3
SELECCION DEL METODO DE RIEGO	7
3.1. Criterios físicos	8
3.1.1. Suministro de agua a la finca	8
3.1.2. Características del suelo y topografía	9
3.1.3. Interacciones del riego con el cultivo y el clima	9
3.2. Criterios económicos	10
3.3. Clasificación de los métodos de riego	14
DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE RIEGO DE LOS CULTIVOS	15
4.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0)	17
4.2. Determinación de la curva de coeficientes de cultivo (K_c)	21
4.3. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c)	25
4.4. Determinación de la precipitación efectiva (PE)	25
4.5. Cálculo de las necesidades netas del cultivo (NC)	26
4.6. Determinación de las necesidades de lavado (NL)	27
4.7. Cálculo de las necesidades de riego	29

5. CALENDARIOS DE RIEGOS	31
5.1. Métodos basados en el estado hídrico del suelo	32
5.2. Métodos basados en datos climáticos y cálculos de evapotranspiración (ET)	33
5.3. Métodos basados en el estado hídrico de la planta	33
6. BIBLIOGRAFIA	35

1. Historia del riego de superficie

El riego de superficie ha sido durante toda la historia una práctica de enorme importancia ligada al desarrollo de las antiguas civilizaciones.

Los regadíos más antiguos se desarrollaron en los valles de cuatro importantes ríos: el Nilo en Egipto, en los años 6.000 a.C.; el Tigris y el Eufrates en Mesopotamia, alrededor de los años 4.000 a.C.; el río Amarillo en China, en los años 3.000 a.C. y el Indo en la India, en los años 2.500 a.C. (Hoffman et al., 1990). Las civilizaciones incas y mayas también desarrollaron sistemas de riego hace más de 2.000 años.

En estas civilizaciones antiguas el riego de superficie se desarrolló fundamentalmente en las terrazas adyacentes a los ríos, mediante la construcción de presas y canales para derivar el agua a los campos. Las parcelas eran normalmente pequeñas, rodeadas por caballones en todo su perímetro y el caudal de riego era escaso (Jensen, 1981; Hoffman et al., 1990).

En la actualidad, el riego sigue siendo una práctica vital y necesaria para la supervivencia de nuestros pueblos y para asegurar el aporte de alimentos y materias primas a una población en continuo aumento.

Los cambios más importantes introducidos en nuestros actuales sistemas de riego de superficie incluyen el revestimiento de los canales y acequias de riego, el empleo de mayores caudales de riego, el aumento del tamaño de las parcelas de riego para facilitar la mecanización y la mejora de la nivelación de las parcelas.

Gran parte de los regadíos actuales han sido transformados en los últimos 40 años. Así, en 1961 la superficie de regadío en todo el mundo era de alrededor de 137 millones de ha. (Hoffman et al., 1990). En 1977 la Organización Mundial de la Agricultura y la Alimentación (FAO) estimó que el área regada en todo el mundo era de 223 millones de ha. y predecía una superficie regada de unos 273 millones de ha. para los años 1990 (FAO, 1977).

De la superficie actual de regadío en el mundo, Walker (1990) estima que el 95% de esta superficie emplea métodos de riego de superficie.

El Cuadro 1 presenta una estimación de las superficies regadas en los países que tienen mayor superficie de regadío. Los países que tienen una mayor superficie de regadío son India, China, la antigua Unión Soviética, Estados Unidos y Pakistán.

La superficie actual de regadío en el mundo representa solamente un 13% de la superficie arable (FAO, 1977).

Ante las perspectivas actuales de superproducción en muchos países, el desarrollo de los futuros regadíos será más difícil, debido a que las mejores tierras ya están transformadas y los nuevos proyectos serán más caros, con más necesidades de energía y con un suministro de agua más limitado, debido al gran aumento de la demanda para otros usos.

Cuadro 1: Superficies estimadas de regadío en 1986 de los países con mayor área de regadío adaptado (de Hoffman et al., 1990).

PAIS	Superficie de regadío (millones de ha)	% de regadío s/ la superficie arable
India	55	33
China	47	48
Ex Unión Soviética	21	9
Estados Unidos	19	10
Pakistán	16	77
Indonesia	7,3	34
Irán	5,8	39
Méjico	5,3	21
España	3,3	16
Turquía	3,3	12
Thailandia	3,2	16
Egipto	3,0	100
Japón	3,0	63
Italia	3,0	25

2. Transformaciones en regadío

Las transformaciones en regadío son un factor fundamental para estabilizar la producción de alimentos y fibras de los países.

Los regadíos deben ser planificados y diseñados de forma eficiente y con un sistema de riego que sea adecuado a las condiciones locales de la zona. Un aspecto muy importante que debe contemplarse en un proyecto de regadío es asegurar la fertilidad y permanencia del regadío, previendo todos los problemas que puedan originarse en el proyecto de transformación.

El estudio e investigación de las condiciones locales de la zona de estudio, tales como clima, suelo, agua, recursos humanos, materiales y económicos, es un tema clave para el éxito de la transformación.

Cuando pensamos en realizar una nueva transformación en regadío nos planteamos una larga serie de preguntas que van desde la disponibilidad de recursos hídricos, energéticos y económicos, hasta el destino final de los productos agrícolas producidos.

En este apartado, las preguntas que vamos a tratar de contestar son las siguientes:

- ¿Conviene regar?
- ¿Cómo regar?
- ¿Con cuánta agua?
- ¿Cuándo regar?

Las respuestas a estas preguntas son muy complejas e incluyen la teoría y práctica del regadío.

Conveniencia del riego

El agua es esencial para el crecimiento de los cultivos. Cuando el suministro de agua a los cultivos está asegurado con el riego, los rendimientos son superiores a los que se obtendrían en condiciones de secano. En zonas con períodos de sequía, los rendimientos bajo riego pueden ser de 2 a 4 veces superiores a los del secano.

En las zonas áridas y semi-áridas, donde la precipitación no cubre la demanda evaporativa, el riego es necesario para la producción óptima de los cultivos.

El riego produce:

- aumento de la productividad
- aumento de la calidad de la cosecha
- elección más amplia de cultivos más rentables

Para evitar los problemas del riego hay que realizar una elección adecuada del sistema de riego, de acuerdo a las condiciones de la zona. Asimismo, es fundamental incluir un sistema de evacuación de las aguas de drenaje.

Cómo regar

En principio, cualquier sistema es válido si está bien diseñado y es manejado de forma correcta. Cada método de riego tiene sus ventajas y limitaciones, que es necesario evaluar de acuerdo a las condiciones locales de la zona. Los requisitos básicos que debe cumplir el sistema de riego elegido son:

- 1.- Producir una distribución uniforme del agua de riego.
- 2.- Permitir una fácil mecanización de las labores de cultivo.
- 3.- No producir pérdidas de escorrentía y percolación.
- 4.- Tener pocas necesidades de mantenimiento.

5.- Ser fácil de manejar y económico.

6.- Tener la capacidad de aplicar dosis ligeras.

7.- Ser capaz de resolver problemas específicos (anti-helada, costras, etc.)

Tradicionalmente, se considera que los sistemas a presión (goteo y aspersión) tienen una uniformidad mayor que los riegos de superficie. Sin embargo, no siempre los sistemas a presión tienen una eficiencia superior a la de los sistemas de riego por superficie. La eficiencia obtenida depende sobre todo del manejo del riego y de su diseño.

El consumo de agua de riego depende de la eficiencia de los distintos sistemas. Sin embargo, el agua transpirada por el cultivo es prácticamente independiente del tipo de sistema de riego utilizado.

Para el éxito del regadío es muy importante realizar una adecuada selección del sistema de riego, de acuerdo a las condiciones locales de la zona.

Con cuánta agua

Es necesario calcular las necesidades de riego de los cultivos. Dichas necesidades dependen de la climatología de la zona, tipo de cultivo y eficiencia del sistema de riego utilizado.

El efecto del clima en las necesidades hídricas de los cultivos viene dado por la evapotranspiración de referencia (ET_0). La ET_0 se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de hierba, verde, de 8 a 15 cm. de altura, uniforme, en crecimiento activo, sombreando totalmente el suelo y bien provista de agua.

Existen numerosos métodos de cálculo de la ET_0 , pero siempre se deben utilizar métodos calibrados localmente. Estas calibraciones son necesarias debido a que los métodos de cálculo, normalmente muy empíricos, sólo son válidos para aquellas condiciones climáticas donde el modelo fue desarrollado inicialmente. La contrastación de los valores de ET_0 obtenidos con los métodos de cálculo con medidas

directas de la ET_0 es necesaria para la calibración correcta de estos métodos.

El efecto de las características del cultivo en las necesidades hídricas (ET_{cultivo}) viene dado por el coeficiente de cultivo (K_c), el cual representa la relación entre la ET_0 y la ET_{cultivo} :

$$ET_{\text{cultivo}} = K_c \times ET_0$$

El coeficiente de cultivo varía con el tipo de cultivo, estado vegetativo y clima.

Las necesidades de agua de riego se calcularán a partir de la ET_{cultivo} , de la eficiencia del sistema de riego y de la fracción de lavado utilizada. Estas necesidades de riego se definen como la altura de agua que hay que aplicar para las pérdidas de agua por ET de un cultivo sano, cultivado en campos grandes sin restricciones de suelo, agua y fertilidad.

Cuándo regar

El riego debe efectuarse antes de que aparezcan síntomas de sequía en los cultivos.

Existen diversos métodos para establecer calendarios de riegos. Estos métodos están basados en medidas climáticas, edáficas y del propio cultivo.

3.- Selección del método de riego

En las últimas décadas se ha producido una importante tecnificación de los sistemas de riego, lo cual lleva asociado un aumento considerable de las posibilidades de elección. Por ello, los criterios de selección de los sistemas de riego van adquiriendo mayor importancia.

El proceso de selección de un sistema de riego requiere una evaluación de los recursos disponibles y de sus limitaciones.

En el Valle del Ebro, durante los años 50, con una tecnología en riego poco avanzada y con un recurso de agua que se consideraba muy abundante, se realizaron las transformaciones en regadío por sistemas de riego por inundación, realizando grandes movimientos de tierra y modificando por ello las características del suelo. Actualmente, con una tecnología de riegos más desarrollada y un recurso de agua cada vez más escaso, se proyectan las nuevas transformaciones de regadío con sistemas de aspersión. Asimismo, se está produciendo una mejora de los riegos de superficie mediante la nivelación de parcelas con la técnica del rayo láser y el revestimiento de acequias.

En principio, cualquier sistema de riego es adecuado si está bien diseñado y es manejado de forma correcta.

Tradicionalmente, se ha considerado que los sistemas de riego a presión (aspersión y goteo) tenían una eficiencia superior a la de los riegos de superficie. Sin embargo, Keller et al. (1981) indicaron que la eficiencia de los sistemas de riego depende mucho más del manejo de los mismos que del tipo de sistema utilizado. De hecho, estos autores encontraron que sistemas poco tecnificados bajo un manejo adecuado eran más eficientes que otros sistemas a presión mal manejados.

Cada sistema de riego tiene sus ventajas y limitaciones, que hay que evaluar para tomar la decisión del sistema a elegir. Es muy importante que exista una verdadera interacción entre el ingeniero proyectista, propietario y regante, de forma que no haya sorpresas cuando el sistema elegido ya esté instalado. El propietario y regante son los que, en definitiva, van a usar el sistema de riego y por tanto es fundamental que ambos comprendan el funcionamiento de ese sistema que van a tener instalado en su

finca. El proyectista debe tratar de obtener la máxima información posible sobre las necesidades del futuro regante en aspectos como mano de obra disponible, suministro de agua, tipos de cultivo, etc. Una visita a la zona del proyecto es de vital importancia. La Figura 1 presenta un esquema de los flujos de intercambio de información en la selección de un sistema de riego.

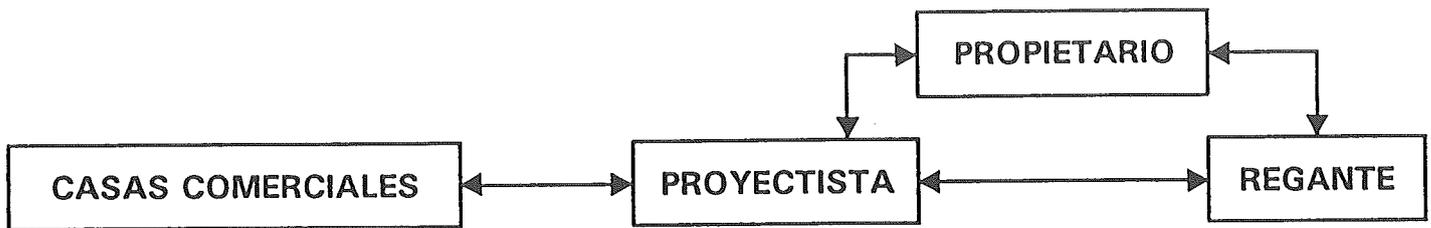


Figura 1: Esquema de los flujos de información en la selección de un sistema de riego.

Los criterios para la selección pueden agruparse en dos grupos:

1) físicos

y

2) económicos

Ambos tipos de criterios son igualmente importantes para la elección adecuada del sistema de riego.

3.1. Criterios físicos

La elección del sistema de riego debe realizarse de acuerdo a las condiciones locales existentes en la zona del proyecto.

Los siguientes apartados recogen un resumen de los principales factores que influyen en la elección.

3.1.1. Suministro de agua a la finca

- Cantidad de agua disponible.
- Calidad. Salinidad, composición química y sólidos en suspensión.
- Disponibilidad del agua. Caudal continuo o discontinuo.

3.1.2. Características del suelo y topografía

- Textura

Velocidad de infiltración y capacidad de retención de agua. En la mayoría de los suelos la velocidad de infiltración es alta durante el comienzo del riego y va disminuyendo con el tiempo hasta un valor estabilizado. Si este valor es alto (arena), los métodos de inundación no son adecuados. Si el valor es bajo se podrá utilizar un sistema de inundación o de aspersión con pluviometría inferior a dicho valor de la velocidad de infiltración. Los suelos con baja capacidad de retención de agua necesitarán sistemas que permitan riegos frecuentes y de bajo volumen.

- Profundidad del suelo

En suelos poco profundos no son recomendables las nivelaciones.

- Salinidad del suelo

Antes de implantar el cultivo es necesario el lavado de los suelos salinos.

- Topografía

Si la finca es llana, cualquier sistema es adecuado. Si tiene pendiente, habrá que recurrir a aspersión.

3.1.3. Tipo de cultivo. Interacciones del riego con el cultivo y clima

El tipo de cultivo a regar determina el sistema a elegir. Hay cultivos que son sensibles a la humectación excesiva de hojas y tallos (desarrollo de hongos y enfermedades). Por el contrario, el riego de arroz requiere inundaciones del suelo, para lo cual hacen falta bancales nivelados sin pendiente.

El viento puede afectar la distribución del riego en aspersión e inundación. Este factor es especialmente importante en el Valle del Ebro, donde son muy frecuentes los fuertes vientos del NW (Faci y Bercero, 1991). El Cuadro 2 presenta un resumen de los principales factores físicos que afectan a la elección.

Cuadro 2: Factores que afectan a la selección de un método de riego.

METODO DE RIEGO	PENDIENTE	VELOCIDAD DE INFILTRACION DEL SUELO	TOLERANCIA AL AGUA DE LOS CULTIVOS	VIENTO
ASPERSION	Suave a moderada	Cualquier tipo de suelo	Apto para mayoría de cultivos	Afecta y es importante
SUPERFICIE	Sin pendiente suave	Media o baja	Apto para mayoría excepto cultivos sensibles	Afecta moderadamente
GOTEO	Todo tipo de pendientes	Todo tipo	Apto para mayoría de cultivos	No hay efecto
SUB-SUPERFICIALES	Sin pendiente	Con estrato impermeable bajo raíces o capa freática alta	Apto para mayoría excepto en germinación	No hay efecto

3.2. Criterios económicos

Los criterios económicos incluyen los siguientes factores:

- Coste de instalación.
- Coste de funcionamiento:
 - * mano de obra
 - * consumo de energía
 - * consumo de agua

En general, cuanto mayor es el coste de la instalación, menores son los gastos de mano de obra necesarios y, por tanto, menores son los gastos de funcionamiento del sistema.

En los años 70 se hicieron importantes avances en el desarrollo de sistemas de riego para reducir la mano de obra necesaria para su funcionamiento (cobertura total, pivots, máquinas de trayectoria lateral y sistemas de goteo).

En los años 80 se comenzó también a dar gran importancia al ahorro energético y de agua. Se desarrollaron aspersores de baja presión, se utilizaron boquillas difusoras en los pivots de forma que estos sistemas ya no requerían tanta presión como los pivots originales y también se dió gran importancia a la mejora de la eficiencia de las bombas para conseguir un mayor rendimiento energético.

Actualmente se tiende a sistemas de riego que produzcan una buena uniformidad del riego y que sean eficientes en el consumo de agua y energía.

En general, se establecen los niveles mínimos de uniformidad del riego en diseño de un 80% para aspersión y de un 90% para riego por goteo (Benami y Ofen, 1983).

Diversos autores han realizado estudios comparativos de los costes de funcionamiento de los distintos sistemas de riego. Así, Lord et al. (1981) compararon los costes de instalación y funcionamiento de distintos sistemas de riego en el Valle de San Joaquín, en California, EE.UU., encontrando que el riego de surcos era el más económico. Sin embargo, es de destacar los altos costes de funcionamiento de los distintos sistemas (Cuadro 3).

**Cuadro 3: Costes de riego en el Valle de San Joaquín en California (Lord et al., 1981).
En ptas. de 1980 por ha.**

SISTEMA	COSTE INICIAL	AMORTI-ZACIÓN	MANO DE OBRA	ENERGIA	AGUA	MANTENI-MIENTO	IMPUESTOS SEGUROS	SUMA
GOTEO 65 HA 12 AÑOS	250.000	40.000	4.000	18.700	14.100	2.100	4.700	83.600
COBERTURA TOTAL 65 HA 15 AÑOS	384.000	56.400	500	24.800	15.000	1.400	3.000	101.100
SISTEMA MOVIL 65 HA 10 AÑOS	77.000	13.600	13.300	21.200	16.000	2.900	1.400	68.400
PIVOT RIEGO ESQUINAS 61 HA 15 AÑOS	168.200	25.700	800	28.300	15.000	1.700	3.200	74.700
MAQUINA LATERAL 125 HA 15 AÑOS	161.200	23.700	800	19.000	14.700	1.200	3.000	62.400

Cavero (1987) realizó una evaluación técnica y económica de los distintos sistemas de aspersión, microaspersión y goteo en Monegros (Aragón), en los cuales estudió los costes de riego y la cantidad de mano de obra necesaria (Cuadro 4). El estudio estaba basado asumiendo una finca de 25 ha. con agua a pie de finca, con un consumo de 7.120 m³/ha. y unos costes de agua de 0,50 pts/m³, de energía de 0,65 pts/m³ y de mano de obra de 400 pts/mh.

Del estudio del índice T.I.R. (tasa interna de rentabilidad), que representa la rentabilidad media de la inversión de la transformación en regadío, puede deducirse que el sistema de aspersión semifijo es el que presentaba un índice T.I.R. más alto. Sin embargo, este sistema requiere una gran cantidad de mano de obra (Cuadro 4), lo cual hace que este sistema de riego no sea aconsejable en muchas ocasiones.

Cuadro 4: Características económicas de distintos sistemas de riego a presión (de Cavero, 1987).

SISTEMA DE RIEGO	INVERSION (pts/ha)	COSTE ANUAL FIJO (pts/ha)	COSTE ANUAL VARIABLE (pts/ha)	MANO DE OBRA (h/ha/año)
COBERTURA TOTAL ENTERRADA	325.950	12.707	14.118	6
MAQUINA LATERAL	338.014	16.322	17.658	8
PIVOT	241.611	11.765	14.694	3
ASPERSION SEMI-FIJA	118.827	5.653	33.962	60
GOTEO	165.910	7.881	13.538	6
MICRO-ASPERSION	209.453	9.949	15.209	8

La selección de un sistema de riego está influenciada por el suministro de agua, suelo, topografía, clima, cultivo, mano de obra disponible, energía, y los costes de los diferentes recursos de la finca (Thompson et al., 1981).

Recientemente, Holzapfel et al. (1985) desarrollaron un procedimiento para la selección del método de riego en dos etapas. La 1ª etapa era de tipo técnico-analítico y la 2ª de tipo técnico-económico. Estos autores desarrollaron unos índices de aceptación del sistema de riego en base al cultivo, pendiente del terreno,

características de infiltración del suelo, calidad del agua y disponibilidad de mano de obra. Un valor de 0 para un índice de un factor determinado indica que el sistema de riego no es apropiado en absoluto para ese factor, mientras que un valor de 100 indica que el sistema de riego es perfectamente compatible con ese factor. La Figura 2 presenta un esquema de este proceso de selección.

Para concluir este apartado conviene recalcar que, para la elección adecuada del sistema de riego hay que tener en cuenta los criterios económicos del sistema elegido, pero que son los criterios físicos, sobre todo la profundidad del suelo y topografía de la finca, los que determinarán el sistema adecuado a elegir para esas condiciones.

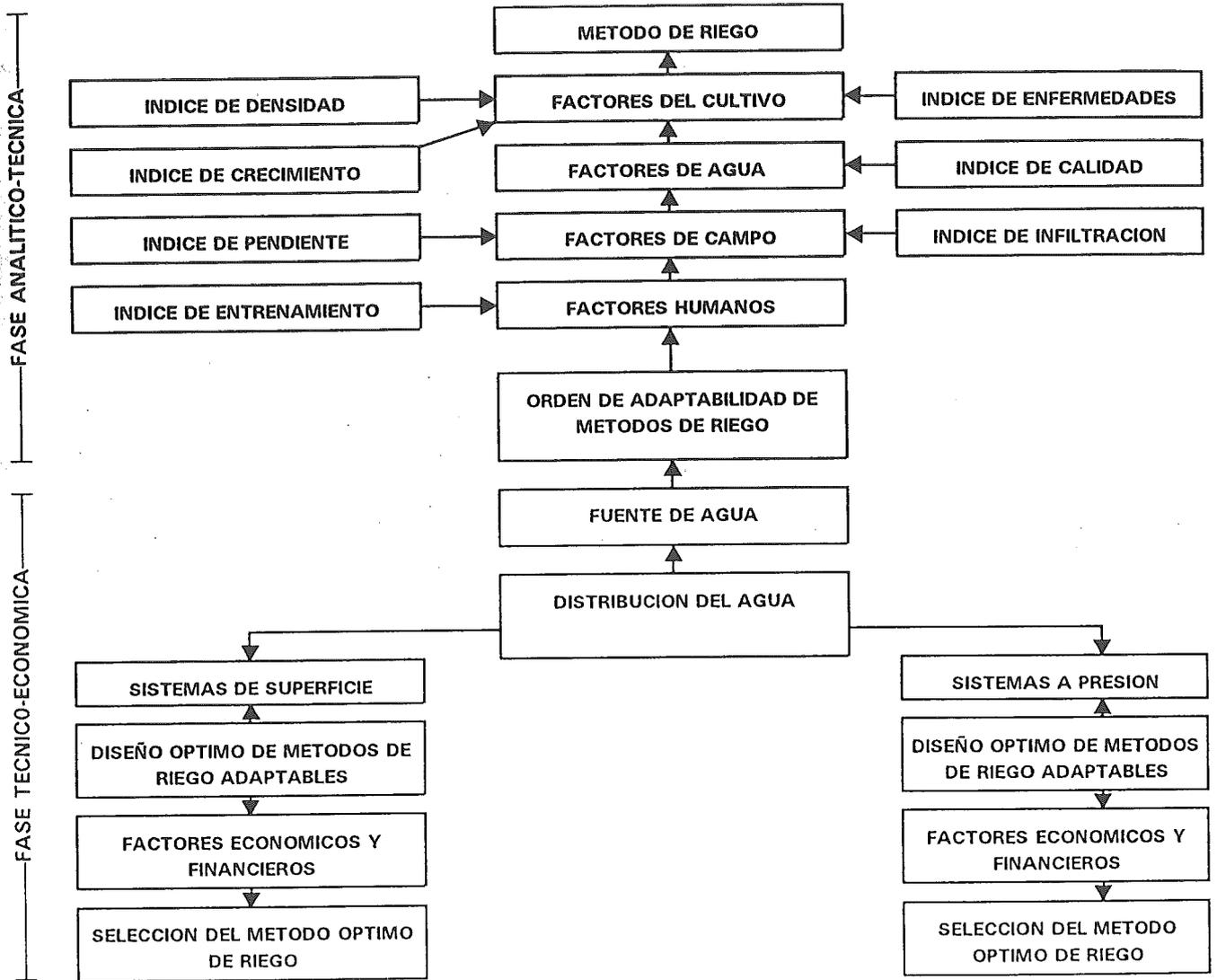


Figura 2: Esquema de selección de un sistema de riego (adaptado de Holzapfel et al., 1985)

3.3. Clasificación de los métodos de riego

Los sistemas de riego existentes se pueden clasificar, según la forma de aplicación del agua, en los cuatro grupos siguientes:

- Superficie

El agua es aplicada en la superficie del suelo, el cual sirve de sistema de distribución. Existen varios sistemas de inundación (desbordamiento, corrugaciones, surcos y tablares). El sistema más utilizado en el Valle del Ebro en cultivos extensivos es el de tablares sin y con pendiente.

- Localizados

El agua se distribuye en la parcela por tuberías, mojando solamente partes determinadas de la parcela.

- Aspersión

El agua es aplicada en el aire y cae al suelo como lluvia. Existen muchos tipos de sistemas de aspersión adaptables a una amplia gama de condiciones.

- Subterráneos

El agua se aplica bajo la superficie del suelo. En el Valle del Ebro son muy poco utilizados.

4. Determinación de las necesidades de riego de los cultivos

Las necesidades de agua de los cultivos dependen fundamentalmente del clima, de las características del propio cultivo y del tipo de suelo. La cantidad y distribución de las precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo determinan el suministro de agua al cultivo proveniente de la precipitación. Asimismo, la precipitación produce un descenso de la demanda evaporativa, ya que se produce un aumento de la humedad relativa del aire, un descenso de la temperatura y una disminución de los procesos de advección. La advección es un fenómeno que se produce muy frecuentemente en zonas regadas rodeadas por campos secos, mediante el cual las masas de aire que pasan sobre los campos secos se calientan y se desplazan a las zonas regadas, proporcionando una energía adicional que produce un aumento de la ET de los cultivos.

En zonas áridas y semi-áridas el riego es la fuente más importante de agua para los cultivos, ya que las lluvias son de muy escasa consideración. En las zonas subhúmedas el riego también puede ser necesario para la producción óptima de los cultivos, debido a que se producen cortos períodos de sequía en los que es necesario suministrar agua al cultivo con el riego. En estos casos la capacidad de retención de agua en el suelo y la profundidad de enraizamiento del cultivo juegan un papel fundamental.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos es la eliminación de las sales acumuladas en la zona radicular del suelo. Todas las aguas de riego contienen sales en mayor o menor medida que se concentran en el suelo en los sucesivos riegos, ya que en el proceso de evapotranspiración prácticamente sólo se pierde agua pura. Mediante la aplicación de una fracción del agua de riego que percole a través de la zona radicular se asegura el lavado y el mantenimiento de la productividad del regadío.

En la Figura 3 se presenta un esquema con los flujos de información necesarios para determinar las necesidades de riego de los cultivos.

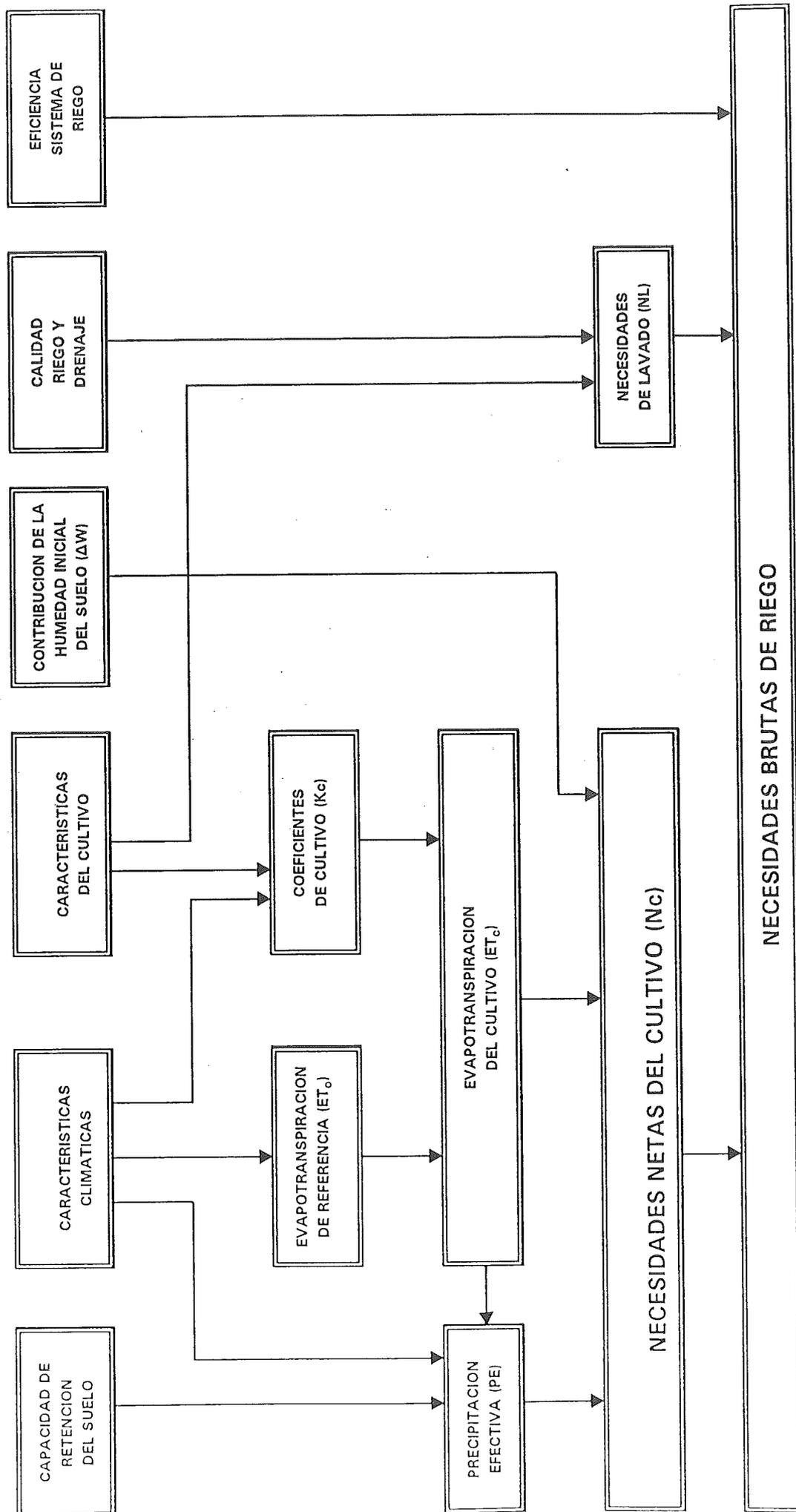


Figura 3: Esquema de los flujos de información para la determinación de las necesidades de riego de los cultivos a partir de los datos básicos.

4.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0)

En la naturaleza, los procesos de transpiración (T) y evaporación (E) ocurren simultáneamente, sin que existan métodos sencillos para distinguirlos, por ello ambos procesos se engloban bajo el término de evapotranspiración (ET). Así, en una comunidad vegetal, la ET incluye la transpiración de la cubierta vegetal y el agua evaporada directamente de la superficie del suelo y de las superficies vegetales vivas o muertas, donde el agua se ha acumulado por el riego, lluvia o rocío.

La cuantificación de la ET ha sido objeto de numerosos estudios desde la antigüedad, ya que su conocimiento es de vital importancia para el manejo de los recursos de agua y estudios del medio ambiente y de la producción agrícola.

En el regadío, el estudio de la ET es especialmente importante, ya que sirve para la determinación de las necesidades de riego de los cultivos, diseño de los sistemas de riego y embalses, valoración de los costes de la energía y de la mano de obra necesarios para el riego, determinación del coste del agua de riego en los proyectos públicos de riego y establecimiento de los calendarios de riego más adecuados.

Para tener un punto de referencia, evitando el efecto de la disponibilidad de agua en el suelo, Thornthwaite (1948) y Penman (1948) desarrollaron el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) que se define como la evaporación de una superficie extensa de un cultivo verde que sombrea totalmente la superficie del suelo, de altura corta y uniforme y siempre bien provisto de agua. Los cultivos que se han utilizado normalmente para la obtención de la ETP han sido la alfalfa y la hierba. Posteriormente Doorenbos y Pruitt (1977) definieron el concepto de evapotranspiración de referencia (ET_0) que es muy similar al de ETP, pero haciendo referencia a una hierba corta, aunque sin definir el género y especie de la misma. La ET_0 se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de hierba verde, de 8 a 15 cm de altura uniforme, en crecimiento activo, sombreando totalmente el suelo y bien provista de agua.

Para mejorar el uso del agua en los regadíos es muy importante que los métodos de cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos empleados para el diseño y manejo de los sistemas de riego sean fiables en las condiciones climáticas de cada zona regable y den predicciones que se acerquen lo más posible a la realidad.

Existen numerosos métodos para el cálculo de la ET_0 , pero en muchas ocasiones los resultados obtenidos no son fiables debido a la falta de una calibración local de los métodos utilizados (Jensen, 1973). Esta calibración es necesaria debido a que los métodos de cálculo sólo son válidos para aquellas condiciones climáticas donde el modelo fue desarrollado inicialmente.

En España los métodos de cálculo que se han utilizado tradicionalmente han sido el de Thornthwaite (1948) y el de Blaney-Criddle (1950), que sólo utilizan datos de temperatura. Es sabido que el empleo de estos métodos en zonas áridas y semiáridas no es aconsejable, ya que infravaloran las predicciones de ET_0 debido a que no tienen en cuenta factores como la humedad relativa del aire, velocidad del viento y radiación solar, factores que influyen notablemente en el consumo de agua de los cultivos (Elías y Ruiz Beltrán, 1977).

En los últimos quince años se están utilizando otras metodologías de cálculo de las necesidades hídricas desarrolladas más recientemente (Doorenbos y Pruitt, 1977; Burman et al., 1983; INRA, 1984; ASAE, 1985; Smith et al., 1991a y 1991b).

Entre ellos, la metodología de la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO) descrita en el Cuaderno FAO de Riego y Drenaje nº 24, de título "Las necesidades de agua de los cultivos" (Doorenbos y Pruitt, 1977) ha sido ampliamente utilizada en todo el mundo por agrónomos, hidrólogos y especialistas de riego y es recomendada por numerosas Agencias Internacionales de Desarrollo e Institutos de Investigación. El éxito de esta metodología ha sido debido fundamentalmente al sentido práctico y sencillez de los procedimientos utilizados y a la calibración de los métodos de cálculo de la ET_0 con lisímetros de distintas zonas geográficas de muy diversas condiciones climáticas.

Los distintos procesos de cálculo, siguiendo la metodología de la FAO, se han agrupado en las seis etapas siguientes:

- 1.- Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_0)
- 2.- Determinación de la curva de coeficientes de cultivo (K_c)
- 3.- Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c)
- 4.- Determinación de la precipitación efectiva (PE)

5.- Cálculo de las necesidades netas del cultivo (NC)

6.- Cálculo de las necesidades brutas de riego

En la metodología de la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO), para determinar las necesidades hídricas de los cultivos se recomienda la utilización de los métodos modificados por FAO de Penman (1948), de Makkink (1957), de Blaney-Criddle (1950) y del tanque evaporimétrico clase "A" (Doorenbos y Pruitt, 1977).

El método de Penman es un método de combinación, el de Makkink es un método de radiación, el de Blaney-Criddle es un método de temperatura y el del tanque evaporimétrico clase "A" es un método de evaporación.

Entre todos los métodos existentes para el cálculo de la ET_0 , los de combinación que incluyen un término de radiación y un término aerodinámico, tales como el de Penman, son los más universalmente aceptados y los que teóricamente dan los resultados más adecuados (Cuenca y Nicholson, 1982; Hansen, 1982). Sin embargo, estos métodos tienen el inconveniente de que necesitan la medida de gran cantidad de datos climáticos y sólo pueden ser aplicados, por lo tanto, en estaciones provistas de equipos de medida de temperatura, radiación, humedad relativa y recorrido del viento. Desgraciadamente, este tipo de estaciones meteorológicas son muy escasas en la red del Servicio Meteorológico.

Una importante ventaja de los métodos modificados por FAO es que cuando no se dispone de los datos medidos de la totalidad de las variables climáticas necesarias para el cálculo por el método de Penman, el conocimiento de los niveles (alto, medio y bajo) de la humedad relativa, insolación y viento es suficiente para mejorar sensiblemente las estimaciones de la ET_0 por los restantes métodos modificados por FAO.

La elección del método de cálculo de ET_0 depende fundamentalmente de la disponibilidad de datos climatológicos de la estación considerada. Así, si sólo se dispone de datos medidos de temperatura puede utilizarse el método de Blaney-Criddle; si también se dispone de datos medidos de radiación o insolación se podrá utilizar el método de Makkink y si además existen datos medidos de humedad del aire y recorrido del viento, se podrá utilizar el método de Penman. El Cuadro 5 presenta los datos necesarios para cada uno de los métodos.

CUADRO 5

Datos climáticos medidos y estimados que son necesarios para cada método FAO de cálculo de la ET_o
(Doorenbos y Pruitt, 1977).

METODO	TEMPERATURA	HUMEDAD	VIENTO	INSOLACION	RADIACION	EVAPORACION	CONDICIONES LOCALES (1)
Blaney-Criddle	*	0	0	0			0
Radiación	*	0	0	*	(*)		0
Penman	*	*	*	*	(*)		0
Cubeta Clase "A"		0	0			*	*

* Datos medidos; 0 Datos estimados; (*) Cuando puede disponerse de ellos, pero no son indispensables
(1) Las condiciones locales incluyen información sobre la ubicación de la estación: superficie de la parcela, cobertura del suelo, fenómenos de advección, etc.

Recientemente, el grupo de expertos internacionales de la FAO sobre necesidades hídricas de los cultivos ha comenzado a trabajar en la revisión de la metodología de FAO. Así, en mayo de 1990 se organizó una reunión en Roma, Italia, para establecer las bases y directrices de esta revisión. Las recomendaciones y conclusiones más significativas de esta revisión son las siguientes (Smith et al. 1991a y 1991b):

- 1.- Se considera aceptable continuar con el procedimiento de determinación de la ET_o y ET_c propuesto en el *Cuaderno de Riego y Drenaje* 24 de la FAO.
- 2.- Se recomienda la utilización del método Penman-Monteith como el mejor método de combinación para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) bajo distintas condiciones climáticas. Recientemente, la Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha adoptado el método de Penman Monteith para el cálculo de la ET_o en el programa de planificación y manejo del riego denominado "CROPWAT" (Smith, 1992).
- 3.- Se propone una nueva definición de la ET_o como la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético de una altura fija de 12 cm., una resistencia del cultivo de 69 sm⁻¹ y un albedo de 0,23, la cual será muy parecida a la tasa de ET de una superficie extensa de una cubierta verde de

4.- Recomendaciones específicas en la utilización de los métodos utilizados por FAO. Hay que destacar que, independientemente del método utilizado para el cálculo de la ET_0 , es fundamental realizar una calibración previa del método comparando los valores calculados de la ET_0 con los valores medidos en lisímetro en la propia zona donde se vaya a utilizar o en zonas de climatología similar (Faci, 1992).

4.2. Determinación de la curva de coeficientes de cultivo (Kc)

El efecto de las características propias del cultivo en sus necesidades hídricas viene dado por el coeficiente de cultivo (Kc).

El coeficiente de cultivo (Kc) varía con el tipo de cultivo, estado vegetativo y clima. Existen grandes diferencias entre los Kc de los distintos grupos de cultivos. Estas diferencias se deben a las peculiaridades de las plantas en la resistencia a la transpiración, ya que las diferencias en el comportamiento estomático y en las características de las hojas influyen en el consumo de agua del cultivo.

Cuando un cultivo es joven y no cubre la totalidad de la superficie del suelo, la tasa de transpiración es baja y la tasa de evaporación de agua del suelo dependerá del grado de humedad en la superficie del mismo. Conforme el cultivo va creciendo, la transpiración se hace más importante y llega a hacerse máxima cuando se llega a la cobertura efectiva completa.

El porcentaje de suelo sombreado (% SS) es el porcentaje de la superficie del suelo a la que da sombra el cultivo cuando los rayos de sol inciden verticalmente. Cuando la superficie del suelo está húmeda y el cultivo no cubre totalmente el suelo, la evaporación directa desde el suelo es alta, pero disminuye rápidamente cuando se seca. Por tanto la ET de un cultivo que sólo cubre parte del suelo y cuando éste se encuentra seco en la superficie, es menor que la del cultivo cubriendo la totalidad de la superficie, y dependerá en gran medida de la frecuencia de riego o lluvia.

Para la obtención de los valores de Kc la metodología FAO recomienda dividir el ciclo del cultivo en cuatro fases determinando la duración de cada una de ellas:

1. Fase inicial: Germinación y crecimiento inicial. Desde siembra hasta que se alcanza

1. **Fase inicial:** Germinación y crecimiento inicial. Desde siembra hasta que se alcanza un 10% de SS.
2. **Fase de desarrollo del cultivo:** Desde el final de la fase inicial hasta que se llega a una cubierta efectiva completa del 70-80% SS.
3. **Fase de mediados del período:** Desde que se alcanza una cubierta sombreada efectiva completa hasta el comienzo de la maduración.
4. **Fase de finales del período:** Desde el final de la fase anterior hasta plena maduración o recolección.

El Kc en la fase inicial se determina teniendo en cuenta el valor de la ET_0 y la frecuencia del riego o lluvias en dicho período (Figura 3). La elección del Kc en esta fase es difícil debido a la variabilidad de la frecuencia de lluvias que se puede producir en los períodos de establecimiento de los cultivos.

El Kc en las fases de mediados y finales del período (valor último) se obtiene, para cada cultivo, de tablas publicadas (Doorenbos y Pruitt, 1977). El Cuadro 6 presenta estos valores para algunos cultivos.

Una vez que se conoce la fecha de siembra y la duración de las 4 fases mencionadas anteriormente para un cultivo determinado y se dispone de los valores del Kc en la fase inicial, Kc en la fase de mediados y el valor último del Kc en la fase de finales, se puede proceder a construir la curva básica del Kc del cultivo. En la fase inicial, la curva del Kc es horizontal pasando por el valor de Kc inicial. En la fase de desarrollo, la curva es una línea recta ascendente con el origen en el Kc inicial y el final en el Kc de mediados. En la fase de mediados, es una línea horizontal pasando por el valor de Kc de mediados. Por último, en la fase de finales es una recta descendente con el origen en el Kc de mediados y el final en el valor último del Kc de finales del período del cultivo.

Finalmente con los Kc de cada fase, representados en una Gráfica se puede obtener una curva de la evolución del Kc a lo largo del ciclo del cultivo considerado. A título de ejemplo la Figura 5 presenta la construcción de la curva de Kc del maíz en la finca experimental del S.I.A. en Zaragoza.

Cuadro 6: Valores de los coeficientes de cultivo (Kc) de distintos cultivos en las fases de mediados y de finales del desarrollo del cultivo (De Doorenbos y Pruitt, 1977)

CULTIVO	FASE	CONDICIONES CLIMATICAS			
		HRmin > 70%		HRmin > 50%	
		u de 0-5 m/s	u de 5-8 m/s	u de 0-5 m/s	u de 5-8 m/s
CEBADA	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,25	0,25	0,20	0,20
MAIZ GRANO	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,55	0,55	0,60	0,60
ALGODON	3	1,05	1,15	1,20	1,25
	4	0,65	0,65	0,65	0,70
PATATA	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,70	0,70	0,75	0,75
SORGO	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,50	0,50	0,55	0,55
SOJA	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,45	0,45	0,45	0,45
GIRASOL	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,40	0,40	0,35	0,35
TRIGO	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,25	0,25	0,20	0,20

HRmin = Humedad relativa del aire mínima.

u = Velocidad del viento en m/s.

Fase 3 = Fase de mediados del período.

Fase 4 = Fase de finales del período (valor último).

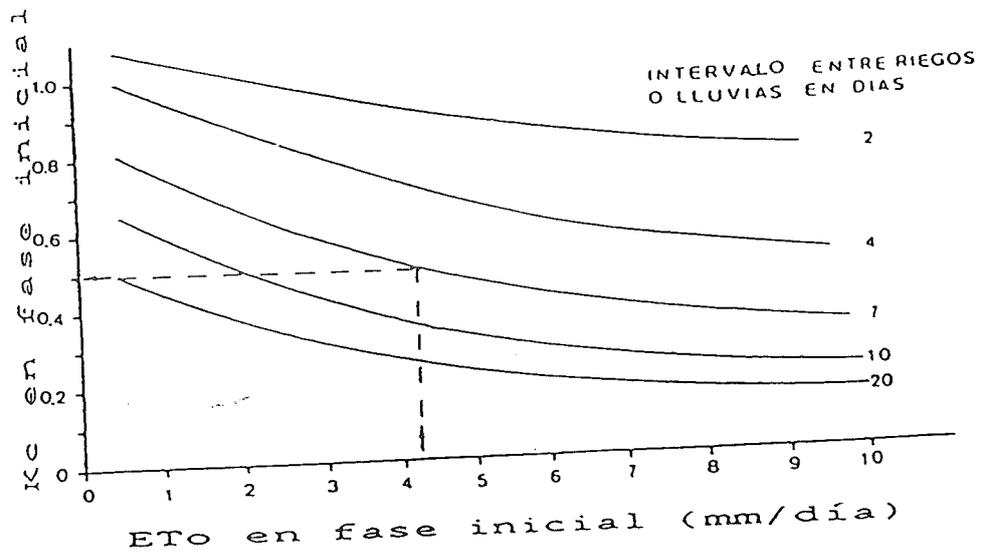


Figura 3. Abaco para la obtención del K_c en la fase inicial a partir de la ET_0 y de la frecuencia de riego o lluvia. Adaptado de Doorenbos y Pruitt, 1977.

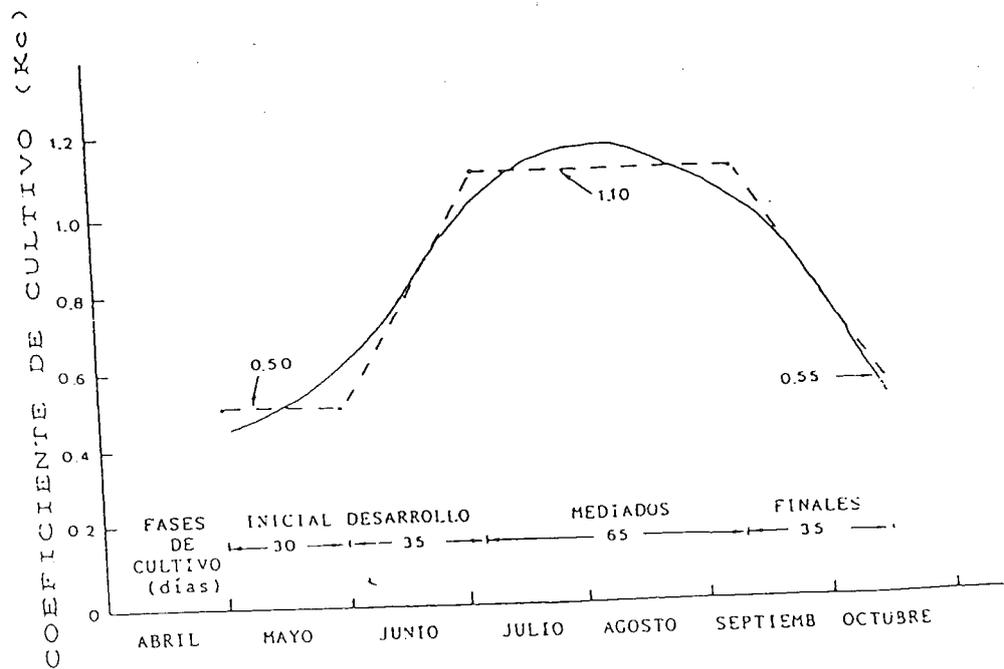


Figura 4. Ejemplo de construcción de una curva de K_c para maíz en la finca experimental d S.I.A. en Zaragoza.

4.3. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc)

La evapotranspiración de un cultivo (ETc) se define como la altura de agua necesaria para el desarrollo óptimo del cultivo sano, en un campo extenso y en condiciones óptimas de suelo y fertilidad.

La ETc se calcula mediante la expresión:

$$ETc = Kc \times ET_0$$

4.4. Determinación de la precipitación efectiva (PE)

Desde un punto de vista agronómico, la precipitación efectiva (PE) es la proporción de la lluvia que sirve para satisfacer las necesidades de consumo de agua del cultivo. La PE depende de la intensidad de la precipitación, del contenido de humedad del suelo antes de la lluvia, de la tasa de infiltración del suelo, de la capacidad de retención de agua en la zona radicular del cultivo y de la evapotranspiración de éste.

Un método simplificado para calcular la PE que ha sido utilizado ampliamente es el método del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Se trata de un método empírico desarrollado a partir de numerosos trabajos experimentales en el que se calcula la PE mensual a partir de la precipitación total mensual, de la evapotranspiración mensual del cultivo y de la capacidad de retención de agua en el suelo, expresada a través de la dosis de riego neta.

Cuenca (1989) desarrolló unas ecuaciones de regresión para describir esta metodología de cálculo de la PE que se resumen a continuación:

$$PE = f(D) [1,25 p^{0,824} - 2,93] 10^{0,000955ETc}$$

donde:

PE = Precipitación efectiva en mm/mes.

f(D) = Función correctora para una dosis de riego neta diferente de 75 mm.

Para D = 75 mm, f(D) = 1.

La función f(D) viene dada por la expresión:

$$f(D) = 0,53 + 0,0116D - 8,94 \cdot 10^{-5} D^2 + 2,32 \cdot 10^{-7} D^3$$

P = Precipitación total en mm/mes.

ETc = Evapotranspiración del cultivo en mm/mes.

D = Dosis de riego neta en mm.

Dastane (1974) realizó una amplia revisión sobre la determinación de la precipitación efectiva en la agricultura.

4.5. Cálculo de las necesidades netas del cultivo (NC)

Las necesidades hídricas netas vienen dadas por la expresión:

$$NC = ETc - PE$$

donde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo o necesidades hídricas brutas.

PE = Precipitación efectiva.

La ecuación puede aplicarse a períodos mensuales o de toda la duración del cultivo.

4.6. Determinación de las necesidades de lavado (NL)

Las necesidades de lavado (NL) se definen como la fracción mínima del agua aplicada que debe drenar a través del sistema radicular para mantener la salinidad del suelo por debajo de un cierto nivel dañino para el cultivo. El cuadro 4 presenta los niveles de tolerancia a la salinidad de dS/m de distintos cultivos para rendimientos del 100%, 90%, 75% y 50% y 0% del rendimiento potencial (Ayers y Westcot, 1989).

En general la salinidad del suelo aumenta conforme avanza el ciclo del cultivo. Mediante el lavado del suelo, las sales se desplazan fuera de la zona radicular y se logra mantener un nivel de salinidad en el suelo que no supera a los niveles de tolerancia para ese cultivo. El lavado se puede realizar antes, después o durante el desarrollo del cultivo, dependiendo de la disponibilidad de agua.

El lavado es un factor fundamental para controlar las sales incorporadas con el agua de riego.

Las necesidades de lavado de un cultivo específico vienen dadas por la ecuación (Ayers y Westcot, 1989):

$$NL = \frac{ECw}{5 ECe - ECw}$$

donde:

NL = Necesidades de lavado mínimas para controlar la salinidad del suelo por debajo de los niveles de tolerancia en sistemas de riego por gravedad.

ECw = Conductividad eléctrica del agua de riego en dS/m.

ECe = Conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo.

El Cuadro 7 presenta los niveles de tolerancia a la salinidad del agua de riego y del suelo para distintos cultivos

Cuadro 7: Relación entre la salinidad del agua de riego (ECw) o la salinidad del suelo (ECe) y el rendimiento potencial de distintos cultivos (De Ayers y Westcot, 1989)

CULTIVO	RENDIMIENTO POTENCIAL %									
	100		90		75		50		0	
	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw
CEBADA	8,0	5,3	10,0	6,7	13,0	8,7	18,0	12,0	28,0	19,0
ALGODON	7,7	5,1	9,6	6,4	13,0	8,4	17,0	12,0	27,0	18,0
REMOLACHA	7,0	4,7	8,7	5,8	11,0	7,5	15,0	10,0	24,0	16,0
SORGO	6,8	4,5	7,4	5,0	8,4	5,6	9,9	6,7	13,0	8,7
TRIGO	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,3	13,0	8,7	20,0	13,0
SOJA	5,0	3,3	5,5	3,7	6,3	4,2	7,5	5,0	10,0	6,7
MAIZ	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0	6,7
PATATA	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0	6,7
MELOCOTONERO	1,7	1,1	2,2	1,5	2,9	1,9	4,1	2,7	6,5	4,3

4.7. Cálculo de las necesidades de riego

El objetivo primordial del riego es el suministro a la zona radicular del cultivo de la cantidad suficiente de agua y en los momentos adecuados para la obtención de la producción óptima de dicho cultivo. Las necesidades de riego deben incluir la suma de las necesidades hídricas netas del cultivo, de las necesidades de lavado del suelo y de las restantes pérdidas de agua producidas por el propio sistema de riego.

Las pérdidas de agua en los sistemas de riego se producen normalmente por escorrentía superficial y percolación profunda y dependen fundamentalmente de la eficiencia de aplicación, uniformidad de distribución, diseño y manejo del sistema de riego.

La eficiencia de aplicación (E_a) del riego se define como la relación entre el volumen de agua que queda almacenado en la zona radicular del cultivo y el volumen aplicado a la parcela en el riego.

Los valores de la eficiencia de aplicación (E_a) de los distintos sistemas de riego dependen de sus propias características y de su manejo.

La eficiencia de aplicación (E_a) es un parámetro de vital importancia en la determinación de las necesidades brutas de riego de los cultivos. Por ello, los valores de la E_a utilizados en los proyectos de riego deben ser similares a los que se producen en el manejo real del riego en la zona regable estudiada.

La forma más eficaz para obtener valores fiables de la E_a del riego es a partir de evaluaciones realizadas en parcelas representativas del regadío estudiado o en zonas con un manejo similar del riego para las nuevas zonas regables.

La escorrentía superficial puede producir importantes procesos de erosión del horizonte superficial del suelo en parcelas con pendiente y la percolación profunda puede arrastrar los abonos y productos fitosanitarios y movilizar las sales del subsuelo, causando un deterioro de la calidad de las aguas de retorno del regadío.

Estas aguas se incorporan a los cauces naturales produciendo también un descenso de su calidad. Por esta razón, la determinación correcta de las necesidades de riego, junto con un manejo correcto del riego, son aspectos fundamentales para evitar efectos negativos del regadío en el medio ambiente

Un valor bajo de la eficiencia de aplicación (E_a) indica que solamente una pequeña parte del agua aplicada queda almacenada en la zona radicular del cultivo. Asimismo, un valor bajo de la uniformidad de distribución del agua de riego indica un reparto irregular del agua aplicada e implica la aplicación de una dosis mayor de agua de riego para conseguir que una altura mínima de agua se infiltre en toda la parcela. Asimismo, el tipo de sistema de riego influye en las dosis de riego aplicadas. Por ejemplo, en los riegos de superficie las dosis mínimas que el sistema puede aplicar para el riego de toda la superficie de la parcela son muy elevadas y en muchas ocasiones superan a la capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular del cultivo, por lo cual se producen pérdidas por percolación.

Por esta razón, muy frecuentemente la comparación de las necesidades de riego calculadas a partir de la climatología, características del cultivo y valores normales de la eficiencia del riego, no se corresponden con las dotaciones de agua realmente utilizadas en muchos de nuestros regadíos.

5. Calendarios de riegos

Un manejo adecuado del riego para obtener la producción óptima de los cultivos requiere el establecimiento de calendarios de riego.

Dicho establecimiento de calendarios de riego o programación del riego consiste simplemente en la determinación de las cantidades de agua adecuadas y de los momentos oportunos de aplicación a lo largo del período de crecimiento del cultivo.

La información básica necesaria para la programación de los riegos es la disponibilidad de agua en el suelo y los cambios de esa disponibilidad que se van a producir en los días siguientes (de 1 a 10 días). Esta información permite conocer cuál será la fecha más conveniente para efectuar el próximo riego, así como la cantidad de agua a aplicar para cubrir el consumo de evapotranspiración producido desde el último riego.

Existen muchos factores que influyen en la programación de los riegos, tales como el clima, suelo, cultivo, sistema de riego, etc.

Normalmente, los parámetros utilizados en la programación de los riegos están basados en las medidas de:

- a) estado hídrico del suelo
- b) datos climatológicos y cálculos de ET
- y c) estado hídrico de la planta

Una reciente revisión de calendarios de riego ha sido realizada por Heermann et al., 1990.

La complejidad de los calendarios de riego depende del número de variables que se utilizan. Un calendario básico necesita conocer la climatología (temperatura y precipitación), características edáficas (profundidad del suelo y capacidad de retención de agua), características de los cultivos (fechas de siembra y recolección, períodos de crecimiento) y características del sistema de riego (tipo de riego, pluviometría y eficiencia de aplicación).

La programación del riego se puede efectuar a tiempo real, contando continuamente con los datos climáticos o del estado hídrico del suelo y cultivo de ese año específico, o se puede realizar en base al establecimiento de una directriz general del riego con los datos climáticos de un año medio.

Aun cuando se pretenda realizar un calendario a tiempo real, es muy conveniente establecer en primer lugar un calendario para un año medio que sirva de directriz general del riego. Cada año habrá que hacer los ajustes correspondientes a su climatología específica.

5.1. Métodos basados en el estado hídrico del suelo

Estos métodos están basados en el establecimiento de unos niveles de extracción sobre la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, de manera que el riego se efectúa cuando el contenido de humedad llega al nivel establecido.

Estos métodos están basados en el balance de agua en el suelo.

El nivel de extracción se fija de acuerdo a las características de suelo y cultivo y suele variar entre un 40 y un 70% del agua útil del suelo (el riego se efectúa cuando se ha extraído del 40 al 70% del agua útil del suelo).

Este tipo de modelos han sido ampliamente utilizados por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. (Jensen, 1970; Jensen et al., 1971). Este programa, que se denominó "Irrigation Management Service" (IMS) se ha utilizado en la programación de más de 400.000 ha. en EE.UU. (Harrington y Heermann, 1981).

Modelos más sencillos de calendarios de riegos han sido desarrollados por diferentes autores y para diferentes zonas. Así, Fereres et al. (1981) desarrollaron el programa "Irrigation Management Program" (IMP), que han utilizado en California.

En estos métodos basados en el balance de agua en el suelo, la extracción de agua por el cultivo puede medirse a partir de muestras gravimétricas de suelo o mediante la utilización de sonda de neutrones u otro sistema de medida de humedad del suelo.

Los tensiómetros y bloques de yeso se han utilizado para determinar el momento del riego cuando el potencial total de agua en el suelo en la zona radicular del cultivo llega a un valor determinado (Cary, 1981)

5.2. Métodos basados en datos climáticos y cálculos de ET

Estos métodos emplean relaciones empíricas y semiempíricas para el cálculo de la ET.

Existen numerosos métodos de cálculo de la ET_0 basados en:

- 1) la temperatura
- 2) la radiación solar
- 3) la evaporación de la lámina de agua
- y 4) la combinación de un término energético y otro aerodinámico.

El desarrollo reciente de las estaciones agrometeorológicas automatizadas está ampliando las posibilidades de programación de los riegos con estos medios.

5.3. Métodos basados en el estado hídrico de la planta

Los métodos de este tipo más utilizados en la actualidad son los que se apoyan en la medida del potencial hídrico de la hoja, en la diferencia de la temperatura del aire y de las hojas, en medidas de la variación del diámetro de los tallos de las plantas y en medidas de la resistencia a la difusión.

Un aspecto importante que no debe olvidarse es que para establecer una programación del riego es necesario que exista flexibilidad en el suministro del riego. En muchos regadíos españoles el riego se efectúa a turnos más o menos fijos, con lo cual el regante no puede programar sus riegos como quisiera. Asimismo, si se pretende ajustar la dosis de riego a las necesidades del cultivo, hay que tener presente que en los sistemas de riego por inundación la dosis mínima de riego viene impuesta

por el propio sistema de riego, mientras que en riegos a presión la dosis se puede variar sin problemas.

BIBLIOGRAFIA

- A.S.A.E., 1985. *"Advances in Evapotranspiration"*. Proceedings of the National Conference of Advances in Evapotranspiration. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph. Michigan E.E.U.U. 453 pp.
- AYERS, R.S., WESTCOT, D.W., 1989: *"Water Quality for Agriculture"*. FAO Irrigation and Drainage Paper, n° 29, FAO, Roma, Italia, 174 pp.
- BENAMI, A., OFEN, A., 1983: *"Irrigation Engineering. Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation, Principles, Design and Agricultural Practices"*. Irrig. Eng. Scientific Publication (IESP). Haifa, Israel, 257 pp.
- BLANEY, H.F.; CRIDDLE, W.D., 1950: *"Determining water requirements irrigated areas from climatological and irrigation data"*. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service. TP-96. 44 pp.
- BURMAN R.D., CUENCA, R.H., WEISS, A., 1983: *"Techniques for Estimating Irrigation Water Requirements"*. En: *Advances in Irrigation* Vol. 2. Ed. D. Hillel. Academic Press New York. E.E.U.U. 335-394 pp.
- CAVERO, J., 1987: *"Evaluación técnica y económica de distintos sistemas de riego por aspersión"*. Información Técnica 9/1987. Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes, Diputación General de Aragón, 4 pp.
- CARY, J.W., 1981: *"Microprocessing Design Criteria"*. En: *Irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80's*. Proc. of the ASAE. St. Joseph, Michigan, EE.UU., pp. 202-207.
- CUENCA, R.H., 1989: *"Irrigation system design. An engineering approach."* Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, EE.UU. 552 pp.
- CUENCA R.H., NICHOLSON, M.T., 1982: *"Application of Penman equation wind function"*. J.Irrig. and Drain.Div., Am.Soc.Civ.Eng., Vol.108. N°IR1: 13-23.
- DASTANE, N.G., 1974: *"Precipitación efectiva en la agricultura de regadío. Estudio sobre riego y avenamiento"*. N° 25, FAO. Roma, Italia. 68 pp.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O., 1977: *"Crop water requirements"*. Food and Agricultural Organization (FAO). Irrig. and Drain. Paper 24. Roma, Italia. 144 pp.

- ELIAS, F., RUIZ BELTRAN, L., 1977: "*Agroclimatología de España*". Cuaderno Inst. Nac. de Inv. Agr. N° 7, M.A.P.A.
- FACI, J.M^a., 1992: "*Contribución a la medida y cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_d) en Aragón*". Institución "Fernando el Católico", Diputación Provincial de Zaragoza, 125 pp.
- FACI, J.M^a., BERCERO, A., 1991: "*Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión*". Inv.Agr.: Prod.Prot.Veg. 6(2), pp. 171-182.
- F.A.O., 1977: "*Water for Agriculture*". Food and Agricultural Organization for the United Nations. U.N. Water Conference, Mar del Plata, Argentina, 26 pp.
- FERERES, E., GOLDFIELD, R.E., PRUITT, W.O., HENDERSON, D.W., HAGAN, R.M., 1981: "*The Irrigation Management Program: A new approach to computed assisted irrigation scheduling*". En: *Irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80's*. Proc. of the ASAE. St. Joseph, Michigan, EE.UU., pp. 202-207.
- HANSEN, V., 1982. "*On the problem of estimating daily rates of potential evapotranspiration*". Agricultural University of Norway, Dept. of Physics and Meteorology. Report N°. 49(15):1-15.
- HARRINGTON, G.J., HERMAN, D.F., 1981: "*State of the art irrigation scheduling computer program*". En: *Irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80's*. Proc. of the ASAE. St. Joseph, Michigan, EE.UU., pp. 171-178.
- HEERMANN, D.F., MARTIN, D.L., JACKSON, R.D., STEGMAN, E.C., 1990: "*Irrigation scheduling controls and techniques*". En: *Irrigation of agricultural crops*. Ed. Stewart S.A., Nielsen D.R. Am.Soc.Agronomy, n° 30. Madison, Wisconsin, EE.UU., pp. 510-536.
- HOFFMAN, G.J., HOWELL, T.A., SOLOMON, K.H., 1990: "*Introduction*". En: *Management of farm irrigation systems*. Ed. Hoffman, G.J., Hovell, T.A. y Solomon, K.H., A.S.A.E. St. Joseph, Michigan, EE.UU., pp. 5-10.
- HOLZAPFEL, E., MAIÑO, M.A., CHAVEZ-MORALES, J., 1985: "*Procedure to select an optimum irrigation method*", J. of Irrig. & Drain. Eng., A.S.C.E., 111(4): 319-329.
- I.N.R.A., 1984: "*Les Besoins en Eau des cultures*". Conference Internationale, Institut National de la Recherche Agronomique. París, Francia. 927 pp.

- JENSEN, M.E., 1970: "*Scheduling irrigations using climate crop soil data*". Am. Soc. Civ. Eng. J. Irrig. and Drain. Div. 96 (IRI): 25-38.
- JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L., PRATT, B.J., 1971: "*Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data*". Trans of A.S.A.E. 14(5): 954-959.
- JENSEN, M.E., 1981: "*Introduction*". En.: "Design and operation of farm irrigation systems" Ed.Jensen, M.E. A.S.A.E., St.Joseph, Michigan, EE.UU. pp. 3-11.
- KELLER, J.; COREY, F.; WALKER, W.R.; VAVRA, M.R., 1981: "*Evaluation of irrigation systems*". En Irrigation Challenges of the 80's, ASAE, St.Joseph, Michigan, EE.UU.: 95-105.
- LORD, J.M., THOMPSON, G., BURT, C., 1981: "*Selection of Irrigation Method*". En.: "Irrigation. Challenges of the 80's". 6:106-111, St.Joseph, Michigan, EE.UU.
- MAKKINK, G.F., 1957: "*Testing the Penman formula by means of lysimeters*". J.Inst. Water Eng. 11(3):277-288.
- PENMAN, H.L., 1948: "*Natural Evaporation for Open Water. Bare Soil and Grass*". Proc. Royal Society of London. A-193:120-146.
- SMITH, M., 1992: "*CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management*". Food and Agricultural Organization (FAO), Irrig. and Drain., Paper 46, Roma, Italia, 126 pp.
- SMITH, M.; SEGEREN, A.; SANTOS PEREIRA, L.; PERRIER, A.; ALLEN, R., 1991a: "*Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*", Reunión FAO, Roma, Italia, 28-31 mayo 1990, 45 pp.
- SMITH, M., ALLEN, R., MONTEITH, J.L., PERRIER, A., SANTOS PEREIRA, L., SEGEREN, A., 1991b: "*Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*", Reunión FAO, Roma, Italia, 28-31 mayo 1990, 45 pp.
- THOMPSON, G.T., SPIESS, L.B., KRIDER, J.N., 1980: "*Farm Resources and System Selection*". En.: "Design and operation of farm irrigation systems". Ed.Jensen, M.E. A.S.A.E. Monograph. 3:45-73. St.Joseph, Michigan, EE.UU.
- THORNTHWAITE, C.W., 1948: "*An Approach toward a Rational Clasification of Climate*". Geograph.Rev. 38:55.

WALKER, W.R., 1990: "*Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems*". Food and Agricultural Organization (F.A.O.), Irrig. and Drain. Paper n° 45, Roma, Italia, 137 pp.

**CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE REGADIOS
(CENTER)**

RIEGO POR SUPERFICIE: CONCEPTOS BASICOS

Enrique Playán Jubillar
Dr. Ingeniero Agrónomo
UNIDAD DE SUELOS Y RIEGOS
Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente
Diputación General de Aragón - CSIC
Apdo. 727, 50080 - ZARAGOZA

INDICE

1. Principios básicos del riego de superficie.
2. Tipos de riego por superficie.
 - Riego por inundación.
 - Riego por escurrimiento.
 - Riego por escurrimiento en parcelas cerradas.
 - Riego por surcos.
3. Fases y tiempos del riego.
4. Infiltración y tiempo de contacto.
5. Idoneidad del riego.
 - Coeficiente de uniformidad.
 - Uniformidad de distribución.
 - Uniformidad absoluta.
 - Eficiencia de aplicación.
 - Porcentaje de percolación profunda.
 - Porcentaje de escorrentía superficial.
6. Referencias.

1. Principios básicos del riego de superficie

La característica principal del riego de superficie es que el agua se distribuye en el campo por gravedad, de modo que el caudal de riego disminuye a lo largo del campo debido a la infiltración del terreno. Un riego de superficie que opere de manera idónea debe tener un equilibrio entre los procesos de avance e infiltración para que la lámina infiltrada en cada punto del campo sea similar, y todas las plantas de la parcela dispongan de aproximadamente la misma cantidad de agua.

El reto de la ingeniería del riego es conseguir una distribución del agua de riego lo más uniforme posible, de modo que las partes de la parcela que menos agua reciben tengan el agua suficiente para asegurar el desarrollo del cultivo. Por otro lado, se debe evitar la pérdida de agua por percolación profunda y por escorrentía superficial. Un condicionante más, que ha tomado fuerza en los últimos años es que se debe de minimizar la agresión al medio ambiente. El riego por superficie puede inducir la salinización de los cauces de los retornos de riego.

La consecución de los objetivos propuestos pasa por encontrar la combinación de las variables que produce un diseño óptimo. Sin embargo esto no es suficiente, ya que sólo un manejo adecuado asegurará el correcto funcionamiento del sistema.

2. Tipos de riego por superficie.

Resulta difícil establecer tipos de riego por superficie ya que en ocasiones las diferencias entre ellos no están claras. Por otra parte, estos tipos responden en ocasiones a métodos de manejo más que a categorías de diseño. Los siguientes tipos recogen la mayoría de los sistemas que pueden verse actualmente en uso en los regadíos de España.

Riego por inundación. En este caso, se trata de una parcela o cantero rodeado completamente por un dique o caballón. Las características principales del riego por inundación son que la parcela está nivelada a cero pendiente y que no hay desagüe. La forma de la parcela es generalmente rectangular o cuadrada, y su tamaño es muy variable, pero oscila generalmente entre 0,3 y 3 ha. Puesto que la parcela está completamente nivelada, el avance del agua en el campo es debido a la pendiente de la lámina de agua exclusivamente.

La figura 1 recoge dos configuraciones típicas del riego por inundación. En el primer caso, una parcela es regada desde una de sus esquinas, de modo que la compuerta o tajadera no interfiera con las maniobras de la maquinaria agrícola. En el segundo caso se observa como otra parcela es regada simultáneamente desde varios puntos. Esto es frecuente cuando la acequia de distribución corre paralela a uno de los lados del cantero.

El riego por inundación tiene una gran importancia, ya que es un sistema muy expandido en regadíos tradicionales. En la actualidad el riego

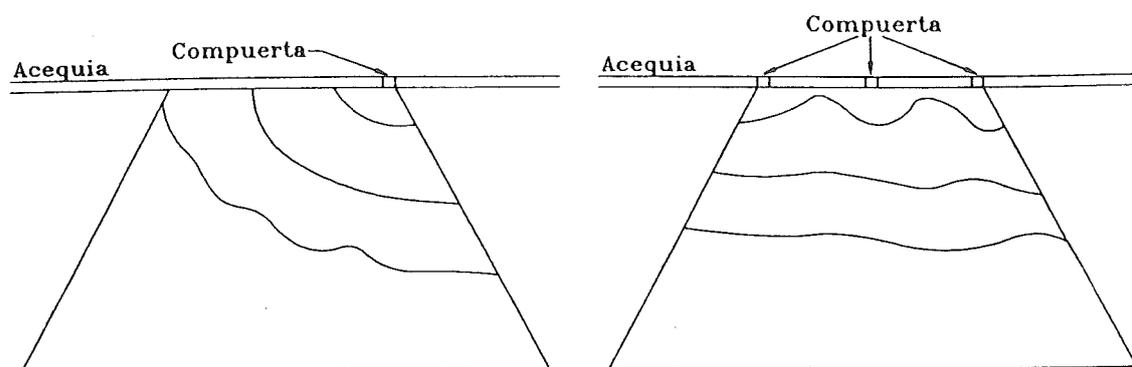


Figura 1. Dos configuraciones distintas del riego por inundación.

El riego por inundación tiene un interés adicional debido a la introducción de la nivelación mediante rayo láser, que ha facilitado considerablemente la labor de nivelación. Esta técnica permite disponer de parcelas de gran tamaño perfectamente niveladas en las que el riego por inundación puede alcanzar una elevada uniformidad y eficiencia con un bajo coste de mano de obra.

En ocasiones el manejo del riego difiere de lo explicado. En particular, es frecuente en algunas áreas regables que los agricultores construyan estructuras de desagüe de los canteros. Estos desagües consisten en pequeños portillos abiertos en el caballón con el objeto de eliminar parte del agua de riego y/o disminuir el tiempo que el cultivo está cubierto por agua, particularmente en cultivos sensibles al encharcamiento. Estos portillos desaguan generalmente a la parcela situada aguas abajo, que se regará inmediatamente después. En ocasiones se usa la misma tajadera como desagüe si está a la misma cota que la superficie del campo. Un beneficio adicional de esta práctica es que se acelera el riego de la finca, ya que la

siguiente parcela se riega por los portillos y por la tajadera, y en el caso de que se desagüe a la misma tajadera, el caudal de riego de la acequia aumenta. Estos dos tipos de desagüe están representados en la figura 2.

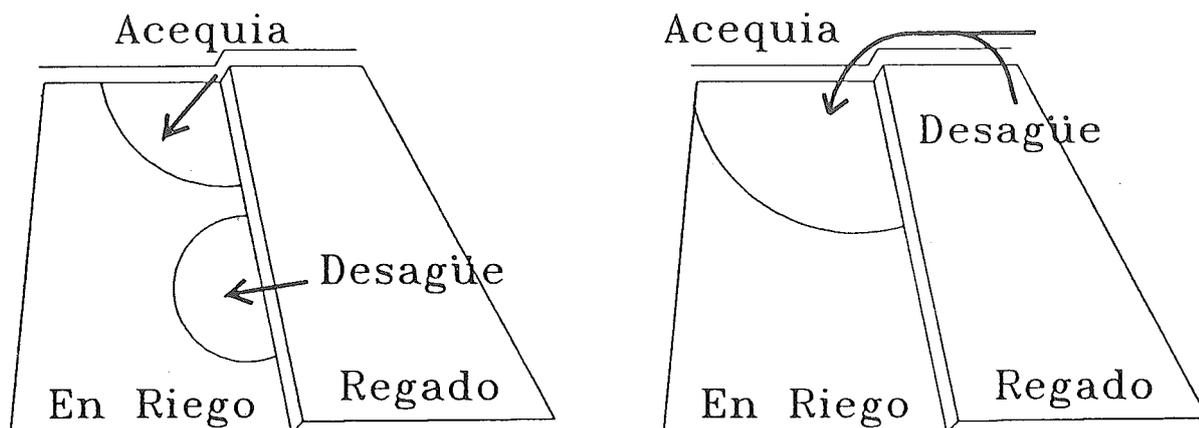


Figura 2. Distintos tipos de manejo del desagüe en riego por inundación. Izda.: Mediante portillos. Dcha.: Desagüando a la misma acequia.

Riego por escurrimiento. Este tipo de riego por superficie se caracteriza por que los canteros tienen una pendiente longitudinal y desagüe libre en su parte inferior. Las parcelas tienen generalmente forma rectangular, y en ocasiones sus lados mayores se curvan para seguir las curvas de nivel del terreno, tal como se indica en la figura 3.

El avance de la lámina de agua está facilitado por la pendiente del terreno. El desagüe de las parcelas plantea sin embargo la necesidad de una serie de infraestructuras a nivel de finca que complican el manejo del riego. En particular, será necesario disponer de una red de desagües que actúe de colector y de un depósito que almacene este agua. El agua de desagüe puede utilizarse para regar los mismos canteros, para lo que deberá ser bombeada,

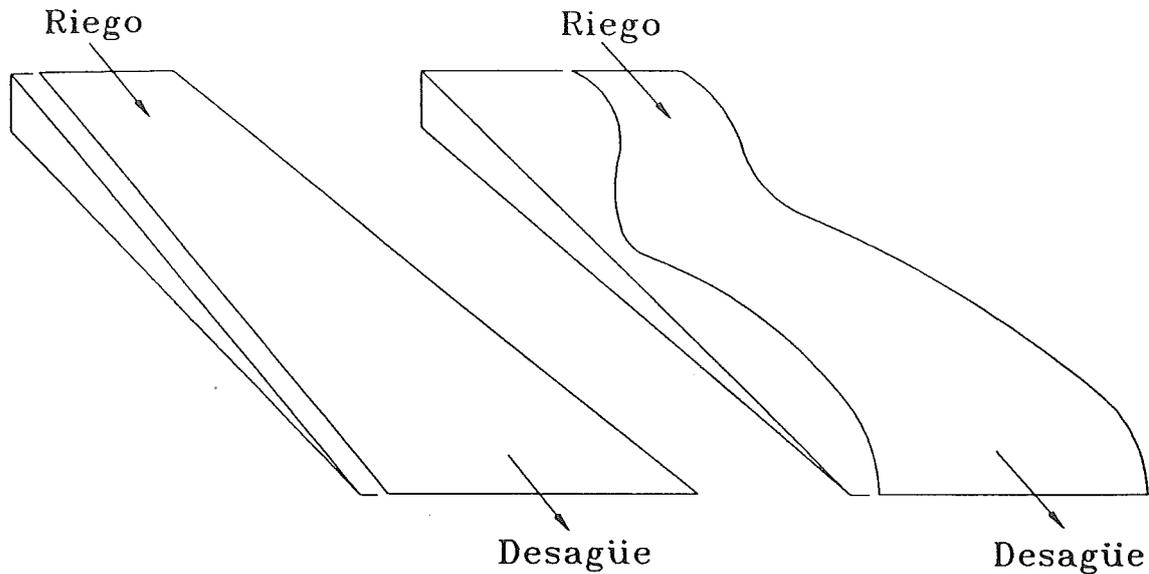


Figura 3. Distintos tipos de canchales de escurrimiento. Izda.: Rectangular. Dcha.: Siguiendo las curvas de nivel del terreno.

o bien destinarse a otros usos dentro o fuera de la finca. En muchas ocasiones las fincas no disponen de balsas para almacenar las aguas de desagüe por lo que este agua se vierte mediante la red de desagüe a los cauces naturales.

La figura 4 presenta el caso hipotético de una finca de regadío con seis canchales de escurrimiento y una máquina de riego de pivote central. El trazo grueso continuo representa la red de riego y el discontinuo la de desagüe. C1 a C6 son los seis canchales de riego. El riego de los canchales por su parte izquierda provoca un volumen de agua de desagüe en la parte baja (a la derecha de la figura). Esta agua es recogida por la red de desagüe y almacenada en el depósito (simbolizado por la letra D). El agua recogida en el depósito puede ser utilizada para los tres usos alternativos U1 a U3: U1,

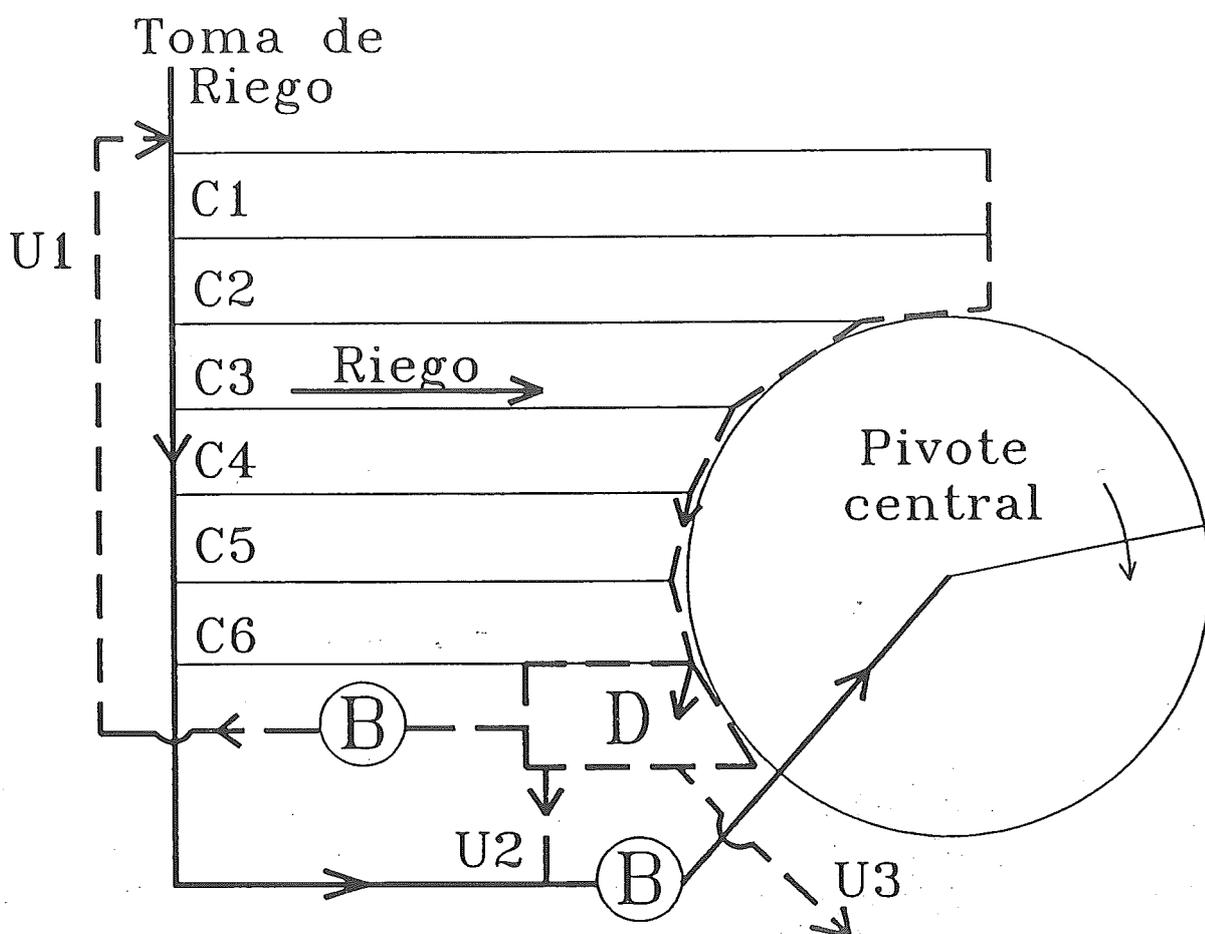


Figura 4. Finca con riego por escurrimiento y Pivote central, como ejemplo de los posibles usos del agua de desagüe.

reuso en los mismos cancheros. U2, reuso para riego en la misma finca. U3, desagüe o reuso en otras fincas. La letra B simboliza una estación de bombeo.

En las ocasiones en las que el riego por escurrimiento es la mejor solución técnica, la complejidad en el manejo del agua de desagüe se compensa con su mayor adaptación a las condiciones de la finca y más eficiente uso del agua.

Riego por escurrimiento en parcelas cerradas. Este tipo de riego es en realidad una mezcla de los dos anteriores. Se trata de canteros alargados, rodeados de caballones en los que hay una pendiente longitudinal y en los que, sin embargo, no hay provisión de desagüe. Resulta obvio que este tipo de riego tiene un grave problema de manejo: si el agua se corta demasiado tarde va a haber un importante encharcamiento en la parte baja que va a poner en peligro en muchas ocasiones la producción y la supervivencia del cultivo.

Este tipo de riego con frecuencia aparece como consecuencia de las modificaciones introducidas por los agricultores sobre un sistema inicial en riego por inundación. Cuando el caudal de riego es bajo éstos dan una pendiente al cantero para facilitar el avance del agua y así acelerar el riego de la finca. Hay que destacar que, puesto que todos los canteros tienen pendiente, no sirve de mucho desaguar de uno a otro, ya que este agua va a concentrarse siempre en la parte baja de los canteros.

Riego por surcos. Este tipo de riego se diferencia únicamente del riego por escurrimiento en que la superficie del suelo está ondulada formando pequeños canales a lo largo de los que circula el agua de forma independiente. Una característica importante del riego por surcos es que la parcela puede tener una pendiente lateral, tal como se indica en la figura 5. La longitud de los surcos puede llegar a ser de hasta 300 m en ocasiones.

Generalmente los surcos tienen pendiente longitudinal, aunque son frecuentes también los surcos nivelados a cero pendiente.

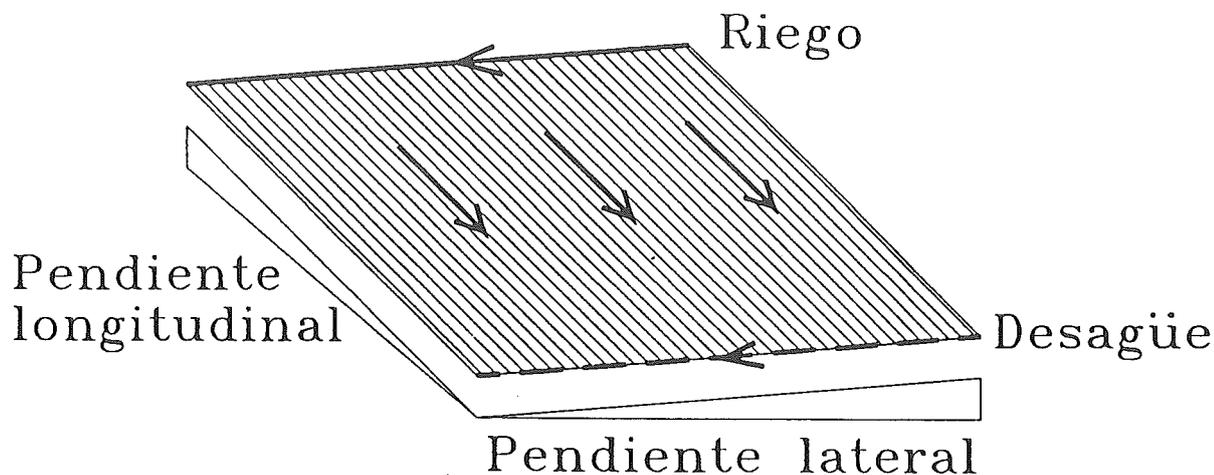


Figura 5. Parcela de riego por surcos.

El agua se vierte a cada surco individualmente, generalmente utilizando sifones, tal como se muestra en la figura 6. Los sifones se llenan de agua dentro de la acequia de riego y se colocan sobre el surco de manera que se establezca el flujo. Un sistema de desagüe similar al necesario para el riego por escurrimiento se encarga de transportar y almacenar el agua vertida al final del surco.

El riego por surcos es agronómicamente muy aconsejable para algunos cultivos que son muy sensibles al encharcamiento, ya que al sembrarse sobre la parte superior del surco, el sistema radicular nunca se cubre por completo de agua, por lo que se garantiza su aireación aún durante riegos de elevada duración. También es un sistema indicado para suelos de mala estructura en los que el contacto con el agua de riego produce costras.

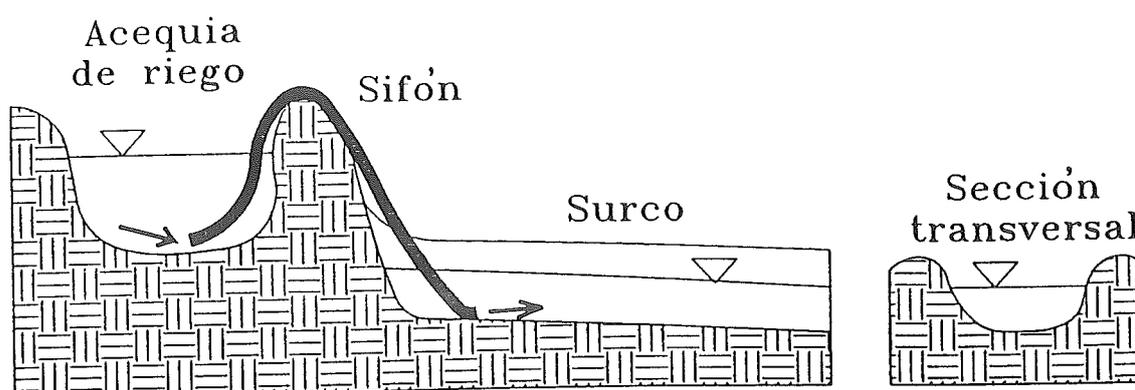


Figura 6. Sifón empleado para riego por surcos. Sección transversal de un surco.

3. Fases y tiempos del riego

El riego por superficie de cualquiera de los tipos anteriormente señalados se divide en fases que separan procesos hidráulicos distintos y que ayudan a la comprensión y el análisis del movimiento del agua sobre la superficie del cantero. Las fases del riego están separadas por los tiempos característicos, en los que se producen ciertas singularidades del riego. Estos tiempos son:

Tiempo del inicio del riego (t_i). Es el tiempo en el que comienza a entrar agua al cantero o surco.

Tiempo de avance (t_a). Es el tiempo en el que el agua cubre la totalidad del cantero o llega al final del surco.

Tiempo de corte (t_c). Es el tiempo en el que deja de entrar agua al cantero o surco.

Tiempo de vaciado (t_v). Es el tiempo en el que la parte superior del cantero o surco queda al descubierto después de infiltrarse todo el agua.

Tiempo de receso (t_r). Es el tiempo en que desaparece el agua de toda la superficie del cantero o surco.

La figura 7 representa los tiempos característicos y las fases que éstos definen:

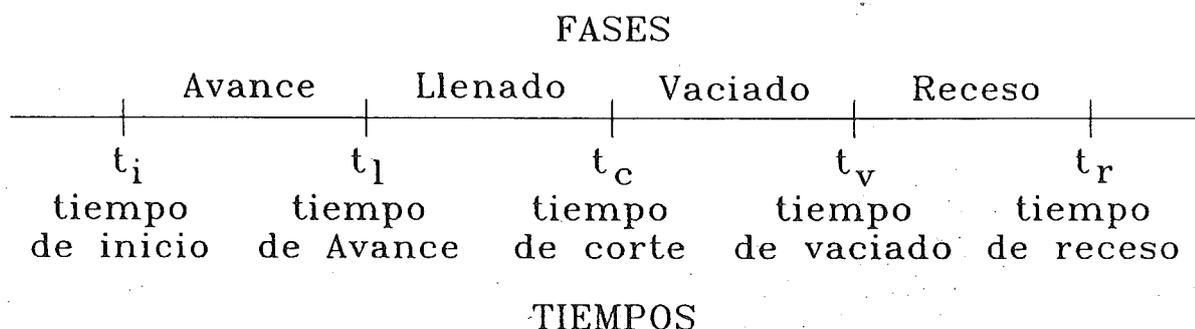


Figura 7. Tiempos y fases característicos del riego de superficie.

Cada tipo de riego por superficie tiene una distribución típica de estos tiempos característicos, reflejando sus peculiaridades de diseño.

Riego por inundación. Tal como se recoge en la figura 8, el riego por inundación supone una fuerte simplificación sobre lo explicado, ya que sólo tiene dos fases: avance y vaciado. Generalmente el agua se corta antes o al mismo tiempo en que termina el avance, por lo que no hay fase de llenado. Esto es debido a que con mucha frecuencia el riego por inundación aplica dosis de riego muy elevadas, y por ello es conveniente regar con el volumen mínimo que permite cubrir toda la superficie de la parcela. La pericia del

regante hace que, a pesar de este corte temprano del agua, se pueda completar la fase de avance. Una vez completado el avance, el agua forma un plano horizontal y se infiltra en lo que constituye la fase de vaciado.

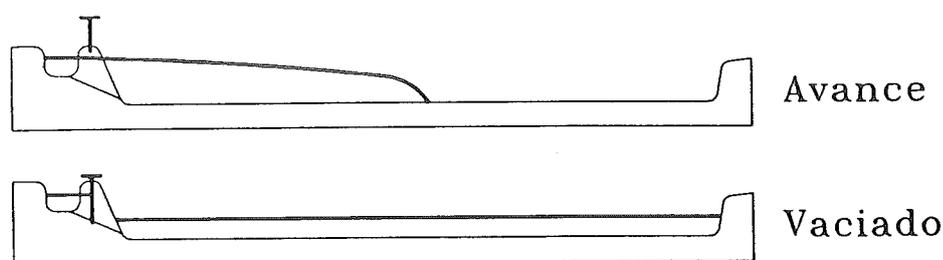


Figura 8. Fases del riego por inundación.

Una forma gráfica de representar un riego por superficie es el **diagrama de avance-receso**. En este diagrama se representa en abscisas el porcentaje del cantero que ha sido cubierto, y en ordenadas el tiempo desde el inicio del riego (t_i). En el gráfico se unen con una curva los puntos que tienen las coordenadas correspondientes a los frentes de avance y receso.

La figura 9 presenta un diagrama típico de avance-receso para un riego por inundación. En la citada figura se observa que, como ya se ha comentado, t_c es menor que t_r , y que t_v y t_r coinciden al estar el cantero nivelado a pendiente cero. En este caso hipotético, se aprecia en la figura que en el momento en que se cortó el riego el 87% de la superficie del cantero estaba cubierta de agua. La ausencia de la fase de receso se demuestra por el hecho de que la línea superior del diagrama es horizontal.

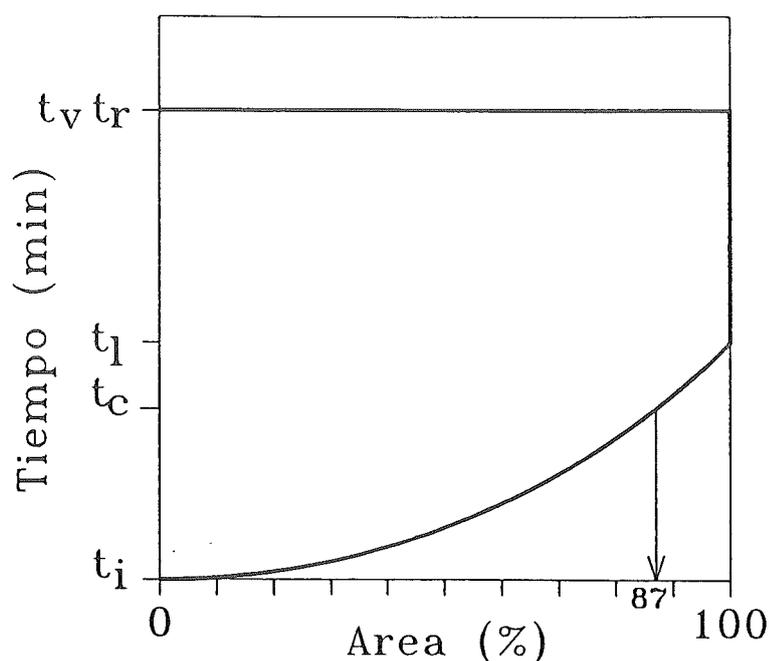


Figura 9. Diagrama de avance-receso para un riego por inundación.

La concavidad típica de la curva de avance responde al hecho de que el avance es mucho más rápido al principio del riego que al final, ya que conforme avanza el riego hay más superficie del campo infiltrando agua. Si el cantero fuera suficientemente largo, se llegaría a un punto de equilibrio en que todo el caudal de riego se invertiría en infiltración, el avance se haría inapreciable, y la curva de avance se haría asintóticamente vertical.

Riego por escurrimiento. Este tipo de riego supone el caso más complejo de los estudiados y por lo tanto se aprecian todas las fases que se han mencionado. La figura 10 presenta un diagrama con indicación de las fases del riego, y la figura 11 es un diagrama de avance-receso típico del riego por escurrimiento.

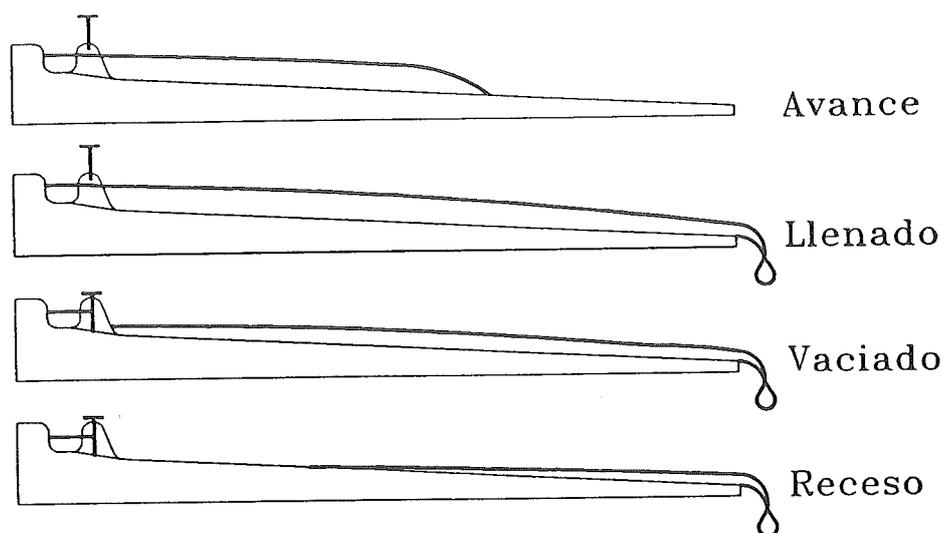


Figura 10. Fases del riego por escurrimiento.

En el riego por escurrimiento, por surcos, y por escurrimiento en parcelas cerradas, la abscisa del diagrama de avance-receso es la longitud del cantero o surco en lugar del porcentaje del área. Esto es debido a que en estos tipos de riego se puede medir con facilidad la distancia a la que se encuentra el frente de avance del agua desde la tajadera, mientras que en riego por inundación, al ser las parcelas con frecuencia cuadradas, esta medida resulta difícil (veáse la figura 1, Izda.).

La fase de receso se aprecia claramente en la figura 11. En muchas ocasiones su forma no es tan regular como la de la curva de avance porque el receso se ve gravemente afectado por la microtopografía del terreno.

La pendiente del terreno hace que el avance sea más rápido, y por ello generalmente se corta el riego después de completado el avance. De esta manera se prolonga el riego y se consigue una dosis de riego mayor y más

uniforme. Hay que recordar que con este sistema de riego se genera una importante cantidad de agua de escorrentía y que hay que disponer de ella de forma adecuada.

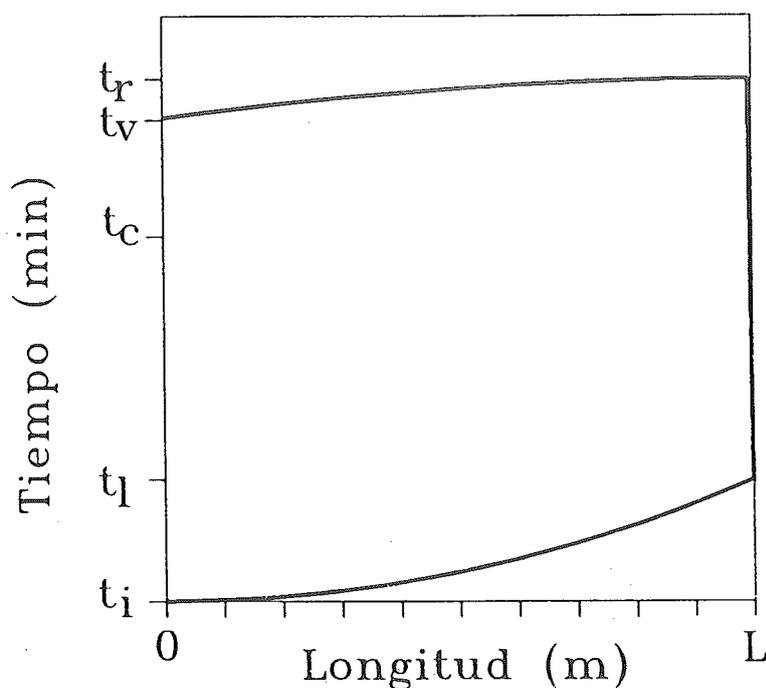


Figura 11. Diagrama de avance-receso para un riego por escurrimiento.

Riego por escurrimiento en parcelas cerradas. Las distintas fases de este tipo de riego están representadas en la figura 12. La figura 13 es un diagrama típico de avance-receso, en el que destaca que, al igual que el riego por inundación, se corta el agua antes del final de la fase de avance, aunque en este caso es todavía más importante para evitar encharcamientos prolongados en la parte baja del cantero. La curva de receso indica que se formó una cuña de agua en la parte baja del cantero.

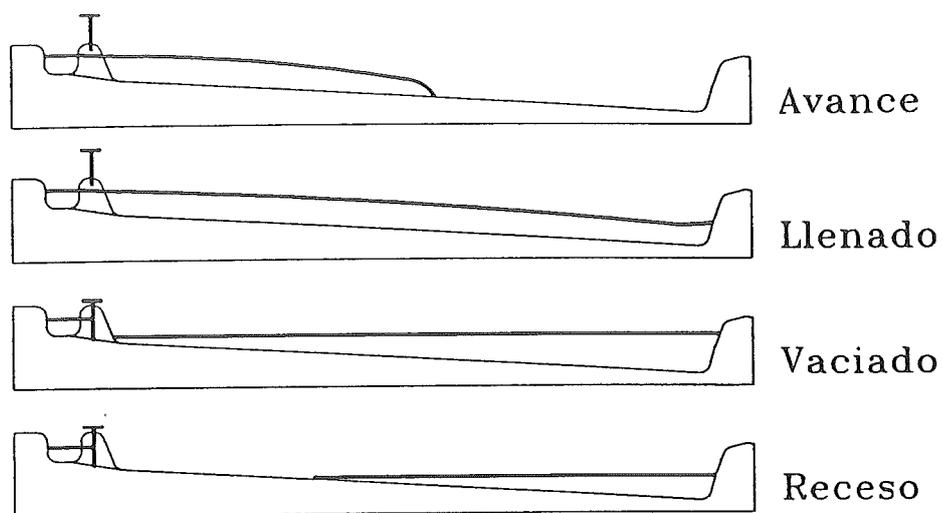


Figura 12. Fases del riego por escurrimiento en parcelas cerradas.

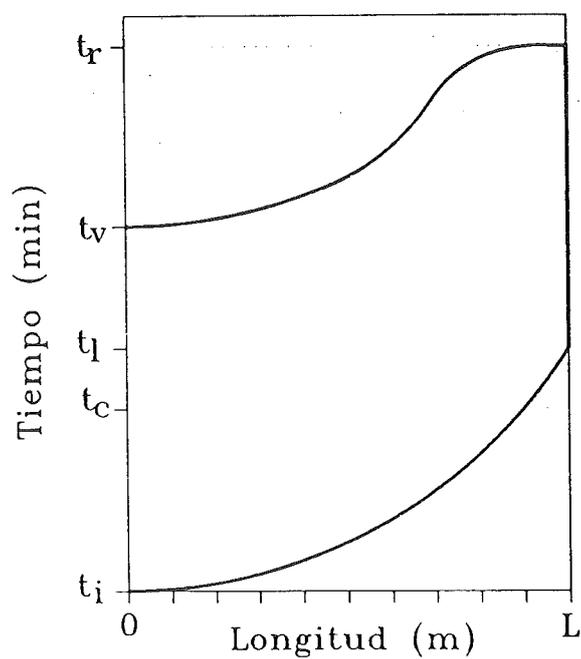


Figura 13. Diagrama típico de avance-receso del riego por escurrimiento en parcelas cerradas.

En este tipo de riego el momento del corte del agua es de una gran importancia para conseguir el riego más eficiente. Un error en el tiempo de riego supone un encharcamiento en la parte baja cuando el error es por exceso y una falta de riego cuando es por defecto.

Riego por surcos. Este sistema de riego tiene las mismas características que el riego por escurrimiento. Sin embargo, con frecuencia la fase de avance es pequeña en comparación con la de llenado, y las fases de vaciado y receso son muy cortas debido a que en el riego por surcos el volumen de agua superficial por unidad de área es muy pequeño en comparación con los otros tipos de riego por superficie.

4. Infiltración y Tiempo de contacto

El tiempo de contacto es el tiempo que el agua permanece sobre un punto del campo. Es decir, es el tiempo que va desde el avance hasta el receso. Durante este tiempo, hay una lámina de agua sobre el suelo y por lo tanto este agua tiene la oportunidad de infiltrarse en el suelo al ritmo que éste la admita.

El diagrama de avance-receso es una herramienta muy útil para el cálculo del tiempo de contacto. La figura 14 es un ejemplo de dicho cálculo. Para los puntos A y B, situados a lo largo de un cantero de escurrimiento, el tiempo de contacto se calcula como la distancia vertical entre la curva de avance y la de receso. Como se puede observar en este caso hipotético, el

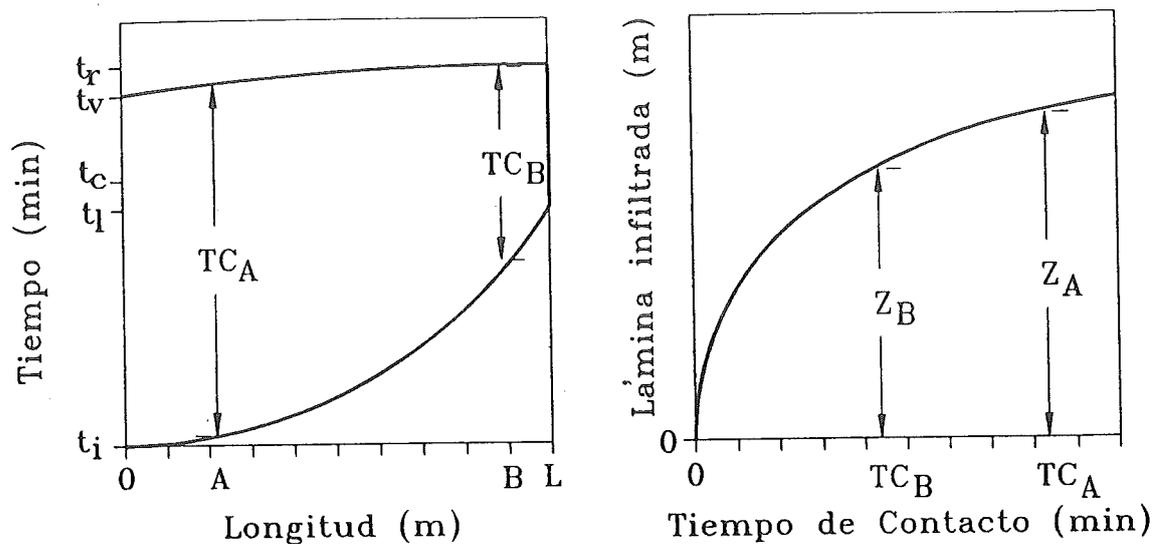


Figura 14. Cálculo del tiempo de contacto y de la lámina infiltrada para dos puntos de un canchero de escurrimiento.

tiempo de contacto del punto A es aproximadamente el doble que el del punto B. El gráfico de la derecha de la figura 14 es una curva típica de tiempo de contacto e infiltración acumulada. En esta curva se aprecia como al inicio del proceso de infiltración la lámina infiltrada crece muy rápidamente, mientras que al final el crecimiento es muy lento. Como consecuencia, la diferencia relativa entre las láminas infiltradas, Z_A y Z_B es mucho menor que la existente entre los tiempos de contacto, TC_A y TC_B .

Durante la fase de avance la infiltración comienza en cada punto cuando éste es alcanzado por el frente de avance. La figura 15 presenta un perfil típico del agua superficial y de la lámina infiltrada durante la fase de avance de un riego por superficie.

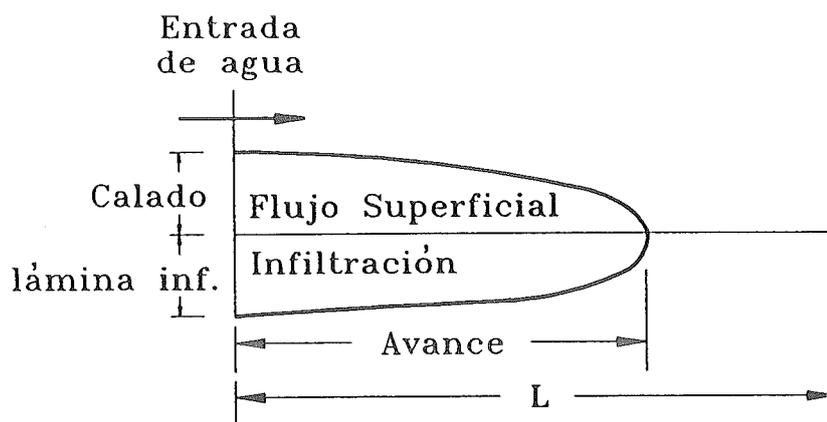


Figura 15. Perfil típico del agua superficial y de la lámina infiltrada durante la fase de avance de un riego por superficie.

La cantidad de agua infiltrada en cada punto de la parcela se puede medir (midiendo el contenido de agua en el suelo antes y después del riego y haciendo la diferencia) o bien estimar, utilizando fórmulas que relacionan el tiempo de contacto con la infiltración.

El perfil de la lámina de agua infiltrada al final del riego suele ser similar al representado en la figura 16. En ella se observa que el punto situado al lado de la tajadera es el que recibe más agua, mientras que el punto aguas abajo es el que se lleva la menor dosis.

En el caso del riego por escurrimiento en parcelas cerradas, el encharcamiento producido en la parte inferior del cantero hace que se incremente en esa zona la lámina de agua infiltrada. Un perfil típico de este tipo de riego se presenta en la figura 17.

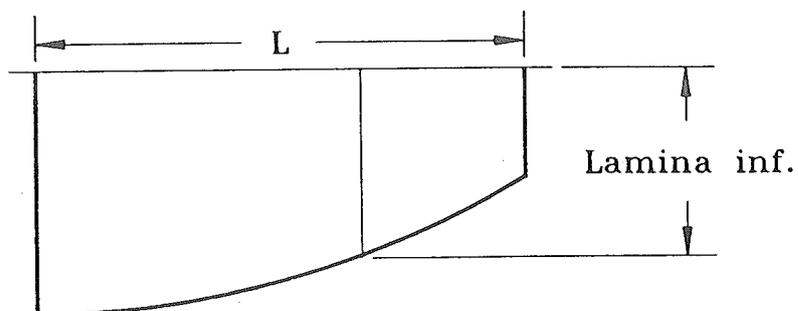


Figura 16. Perfil típico de la lámina de agua infiltrada al final del riego.

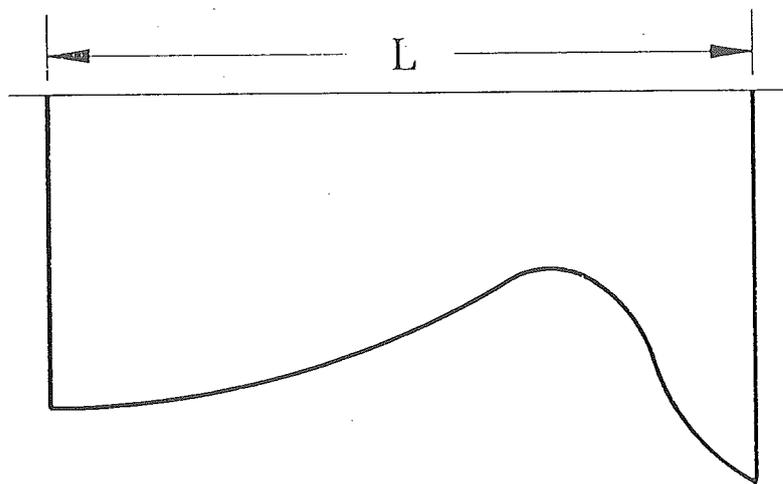


Figura 17. Perfil típico de la lámina de agua infiltrada al final de un riego por escorrentía en parcelas cerradas.

5. Idoneidad del riego

La terminología utilizada para describir el comportamiento del riego incluye frecuentemente los términos "eficiencia" y "uniformidad", que son utilizados con mucha ambigüedad y con distintos significados por distintos autores. Lamentablemente no existe ningún parámetro que por si solo sea suficiente para describir el comportamiento del riego, por lo que siempre se valoran varios indicadores a la vez.

Conceptualmente, la idoneidad de un riego depende de:

- El agua almacenada en la zona radicular del cultivo.
- Las pérdidas por percolación profunda.
- Las pérdidas por escorrentía superficial (desagüe).
- La uniformidad de la lámina infiltrada.
- El déficit de humedad en el suelo después del riego.

La uniformidad del riego se expresa mediante índices porcentuales que, caso de tener el valor de 100, implicarían que todos los puntos del campo reciben exactamente la misma dosis de riego.

La eficiencia del riego se puede referir a cada elemento de un sistema de riegos, y es en realidad un rendimiento, por lo que expresa el porcentaje de beneficio obtenido de un consumo. Por ejemplo, aplicado a un canal, la eficiencia sería el porcentaje del agua que entra que sale por el extremo opuesto. En este contexto, la eficiencia se aplica a uno o varios canteros o surcos, y en este caso recibe el nombre de eficiencia de aplicación (E_a).

Una buena utilización del agua de riego implica que las plantas del campo que menos agua reciben dispongan del agua suficiente para sus procesos evapotranspirativos, y que, además, no haya mucha diferencia entre la cantidad de agua que reciben las plantas. Esto implica elevada uniformidad y eficiencia.

A continuación se definen los parámetros de uniformidad y eficiencia más comúnmente utilizados en el riego de superficie.

Coeficiente de uniformidad (CU). El coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) es un parámetro estadístico ampliamente utilizado para describir la uniformidad de distribución del agua en los sistemas de riego (Christiansen, 1942). Normalmente, el CU es utilizado en sistemas de aspersión y goteo, pero puede utilizarse también en riego de superficie.

Se expresa en porcentaje, mediante la expresión siguiente:

$$CU = \left(1 - \frac{\sum^n |d|}{M \times n} \right) \times 100 = \left(\frac{M - \frac{\sum^n |d|}{n}}{M} \right) \times 100$$

donde:

$\sum^n |d|$ = Suma de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media de la lámina de agua infiltrada en los puntos de control.

M = Valor medio de la lámina de agua infiltrada en los puntos de control.

n = Número total de puntos de control.

Uniformidad de distribución (UD). La uniformidad de distribución indica la uniformidad de la lámina de agua infiltrada a lo largo y ancho de la parcela y se expresa:

$$UD = \frac{\text{Lámina media de agua infiltrada en el 25 \% del área menos regada}}{\text{Lámina media del agua infiltrada en la parcela}} \times 100$$

La altura media de agua infiltrada en el 25% del área menos regada se calcula como la media del 25% de los valores más bajos de lámina de agua infiltrada (ya sean medidos o estimados), donde cada punto representa una misma superficie.

Este es un buen estimador de la uniformidad, y necesita menos puntos de observación que el CU lo que es muy importante en aplicaciones prácticas.

Uniformidad absoluta (UA). La uniformidad absoluta se calcula muy sencillamente, ya que sólo necesita los valores mínimo y medio de la lámina de agua infiltrada. Como se desprende del análisis de los diagramas de avance-receso, el valor mínimo se encuentra muy frecuentemente en el extremo aguas abajo de los canteros y surcos. Su expresión es:

$$UA = \frac{\text{Lámina mínima de agua infiltrada}}{\text{Lámina media de agua infiltrada}} \times 100$$

Eficiencia de aplicación (Ea). La eficiencia de aplicación del riego (Ea) se define como:

$$Ea = \frac{\text{Volumen de agua añadido a la zona radicular}}{\text{Volumen de agua aplicado en la parcela}} \times 100$$

Durante el riego se pierde agua por percolación profunda (agua que se infiltra por debajo de la zona radicular del cultivo) y por escorrentía superficial (desagües). El aumento de estas pérdidas de agua supone una disminución de la eficiencia de aplicación del riego.

Porcentaje de percolación profunda (PPP). La pérdida de agua de drenaje por debajo de la zona radicular se refleja como el porcentaje de percolación profunda, que se expresa:

$$PPP = \frac{\text{Volumen de percolación profunda}}{\text{Volumen de agua aplicado a la parcela}} \times 100$$

Altos valores de la percolación profunda pueden producir problemas de asfixia radicular, ascensos potenciales de los niveles freáticos, salinización del suelo y lavado de nutrientes fuera de la zona radicular del cultivo. Asimismo, las aguas de percolación profunda provenientes del riego pueden

producir una movilización de las sales del suelo y consiguientes problemas de calidad de agua en los cauces receptores.

Porcentaje de escorrentía superficial (PES). Las pérdidas por escorrentía al final de la parcela en el riego por gravedad se expresan como el porcentaje de escorrentía superficial (PES):

El PES se expresa:

$$\text{PES} = \frac{\text{Volumen de escorrentía}}{\text{Volumen de agua aplicado a la parcela}} \times 100$$

La escorrentía superficial puede provocar erosión en las parcelas de riego y pérdida de agroquímicos.

6. Referencias

- Christiansen, J. E. (1942). "Irrigation by sprinkling". California Agricultural Experimental Station Bulletin 670, E.E.U.U. 94 pp.
- Heermann, D. F., Howell, T. A., Solomon, K. H. (1990). "Irrigation efficiency and uniformity". En: *Management of farm Irrigation Systems*. Ed. G. J. Hoffman, T. A. Howell, K. H. Solomon. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, E.E.U.U. p. 125-149.
- Hoffman, G. J., Howell, T. A., Solomon, K. H. (1990). "Introduction". En: *Management of farm Irrigation Systems*. Ed. G. J. Hoffman, T. A. Howell, K. H. Solomon. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, E.E.U.U. p. 6-10.
- Merriam, J. L., Shearer, M. N., Burt, C. M. (1980) "Evaluating Irrigation systems and practices". En: *Design and operation of farm irrigation systems*. Ed. M. E. Jensen. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan. E.E.U.U. p. 721-760.
- Walker, W. R. (1989). "Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems." FAO Irrigation and drainage paper 45. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma. 137 pp.
- Walker, W., Skogerboe, G. V. (1987). Surface irrigation: theory and practice. Prentice - Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

**CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE REGADIOS (CENTER)
SAN FERNANDO DE HENARES (Madrid)**

EVALUACION DEL RIEGO POR GRAVEDAD

**José M^a. Faci González
Dr. Ingeniero Agrónomo
UNIDAD DE SUELOS Y RIEGOS
Servicio de Investigación Agraria
Apdo. 727, 50080 - ZARAGOZA**

EVALUACION DEL RIEGO POR GRAVEDAD

1.- Introducción.

La mayoría de los sistemas de riego utilizados en los regadíos de las distintas zonas de la geografía española no están siendo manejados de manera óptima. En muchas ocasiones, las acequias no son capaces de llevar los caudales que serían necesarios para un riego eficiente, en otros casos las parcelas no están uniformemente niveladas, existen también zonas de regadíos con turnos fijos de riego demasiado frecuentes o demasiado espaciados en el tiempo. Estos problemas enumerados se traducen en una serie de perjuicios, como el aumento del agua utilizada en riego, aumento de la mano de obra, descenso en la producción de cultivos, etc.

Una evaluación del riego permite conocer la situación actual de la práctica del riego y determinar los cambios que son necesarios para introducir mejoras del manejo del riego con sus consiguientes ventajas económicas.

Estas mejoras en las prácticas de riego tienen como fin el conseguir un riego más adecuado y uniforme y se traducen en un ahorro de agua, ahorro de mano de obra y mejora de los rendimientos de los cultivos.

En muchos casos las modificaciones necesarias para la mejora son muy simples y no requieren de fuertes inversiones de capital. En algunos casos, sin embargo, la evaluación del riego nos puede indicar la existencia de unas condiciones actuales cuya mejora resulta muy difícil debido a fallos en el diseño u organización del riego, que aconsejan seguir con las mismas prácticas de riego realizando solamente los pequeños cambios que fueran posibles.

En riego por surcos y por escurrimiento, el recorte de caudal una vez alcanzado el final de la parcela, la disminución de la longitud de los surcos y tablares, y el empleo de sistemas de recuperación del agua de escorrentía superficial son ejemplos claros de la mejora que se puede realizar en el manejo del riego.

En riego por inundación, el empleo de caudales mayores produce un

avance más rápido con la consiguiente mejora de la uniformidad del riego.

Cabe destacar la gran importancia que una buena nivelación tiene en la mejora de la práctica del riego, que prácticamente siempre justifica la inversión necesaria para realizar dichos trabajos.

La causa principal de las bajas eficiencias de riego suele ser el riego excesivo que produce pérdidas de agua por escorrentía superficial y percolación profunda. La escorrentía superficial suele ocurrir en surcos y riego de tablares con pendiente y abiertos en la zona más baja. La percolación profunda es más corriente en riego por estanques y tablares cerrados.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es que los cambios necesarios para mejorar el manejo requieren flexibilidad en cuanto a la frecuencia del suministro y duración del riego, que por desgracia es muy poco frecuente en los regadíos por gravedad.

Las medidas incluidas en la evaluación son las siguientes:

- 1.- Caudal de entrada a la parcela y su evolución durante el tiempo de riego.
- 2.- Curvas de avance y recesión del agua en la superficie de la parcela.
- 3.- Volumen de escorrentía del agua de riego cuando no hay dique en la parte más baja de la parcela.
- 4.- Contenido de agua en el suelo en el momento anterior al riego.
- 5.- Tiempo de riego y dosis aplicadas a la parcela.
- 6.- Características de la tasa de infiltración del suelo.
- 7.- Características de la parcela, dimensiones, estado de nivelación, etc.

2.- Fases del riego por gravedad.

En el proceso del riego por gravedad se pueden distinguir 4 fases que se han representado gráficamente en la Figura 1. Estas fases son:

- 1.- Fase de avance, que comprende el tiempo desde el inicio del riego hasta que el frente de agua cubre la totalidad de la parcela.
- 2.- Fase de inundación, que comprende desde el final de la fase de avance hasta el tiempo de corte del riego.
- 3.- Fase de agotamiento, que comprende el intervalo entre el corte del riego y el comienzo de la desaparición del agua en parte de la parcela.
- 4.- Fase de recesión, que comprende desde el comienzo de la desaparición de agua hasta que se drena totalmente.

Los datos de la fase de avance de una evaluación del riego por gravedad son en general los más importantes. Durante esta fase es muy importante la medida del caudal de entrada al campo, los tiempos en que el frente de avance del agua llega a cada estación y la altura del flujo de agua cerca de la entrada de agua.

La fase más difícil de medir es la de recesión.

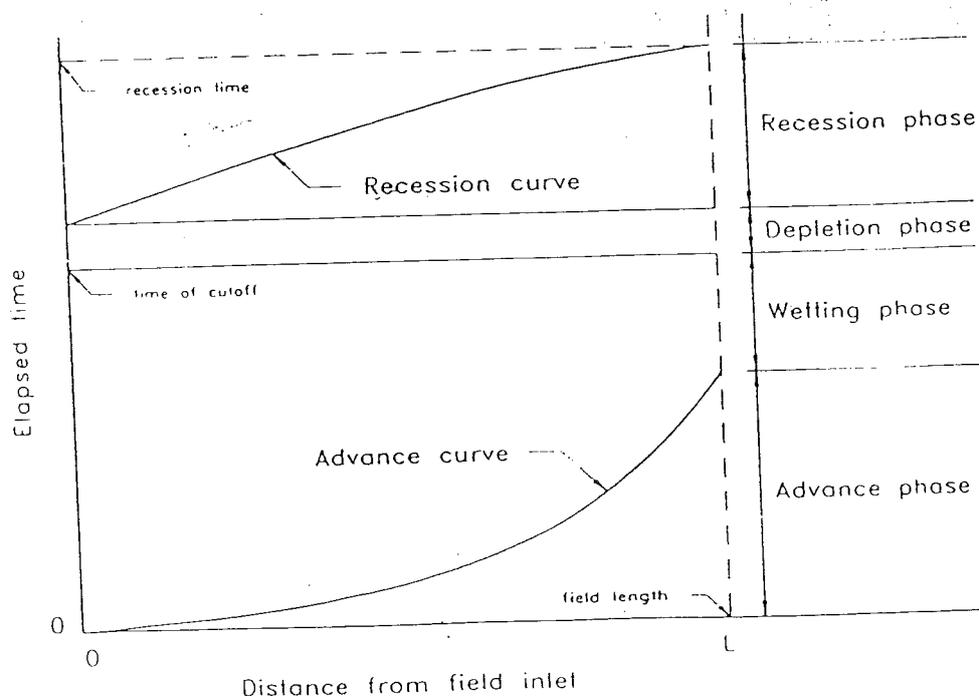


Figura 1: Curvas de avance y recesión en el riego por gravedad.

3.- Definiciones en la evaluación del riego por gravedad.

La terminología utilizada para describir el comportamiento del riego incluye frecuentemente los términos "*eficiencia*" y "*uniformidad*", que son utilizados con mucha ambigüedad y con distintos significados por distintos autores. No existe ningún parámetro que por si solo sea suficiente para describir el comportamiento del riego.

Conceptualmente, la idoneidad de un riego depende de:

- Cantidad de agua almacenada en la zona radicular.
- Pérdidas por percolación.
- Pérdidas por escorrentía superficial.
- Uniformidad del agua aplicada.
- Déficit de humedad en el suelo después del riego.

Para evitar confusiones en la utilización de los términos "eficiencia" y "uniformidad", es necesario definir claramente los parámetros utilizados. En estos apuntes se utiliza una síntesis de la terminología utilizada en las dos publicaciones siguientes:

- 1.- "*Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management*", de Merriam y Keller (1978).
- 2.- "*Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems*", de Walker (1989).

A continuación se definen una serie de términos que son usados comunmente en las evaluaciones de los riegos por gravedad.

3.1.- Déficit de humedad del suelo (SMD)

Es una medida de la humedad del suelo que indica la sequedad del suelo

en la zona radicular en el momento de la medida. Se expresa numéricamente como una altura de agua (mm). Esta altura coincide con la cantidad de agua del suelo que debe ser suministrada por el riego bajo las condiciones normales de manejo. Por esta razón, se prefiere utilizar la idea de déficit de humedad en vez del concepto de la altura de agua en el suelo, que es también muy utilizado.

3.2.- Déficit permisible para manejo (MAD)

Es el valor deseado del SMD en el momento del riego y puede ser expresado como el porcentaje de agua útil en la zona radicular o como la altura de agua que puede ser extraída de la zona radicular entre riegos consecutivos, produciendo el mejor balance económico entre beneficio del cultivo y coste del riego.

La evaluación de los sistemas de surcos, escurrimiento e inundación debe realizarse cuando el contenido de agua del suelo se aproxima al MAD, ya que la velocidad de infiltración, movimiento del agua y duración del riego están muy afectados por el déficit de humedad del suelo.

La estimación del SMD y MAD se puede realizar mediante la toma de muestras gravimétricas sin alterar y determinación de densidad aparente, punto de marchitez, capacidad de retención y profundidad de la zona radicular.

3.3.- Tiempo de aplicación (Ta)

Es el tiempo durante el cual está entrando agua a la parcela considerada.

3.4.- Tiempo de avance (Tadv)

Es el tiempo que el agua tarda en llegar hasta el final del surco, tablao o estanque desde la entrada de agua a la parcela.

3.5.- Tiempo de oportunidad (To)

Es el tiempo en que el agua tienen la oportunidad de infiltrarse en el suelo en un punto de la parcela. Junto a la entrada de agua el To se expresa por To(u) y en la parte más alejada de la entrada de agua de la parcela por To(1).

3.6.- Razón de avance (AR)

Se define como:

$$AR = \frac{T_{adv}}{T_o(1)}$$

3.7.- Uniformidad de distribución (DU)

Indica la uniformidad de la altura de agua infiltrada a lo largo y ancho de la parcela y se expresa:

$$DU = \frac{\text{Altura media de agua infiltrada en el 25\% del área menos regada}}{\text{Altura media del agua infiltrada en la parcela}} \times 100$$

La altura media de agua infiltrada en el 25% del área menos regada se calcula como la media del 25% de los valores más bajos de altura de agua infiltrada (ya sean medidos o estimados), donde cada valor corresponde a una misma superficie.

El DU es un indicador útil de los problemas de distribución del agua de riego. Un valor bajo indica que hay pérdidas excesivas por percolación profunda cuando la altura media del agua se ha infiltrado en la totalidad de la parcela.

3.8.- Coefficiente de uniformidad (UC)

El coeficiente de uniformidad de Christiansen es una representación estadística de la uniformidad de los sistemas de aspersión y goteo. Se expresa en porcentaje, mediante la expresión:

$$UC = \left(1 - \frac{\sum |d|}{M \times n} \right) \times 100 = \left(\frac{M - \frac{\sum |d|}{n}}{M} \right) \times 100$$

donde:

$\sum |d|$ = Suma de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media.

M = Valor medio del agua recogida en todos los pluviómetros o puntos de control.

n = Número total de pluviómetros o puntos de control.

3.9.- Eficiencia de aplicación (Ea)

La eficiencia de aplicación del riego (Ea) se define como:

$$Ea = \frac{\text{Volumen de agua añadido a la zona radicular}}{\text{Volumen de agua aplicado en la parcela}}$$

Las pérdidas de agua se producen como percolación profunda cuando la altura aplicada supera a la altura necesaria y como escorrentía superficial. Para calcular Ea hay que identificar estas pérdidas, lo cual implica que se debe conocer el SMD en el momento del riego y la altura de agua almacenada en la zona radicular proveniente del riego. También hay que determinar el déficit de humedad en las zonas

no regadas suficientemente.

El Cuadro 1 presenta las condiciones de los suelos y parcelas y los valores de E_a para distintos sistemas de riego.

METODO DE RIEGO	UNIFORMIDAD DEL SUELO	VELOCIDAD INFILTRACION	PENDIENTE	SUMINISTRO DE AGUA	E_a
Surcos	Uniforme en cada surco	Todas excepto muy altas	Muy suave	Medio-grande intermitente	0,70 - 0,75
Escurrimiento	Uniforme en cada tablar	Todas excepto extremas	Muy suave	Grande-intermitente	0,70 - 0,85
Inundación	Uniforme en cada estanque	Todas excepto extremas	Muy suave	A nivel	0,60 - 0,90
Aspersión	Suelos mezclados	Todas excepto muy lentas	Ligera, irregular	Medio-continuo	0,65 - 0,85
Goteo	Suelos mezclados	Todas	Cualquiera	Bajo-continuo	0,75 - 0,90

Cuadro 1: Intervalo de valores más frecuentes de la eficiencia de aplicación de distintos sistemas de riego y condiciones de suelo, infiltración, pendiente y suministro de agua.

3.10.- Ratio de percolación profunda (DPR)

La pérdida de agua de drenaje por debajo de la zona radicular se refleja como el ratio de percolación profunda, que se expresa:

$$DPR = \frac{\text{Volumen de percolación profunda}}{\text{Volumen de agua aplicado a la parcela}}$$

Altos valores de la percolación profunda producen problemas de axfisia radicular, de salinidad y de lavado de nutrientes fuera de la zona radicular del cultivo. Asimismo, los problemas de percolación profunda proveniente del riego pueden

producir una movilización de las sales del suelo y consiguientes problemas de calidad de agua en los flujos de agua.

3.11. Ratio de escorrentía superficial (TWR)

Las pérdidas por escorrentía al final de la parcela en el riego por gravedad se expresan en el ratio de escorrentía superficial (TWR):

El TWR se expresa:

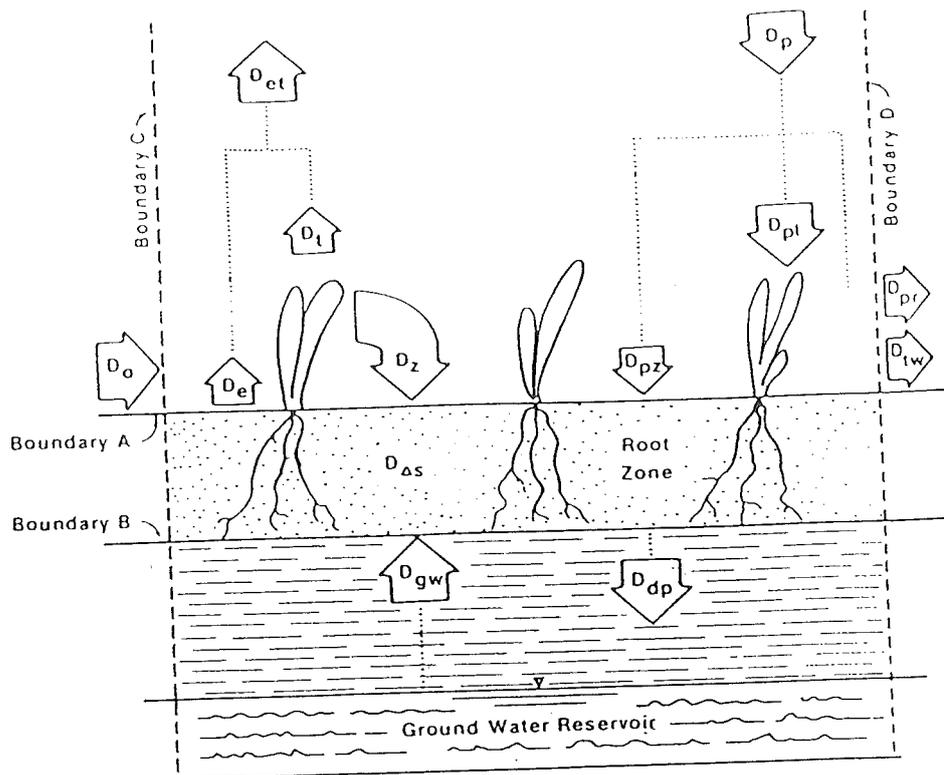
$$\text{TWR} = \frac{\text{Volumen de escorrentía}}{\text{Volumen de agua aplicado a la parcela}}$$

La escorrentía puede producir problemas de erosión.

4.- Balance de agua en la zona radicular de un suelo regado

Para una mejor comprensión de los términos empleados en la evaluación de los sistemas de riego, la Figura 2 presenta los distintos componentes del balance hídrico en la zona radicular de un suelo regado.

El parámetro más difícil de medir es la percolación profunda (Ddp). La contribución de la capa freática (Dgw) puede considerarse despreciable cuando se encuentra a cotas profundas



- D_a = depth of applied irrigation water
- $D_{\Delta s}$ = depth of change in soil moisture storage in the root zone where $D_{\Delta s}$ is positive for increasing soil moisture storage
- D_{dp} = depth of deep percolation
- D_e = depth of evaporation from soil surface or ponded water surface
- D_{et} = depth of evapotranspiration
- D_{gw} = depth of capillary rise from the groundwater table entering the root zone
- D_p = depth of precipitation
- D_{pt} = depth of precipitation intercepted by the plants (crop)
- D_{pr} = depth of precipitation that occurs as surface runoff
- D_{pz} = depth of precipitation that infiltrates into the soil
- D_t = depth of transpiration from plants
- D_{tw} = depth of tailwater (surface) runoff resulting from overland flow of the irrigation water supply
- D_z = depth of infiltrated water resulting from overland flow of the irrigation water supply

There are two additional terms that are useful to define at this point:

- D_{pn} = depth of net precipitation, or the depth of precipitation that is made available to the plant system
- D_{dt} = depth of drainage requirement for maintaining a salt balance in the root zone

Figura 2: Componentes del balance hídrico en la zona radicular de un suelo regado con riego por gravedad (de Walker y Skogerboe, 1987).

Antes de que el agua llegue a la parcela, hay unas pérdidas por evaporación directa de la red de acequias y pérdidas por filtraciones que no han sido incluídas en el balance pero que deben ser tenidas en cuenta al estudiar la eficiencia global del sistema de riego.

Una vez que el agua de riego entra en la parcela, penetra en el suelo y comienza a llenar el SMD del suelo. Según la idoneidad del riego, se pueden producir pérdidas por escorrentía superficial (Dtw) o de percolación profunda (Ddp).

La Figura 3 presenta 9 perfiles de la altura infiltrada en distintos riegos. Los valores de eficiencia que aparecen en la figura no corresponden a los definidos en estos apuntes. En la Figura 4 se presentan los perfiles de la altura infiltrada en los 3 casos típicos de riego (deficitario, adecuado y excesivo) que se suelen dar en riego por gravedad.

IRRIGATION-EFFICIENCY EXAMPLES

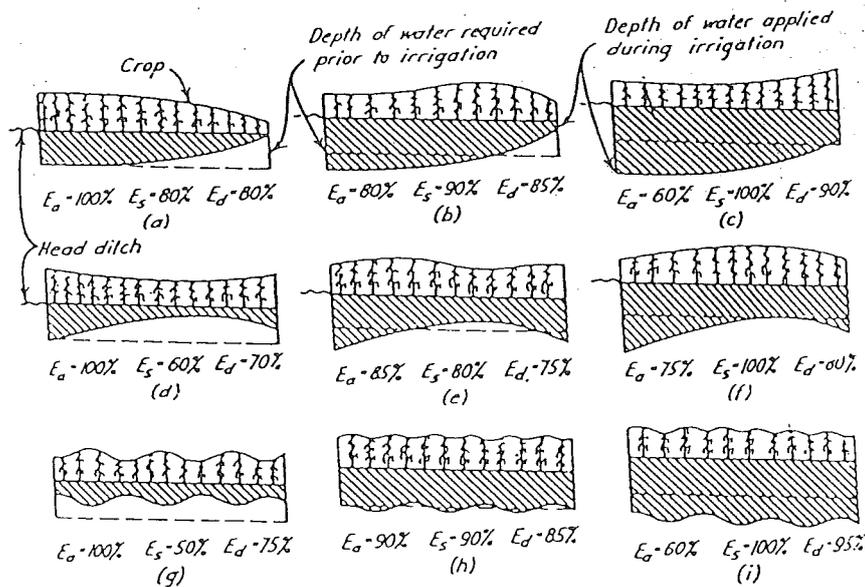


Fig. 13.2 Application, E_a , storage, E_s , and distribution, E_d , efficiencies and the effect upon corn production illustrated by two-dimensional profiles of the soil. Note Water-application efficiency estimates are made assuming no runoff (After Hansen, 1960.)

Figura 3: Perfiles de la altura de agua infiltrada en distintos riegos (De Israelsen y Hansen, 1962).

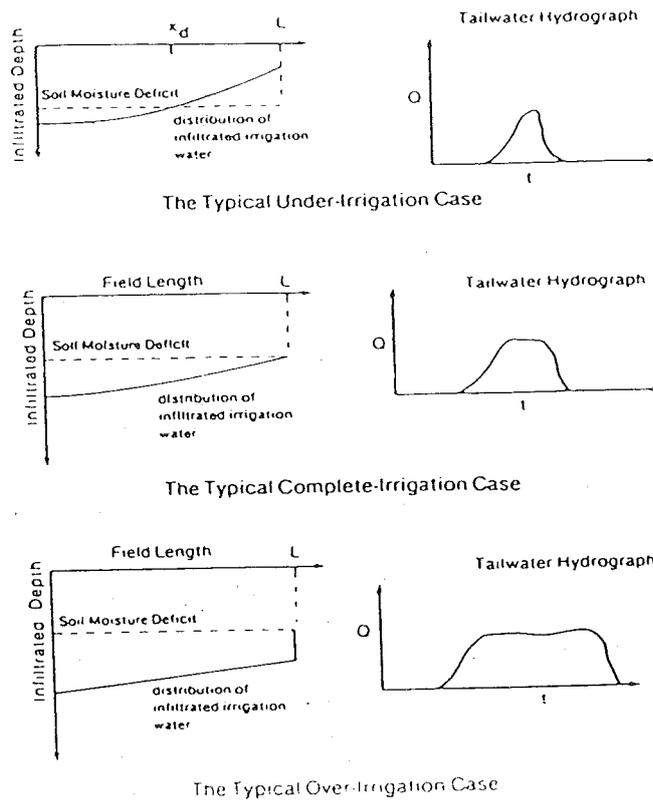


Figura 4: Tres perfiles típicos de la altura infiltrada en riego por superficie (De Walker y Skogerboe, 1987)

5.- Evaluación del riego por escurrimiento y riego de inundación.

En el riego por escurrimiento, las parcelas suelen tener forma rectangular con pendiente en sentido longitudinal. Si la parcela no tiene caballón en su parte más baja, hay que instalar un medidor de caudal para medir la escorrentía. Si existe un caballón en la parte baja, el análisis es similar al de riego por inundación.

En el riego por inundación, el agua se aplica a una parcela sin pendiente rodeada por caballones en todo su perímetro. El tamaño de las parcelas puede variar entre muy amplios límites (de pocos m^2 a varias Has.) y el módulo de riego debe ser suficientemente grande para cubrir la superficie de la parcela en un tiempo relativamente pequeño.

Este tipo de riego se ha utilizado durante muchos siglos en los antiguos regadíos y actualmente sigue utilizándose con altas eficiencias de aplicación cuando están bien diseñados y las parcelas correctamente niveladas.

El riego por estanques es un sistema fácil de riego para cultivos que no sufren con una periódica inundación. Sin embargo, para cultivos más sensibles a la inundación se pueden construir unas camas o surcos donde se realiza la plantación por encima del agua estancada.

5.1.- Información necesaria para evaluar la uniformidad y eficiencia del riego.

Para poder evaluar la idoneidad de un riego por escurrimiento o inundación, se requiere la siguiente información:

- 1.- Confeccionar el plano con dimensiones de la parcela a regar.
- 2.- Determinar los valores de humedad del suelo en el momento del riego (SMD) y el MAD.
- 3.- Medir el caudal de entrada de agua a la parcela y la duración del riego. Es conveniente tener medidas continuas del caudal para obtener el hidrograma de entrada de agua. En parcelas de escurrimiento hay que obtener también el hidrograma de la esorrentía del riego.
- 4.- Medida de la altura del flujo de agua en la entrada de agua a la parcela.
- 5.- Curva de avance. El tiempo necesario para que el frente de agua cubra la totalidad de la parcela es un factor fundamental en el manejo del riego. El tiempo de avance indica en gran medida el momento del corte del riego. La trayectoria de avance no tiene una descripción matemática exacta, pero se aproxima a una ecuación potencial:

$$x = p t_x^r$$

donde:

x = Distancia de avance en m desde la entrada de agua.
 t_x = tiempo en llegar al punto x desde el inicio del riego en minutos.
 p, r = parámetros de ajuste.

Los parámetros p y r se pueden obtener a partir de los valores de los tiempos de avance a la mitad de la longitud y al final del campo ($t_{0,5L}$ y t_L) mediante las ecuaciones siguientes:

$$r = \frac{\log (0,5 L) / \log (L)}{\log (t_L) / \log (t_{0,5L})} = \frac{\log 2}{\log (t_L/t_{0,5L})}$$

$$p = \frac{L}{t_L}$$

En parcelas que se aproximan a un cuadrado o con entrada de agua en esquinas el avance se puede determinar mediante el establecimiento de estacas en una cuadrícula y determinación de la posición del frente de agua en distintos tiempos. La Figura 5 presenta un ejemplo de las isólinas de avance a distintos tiempos de una parcela cuadrada de riego por inundación.

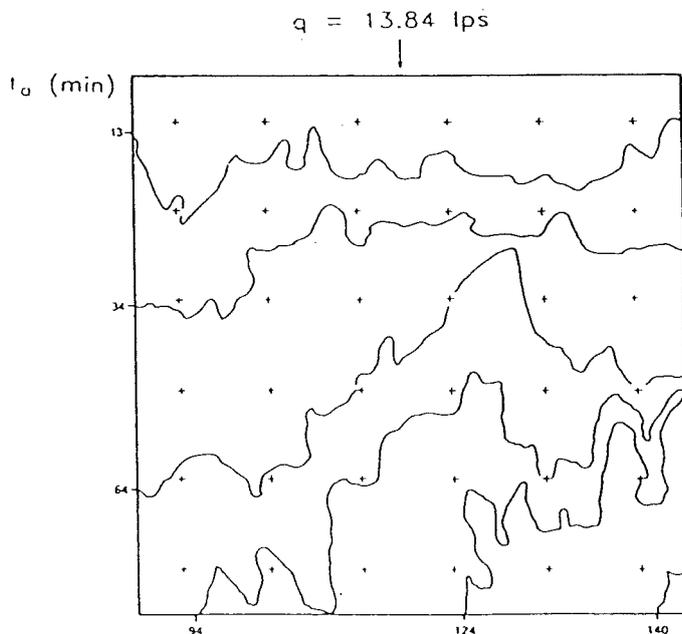


Figura 5: Líneas de avance en la evaluación de una parcela de inundación de 36,6 m x 36,6 m (De Kundu y Skogerboe, 1980).

La Figura 6 presenta la relación entre el tiempo de avance y la superficie mojada por el frente de agua en el mismo ejemplo de la Figura 5.

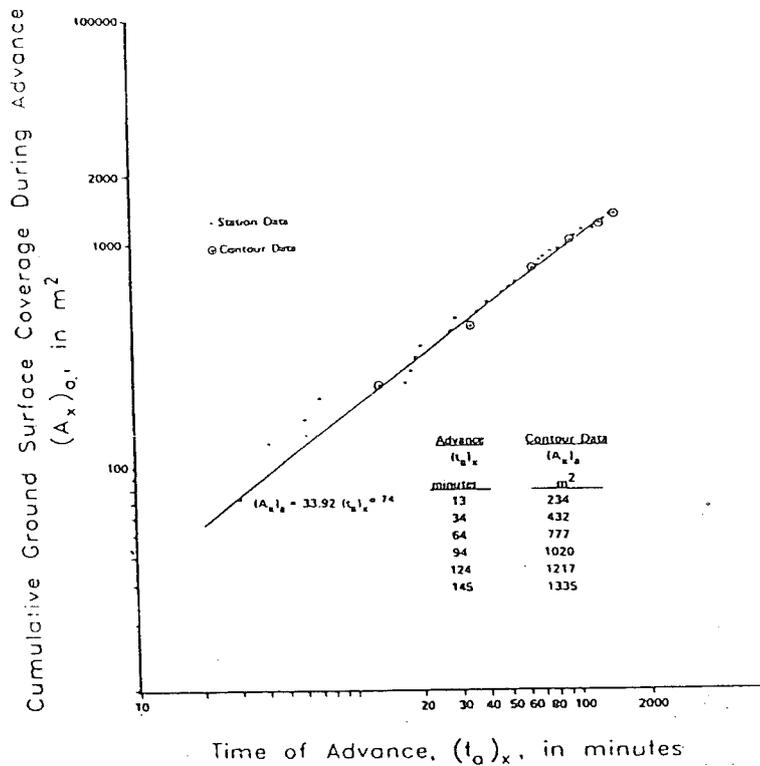


Figura 6: Relación entre los tiempos de avance y la superficie de suelo cubierta por el frente de agua en papel logarítmico. Datos de una evaluación de Kundu y Skogerboe, 1980.

5.- Curva de recesión. Los datos de recesión también se podrían representar en función del tiempo. Para determinar los tiempos de oportunidad en cada punto de la parcela es necesario obtener el tiempo de recesión en cada estación o punto de la cuadrícula.

6.- Determinación de la tasa de infiltración.

7.- Cálculo de la altura de agua infiltrada en las diferentes zonas de la parcela, utilizando toda la parcela como un cilindro infiltrómetro.

5.2.- Material necesario para la evaluación del riego por gravedad.

El material necesario para la realización de una evaluación incluye lo siguiente:

- 1.- Tubo tomamuestras de suelo y recipientes para medida de la humedad del suelo antes de efectuar el riego.
- 2.- Medidor de caudal para la medida del volumen aplicado en riego.
- 3.- Estacas para establecimiento de cuadrícula o línea de estaciones.
- 4.- Un nivel de precisión para el conocimiento del estado de nivelación de la parcela.
- 5.- Cinta métrica de 25 m.
- 6.- Reloj o cronómetro para el control de tiempos. Son de gran utilidad los relojes con electrodos para la medida de los tiempos de avance y recesión.
- 7.- Cilindros infiltrómetros para la medida de la tasa de infiltración del suelo.
- 8.- Reglas para la medida de la altura de la lámina de agua.

5.3.- Procedimiento de campo en la evaluación del riego.

Se seleccionará una parcela representativa de la finca donde se realizará la evaluación.

- 1.- Dibujar un croquis de la parcela donde se va a realizar la evaluación.
- 2.- Comprobar el **SMD** en varias zonas y observar diferencias visuales en crecimiento del cultivo, textura del suelo y perfil del suelo. Compara el máximo

del SMD con el MAD para determinar si es el tiempo adecuado para el riego.

3.- Determinar el caudal de entrada a la parcela y anotar los tiempos de apertura y cierre de la tajadera.

4.- Observar el avance del frente de agua y situar su posición en el croquis de la parcela en unas 8 ocasiones durante el avance. Un frente de avance desigual indica mala nivelación de la parcela. El establecimiento de unas estacas a un marco conocido puede ayudar mucho para el estudio del avance.

5.- Observar la recesión del riego una vez cortada el agua de riego. Marcar en el croquis las zonas altas y bajas en tiempos sucesivos. Se pueden utilizar distintos rayados o colores. La diferencia entre el tiempo de recesión y tiempo de avance es el tiempo de oportunidad.

6.- Determinar la velocidad de infiltración con cilindros infiltrómetros. La curva de infiltración obtenida deberá ser ajustada con los datos del volumen total aplicado en el riego y considerando toda la parcela como un cilindro infiltrómetro.

7.- Observar la variación de la velocidad de infiltración en la parcela.

8.- Una vez que el agua ha desaparecido de la parcela, utilizar una sonda de suelo para ver la altura y uniformidad de penetración. El agua percolará hasta que se alcance la capacidad de campo.

La comprobación con la sonda de suelo unos días después del riego daría información más precisa sobre la uniformidad.

5.4.- Utilización de los datos de campo.

La comparación del SMD con el MAD nos indica si el riego fue efectuado en el tiempo correcto o demasiado tarde o demasiado pronto. El SMD indica la altura de agua que debe ser reemplazada mediante el riego y es un importante término en

el cálculo de la eficiencia, ya que representa la máxima altura de agua que puede ser almacenada en la zona radicular.

Las anotaciones de la evaluación pueden efectuarse en los impresos de las páginas 19, 20, 21 y 22.

5.5.- Altura media aplicada.

La altura media de agua aplicada se calcula:

$$\text{Altura media aplicada} = \frac{\text{Caudal (m}^3 / \text{sg)} \times \text{Duración (sg)}}{\text{Area (m}^2)}$$

5.6.- Cálculo de la uniformidad y eficiencia del riego

Una vez que se han recogido los datos de campo, el paso siguiente es la evaluación de dichos datos y la determinación de los parámetros de uniformidad y eficiencia que han sido descritos anteriormente.

Los factores determinantes de la uniformidad de distribución son el tiempo de oportunidad en los distintos puntos de la parcela y la curva de la infiltración de agua en el suelo.

En riegos por inundación con la parcela bien nivelada (nivelación laser) la recesión es prácticamente simultánea en toda la parcela. Cuando la tasa de infiltración es homogénea en toda la parcela y utilizando altos caudales de riego de forma que el avance es muy rápido, se pueden conseguir valores muy altos de la uniformidad (DU) y eficiencia del riego.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BOOHER, L.J., 1979. *"El riego superficial"*. Cuaderno FAO de Fomento Agropecuario, núm. 95., FAO, Roma.
- EIRE, J., DEDRICK, A.R., 1979. *"Level basin irrigation: A method for conserving Water and Labor"*. U.S. Department of Agriculture. Farmer's Bulletin núm. 2261.
- HAGAN, M., HAISE, R., EDMINSTER, T.W., 1967. *"Irrigation of Agricultural Lands"*. Agronomy, núm.11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, U.S.A.
- ISRAELSEN, O., HAMSEN, M.E., 1962. *"Irrigation Principles and Practices"*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- JENSEN, M.E., 1967. *"Evaluating Irrigation Efficiency"*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.93, núm. IR1, Proc.Paper 5145, pp.83-98.
- MERRIAM, L., KELLER, J., 1978. *"Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management"*. Utah State University, Logan, Utah, U.S.A.
- MERRIAM, L., SHEARER, M.N., BURT, C.M., 1980. *"Evaluating Irrigation systems and practices"*. En: "Design and Operation of Farm Irrigation Systems". Ed.: Jensen, M.E., Am.Soc.Agr.Eng., pp.721-760. Michigan, U.S.A.
- ON-FARM IRRIGATION COMMITTEE OF THE IRRIGATION AND DRAINAGE DIVISION, 1978. *"Describing Irrigation Efficiency and Uniformity"*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol.104, IR1. Proc.Paper 13602, pp.35-41.
- WALKER, W.R., 1989. *"Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems"*, FAO Irrigation and Drainage, paper núm.45, 137 pp. FAO, Roma, Italia.
- WALKER, W.R., SKOGERBOE, G.V., 1987. *"Surface Irrigation Theory and Practice"*. 386 pp., Prentice-Hall, U.S.A.
- CUENCA, R.H., 1989. *"Irrigation System Design, an Engineering Approach"*. 552 pp., Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, U.S.A.

**CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE REGADIOS (CENTER)
SAN FERNANDO DE HENARES (Madrid)**

MEDIDA DE CAUDAL EN CONDUCCIONES DE RIEGO

**José M^a. Faci González
Dr. Ingeniero Agrónomo
UNIDAD DE SUELOS Y RIEGOS
Servicio de Investigación Agraria
Apdo. 727, 50080 - ZARAGOZA**

1. IMPORTANCIA DE LA MEDIDA DEL AGUA DE RIEGO

La medida del agua de riego es un factor esencial a tener en cuenta para una eficiente utilización del agua tanto en los sistemas de distribución a los distintos regantes como en la misma explotación agraria. La importancia de la medida del agua de riego está avalada por las siguientes razones:

1. Permite el control de las cantidades de agua derivadas de un canal o de un río.

2. Permite una buena organización a las agencias distribuidoras para el suministro a los regantes a lo largo del canal o del río.

3. Permite el ajuste de los caudales y volúmenes de riego a las necesidades de los distintos cultivos.

4. Permite al agricultor mejorar el manejo del riego introduciendo las modificaciones que sean oportunas.

En general la medida del caudal en cauces abiertos es más problemática y menos precisa que en tuberías, ya que requiere la construcción de aparatos de medida, hacer lecturas de altura de agua y emplear fórmulas de cálculo del caudal. Por esta razón, la medida del caudal en cauces abiertos es muy poco frecuente en la mayoría de las zonas regables, salvo en aquellas ocasiones en que el agua es escasa y cara.

En los sistemas de riegos a presión (goteo y aspersion), los caudales que circulan por las redes de tuberías se pueden medir

directamente por medio de contadores volumétricos instalados en puntos estratégicos de la red. Asimismo los consumos de agua de riego pueden calcularse fácilmente a partir de las descargas de los goteros y aspersores y de la duración de los riegos.

En el caso de los sistemas de riego de superficie, los volúmenes de riego aplicado deberán calcularse a partir del caudal que entra en la parcela y del tiempo de aplicación. Por ello la medida del caudal es necesario para un riego eficiente, de manera que el regante conozca el caudal que circula por los puntos estratégicos de su red de riego.

Los medidores de caudal a utilizar en las acequias de riego deben ser baratos, de fácil instalación, de fácil lectura, fiables, autolimpiantes y robustos. Si es posible, la escala del medidor debe dar la lectura directamente en caudal para evitar que el agricultor deba mirar tablas o hacer cálculos. Normalmente en las acequias hay poca energía disponible y por tanto los medidores de caudal a instalar deben ser muy eficientes hidráulicamente. En casos en que haya fuertes desniveles será más fácil la instalación de medidores tales como vertederos en caída libre.

Existe una gran variedad de medidores de caudal que pueden utilizarse. La selección del medidor debe realizarse teniendo en cuenta las características de la acequia y las propiedades y limitaciones de los distintos tipos de medidores.

Los métodos de medida de caudal se pueden agrupar en tres

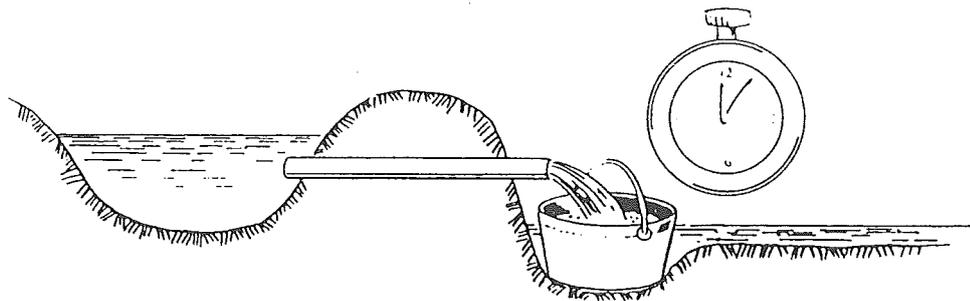
categorías:

- métodos directos
- métodos de medida de velocidad y área
- métodos que emplean constricciones

2. MÉTODOS DIRECTOS

Están basados en la medida directa de volúmenes y tiempos.

El método más sencillo de medida de caudal es la medida del tiempo necesario de llenado de un recipiente de volumen conocido (Figura 1). Este método se puede utilizar para la medida de pequeños caudales.



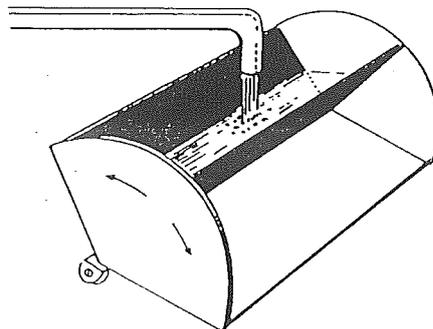
Collecting a known volume of water in a measured interval of time is a useful method of determining flow rate of small streams such as irrigation furrows.

Figura 1. Medida directa del caudal con reloj y recipiente de volumen conocido.

Otra medida directa del caudal desde o hacia un depósito o embalse se puede calcular fácilmente mediante la medida del cambio de nivel en el mismo en un tiempo determinado. Para usar

este método es necesario conocer las dimensiones del depósito o embalse.

La utilización de un depósito de dos compartimentos de volumen conocido con un mecanismo de conteo del número de compartimentos llenados en un período de tiempo determinado es otro método directo de medida del caudal que puede utilizarse cuando el agua cae desde cierta altura (Figura 2). Cuando el agua llena un compartimento, el tanque bascula, vaciándose un compartimento y empezando a llenarse el otro. Este mecanismo es utilizado en algunos pluviógrafos.



Two-way tilt bucket may be used where water drops from some height to permit tilting.

Figura 2. Depósito de dos compartimentos de volumen conocido con sistema de balance.

En las redes de tuberías es frecuente la medida directa del caudal con contadores volumétricos. Estos contadores están provistos de unas hélices o discos en una sección de área conocida y suelen tener un totalizador de volumen y/o medida del caudal instantáneo (Figura 3).

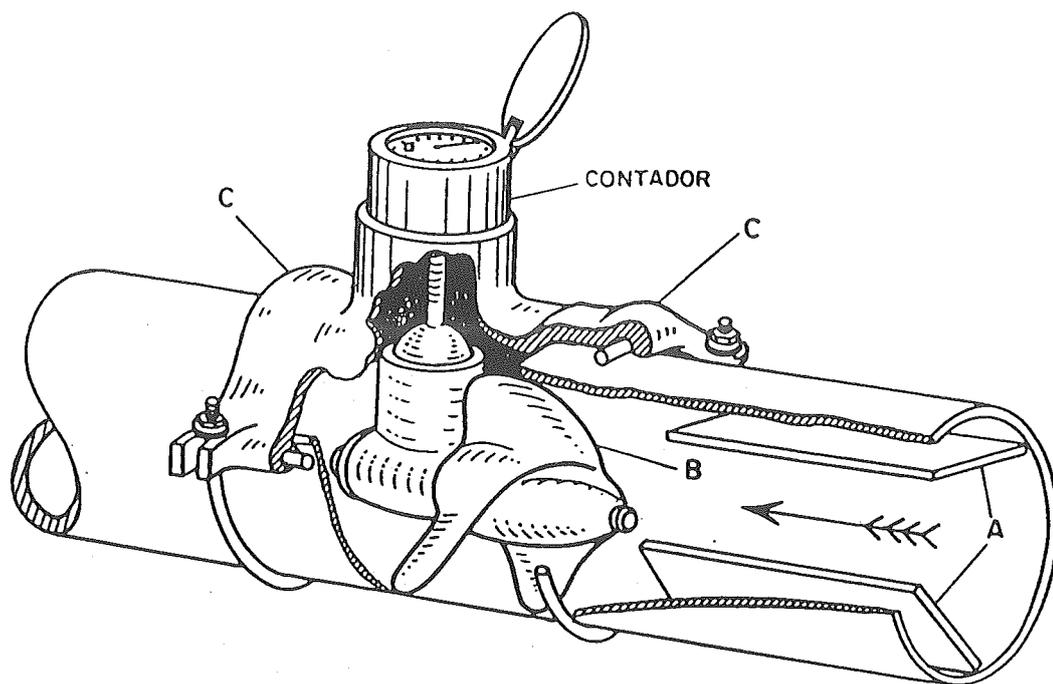


Fig. 74

Figura 3. Contador volumétrico y de caudal instantáneo.

3. MÉTODOS DE MEDIDA DE VELOCIDAD

Mediante estos métodos, el caudal que pasa por una acequia es calculado multiplicando la velocidad media por la sección transversal al flujo de agua. Hay que tener precaución en la determinación de la velocidad media, ya que debido a la presencia de una superficie libre de agua y a la fricción con las paredes, las velocidades en el canal no están uniformemente distribuidas en la sección (Figura 4).

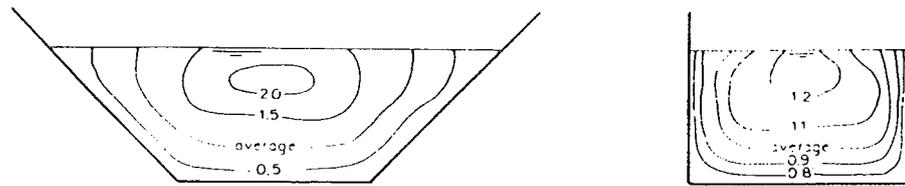


Figura 4. Ejemplos de distribución de velocidades en dos secciones de canales.

3.1. Método del flotador

Es un método simple que consiste en medir el tiempo que un flotador colocado en el centro de la corriente tarda en recorrer una distancia recta de la acequia (de 15 a 30 m) (Figura 5). Se pueden realizar varias pruebas para obtener el tiempo medio. La velocidad se calcula dividiendo la distancia por el tiempo que el flotador tarda en recorrerla. Debido a que la velocidad del flotador en la superficie es mayor que la velocidad media, es necesario corregirla multiplicándola por el coeficiente 0,8.

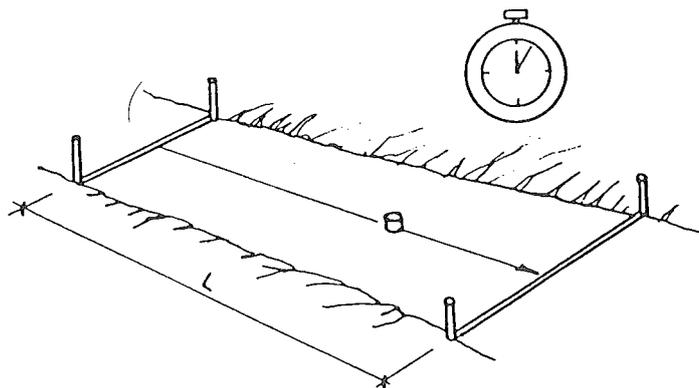


Figura 5. Esquema para medida de la velocidad en una acequia con flotador.

El caudal se obtiene multiplicando la velocidad media por la sección mojada de la acequia.

Como flotadores se pueden utilizar los siguientes objetos: limón, naranja, un pedazo de madera, una botella parcialmente llena de agua, etc.

3.2. Método del molinete

El molinete es un instrumento que tiene una hélice o rueda de cazoletas, que gira al introducirla en una corriente de agua. Los molinetes pueden ir montados en soportes o suspendidos de cables. Antes de ser usados en el campo deben ser calibrados por el fabricante para determinar la relación entre la velocidad de rotación de la hélice o rueda y la velocidad del agua.

La sección elegida para la medida con el molinete debe estar situada en un tramo recto y de una sección lo más homogénea posible a lo largo de dicho tramo.

Según el grado de precisión que se quiera obtener en el aforo se tomarán mayor o menor número de puntos de medida en la sección. Cuando se pretende obtener una precisión alta se elegirán mayor número de verticales en la sección y se calculará la velocidad media en cada vertical. Para cada sección entre dos verticales de medida, el área es calculada como el producto del promedio de alturas y anchura, y la velocidad media como el promedio de las velocidades medias en las verticales y el caudal como el producto del área y velocidad media. El caudal total se calcula como la suma de caudales entre verticales.

Una manera más rápida pero menos precisa para estimar la

velocidad media es medir con el molinete en el centro de la acequia a 0,2 y 0,8 de la profundidad y la media de las velocidades a estas profundidades es aproximadamente la velocidad media en la sección. Si sólo se utiliza un punto de medida, una estimación más grosera de la velocidad media es la velocidad a 0,6 de la profundidad bajo la superficie del agua. La Figura 6 presenta los croquis de molinetes de hélice y de cazoletas.

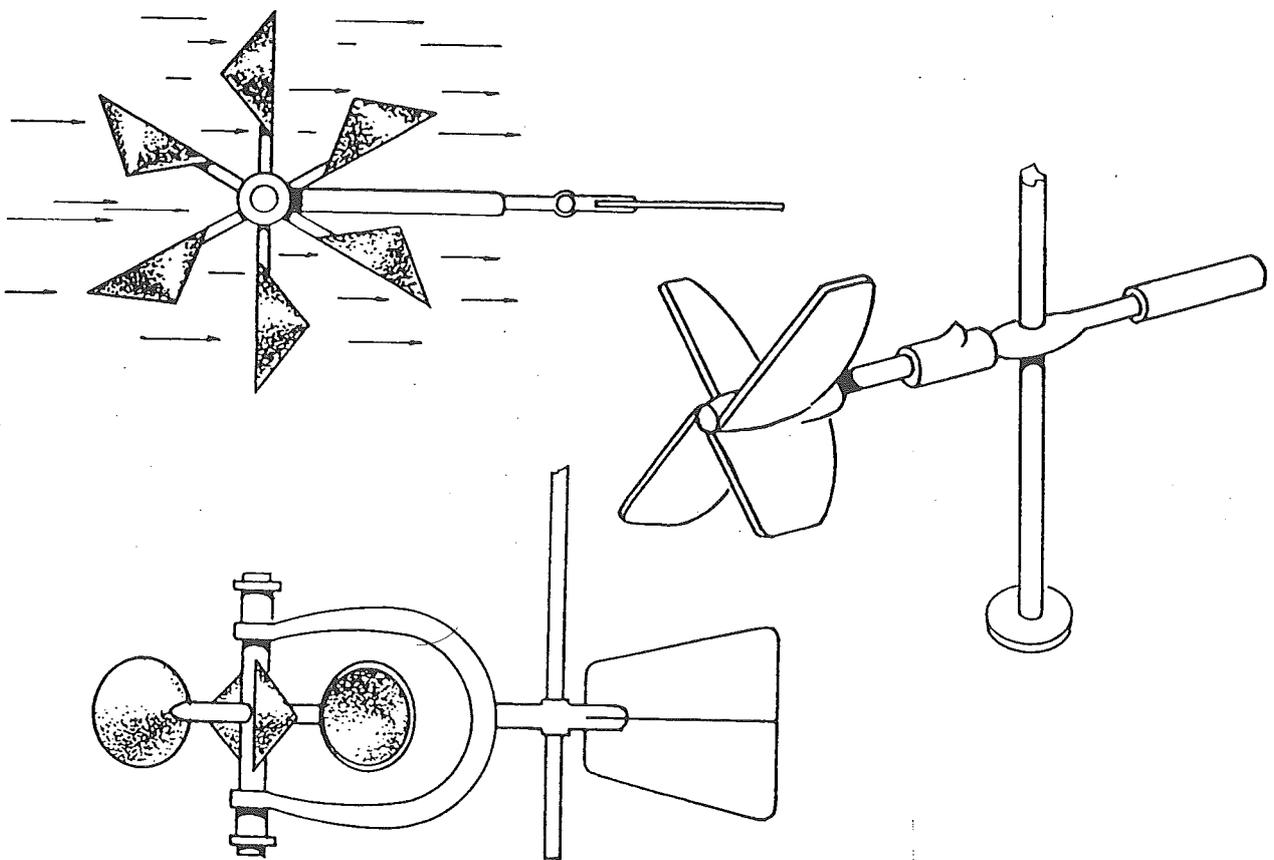


Figura 6. Molinetes de hélice y de cazoletas.

3.3. Método de trazadores

Colorantes o sales son inyectados en un punto de la

flotadores. La velocidad es calculada a partir del tiempo que el trazador tarda en recorrer una distancia conocida. Se debe determinar el tiempo que la primera y última porción del trazador tarda en llegar a la sección de detección, y se utilizará la media de esos tiempos para el cálculo de la velocidad media.

Los colorantes más utilizados son fluorescencia^{ina} y permanganato potásico. El empleo de sales requiere de un instrumento para su detección.

El caudal se calcula multiplicando la velocidad media por la sección. En este caso no hay que utilizar un coeficiente corrector para el cálculo de la velocidad media.

El método de los trazadores también se utiliza para determinar la velocidad en tuberías.

3.4. Método de la trayectoria

Este método determina el caudal que sale por una tubería colocada horizontalmente mediante la realización de dos medidas en el chorro de salida del agua (distancias X e Y de la Figura 7) y la sección interior de la tubería. Existe cierta dificultad en la medida exacta de la distancia Y debido a la curvatura del chorro de agua. Por ello es necesario efectuar esta medida con una regla especial como la que aparece en la Figura 7.

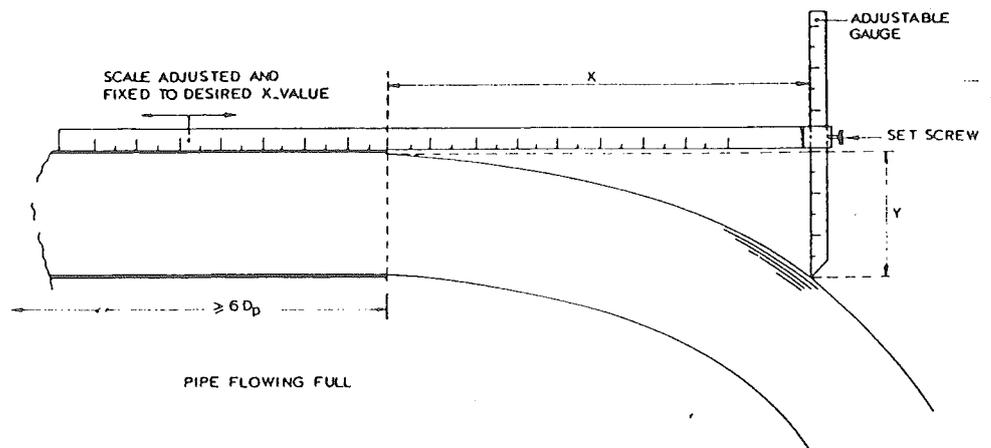


Figura 7. Esquema de la trayectoria de salida del agua en una tubería horizontal. Las medidas X e Y son necesarias para la aplicación del método de la trayectoria.

La Figura 8 muestra los gráficos para la obtención de la descarga de tuberías de 2 a 6 pulgadas de diámetro interior según los valores de X e Y.

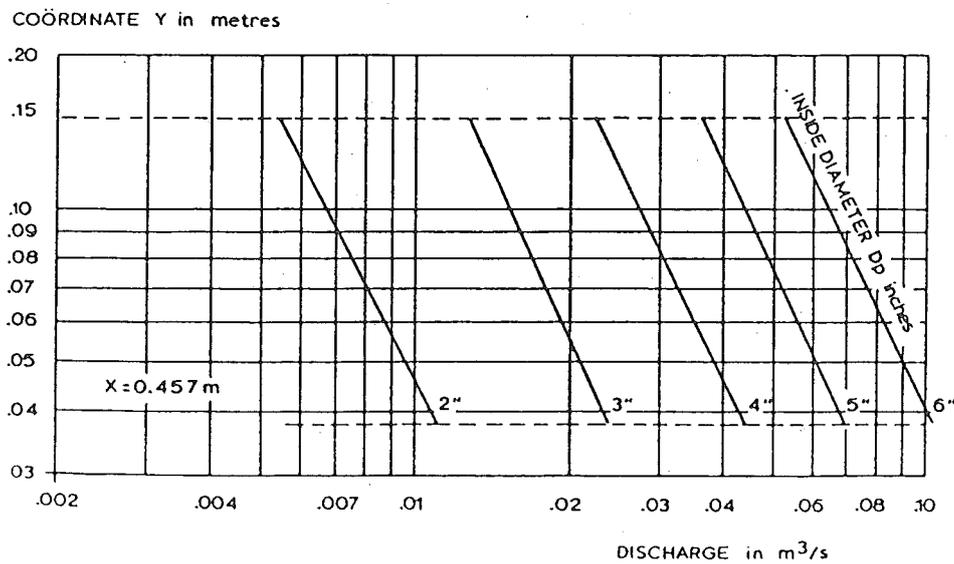
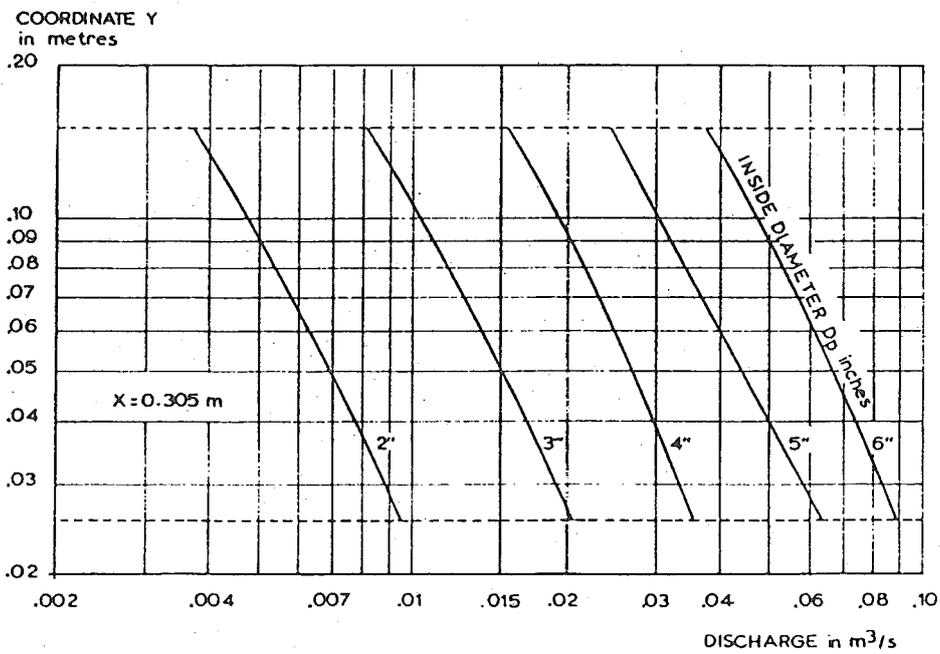
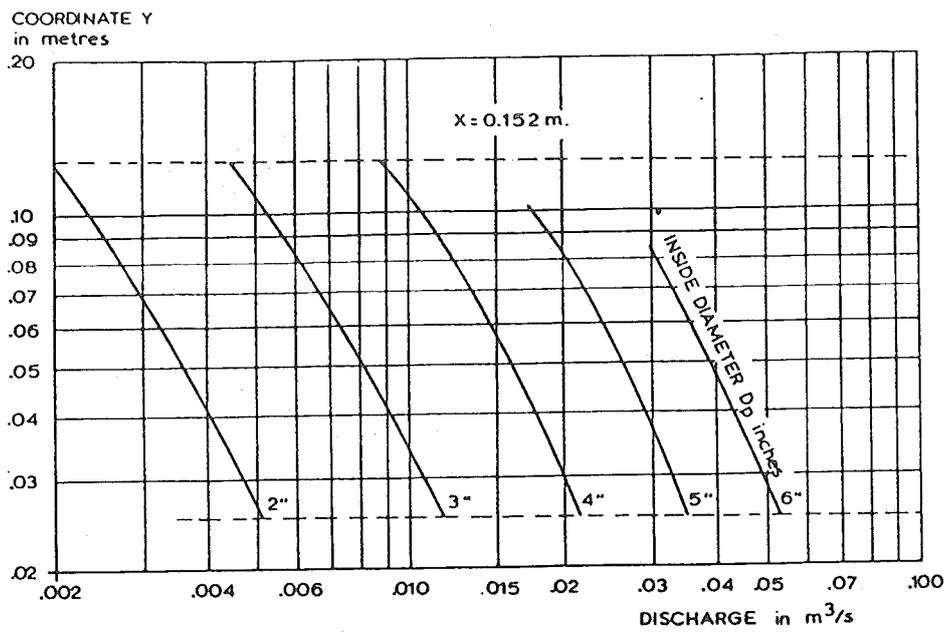


Figura 8. Descarga de tuberías horizontales por el método de la trayectoria.

4. MÉTODOS QUE EMPLEAN CONSTRICCIONES

Estos métodos son los más usados en la medida del agua de riego. En general sólo se requieren una o dos simples medidas para la determinación del caudal.

Son muchos los medidores que se pueden incluir en este grupo, tales como orificios, vertederos de cresta ancha, vertederos de cresta corta, vertederos afilados, medidores Parshall y sifones.

Los regímenes de flujo más significativos que se producen en las constricciones de los cauces abiertos son flujo libre y flujo sumergido. En la proximidad de la constricción se alcanza una "*velocidad crítica*" y entonces el caudal está relacionado únicamente con la altura de agua medida aguas arriba de la constricción.

Cuando las condiciones de flujo son tales que la altura del flujo aguas abajo de la construcción aumenta haciendo que la velocidad del flujo del agua disminuya por debajo de la velocidad crítica, la constricción funciona entonces en condiciones de submergencia. En este caso, la medida del caudal requiere la medida de las alturas de nivel aguas arriba y aguas abajo de la constricción.

La submergencia se define como la relación entre la altura aguas abajo y la altura aguas arriba.

Normalmente las constricciones se diseñan para funcionar en flujo libre.

Para una medida correcta del caudal en una constricción se deben conocer las condiciones de submergencia en su funcionamiento. El valor de la submergencia que delimita el cambio de flujo libre a flujo sumergido es la submergencia de transición.

La Figura 8 presenta los perfiles del agua en una constricción en condiciones de flujo libre, flujo en transición y flujo sumergido.

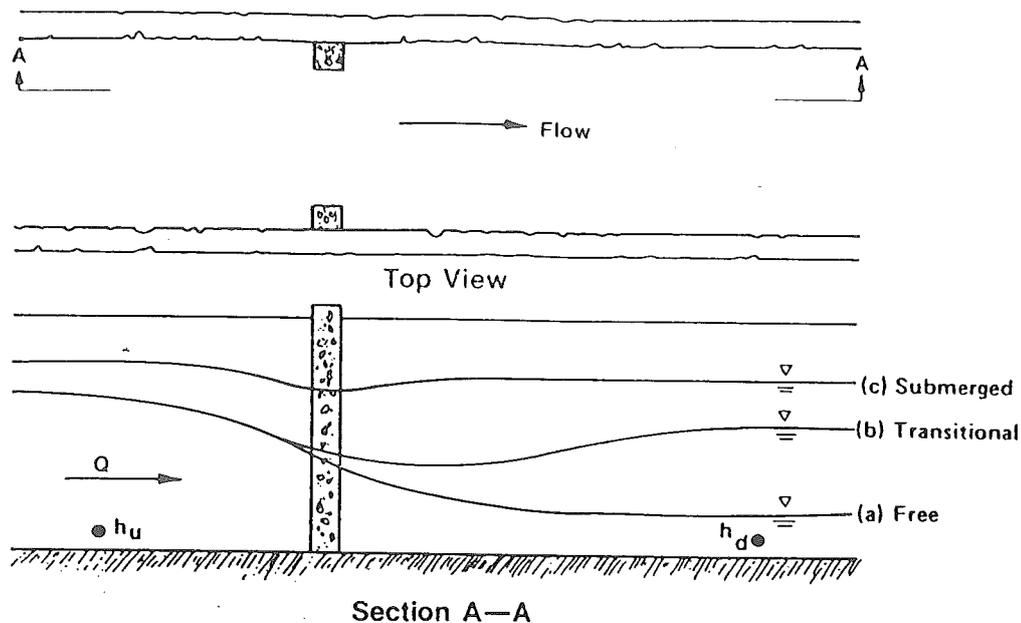


Figura 8. Condiciones de flujo en una constricción en un canal.

En estos apuntes se van a describir los tipos más frecuentes de vertederos afilados, los medidores Parshall, el medidor de garganta cortada y un tipo especial de vertedero de cresta ancha desarrollado por el *Water Conservation Laboratory de Phoenix, Arizona, U.S.A.*

4.1. Vertederos afilados

El vertedero afilado es una pared con una escotadura de dimensiones determinadas en la parte superior colocada transversalmente en la acequia, de manera que toda la corriente es obligada a pasar por dicha escotadura.

La lámina que forme la escotadura del vertedero debe ser plana y de un espesor igual o menor de 2 mm.

El fondo de la escotadura se denomina cresta.

La diferencia de elevación entre la cresta y la superficie del agua en un punto situado aguas arriba del vertedero a una distancia determinada se denomina

altura de vertido.

El depósito de agua que se forma aguas arriba del vertedero se denomina remanso de vertedero.

Cuando el ancho y profundidad de la acequia son lo suficientemente grandes respecto a la escotadura, de manera que la velocidad de aproximación es muy pequeña, en ese caso el vertedero es de contracción completa.

Cuando la superficie del agua, aguas abajo del vertedero, está por debajo de la crestade forma que se produce una cámara de aire debajo de la lámina que vierte, entonces el flujo es libre; si ocurre lo contrario, entonces el flujo es sumergido.

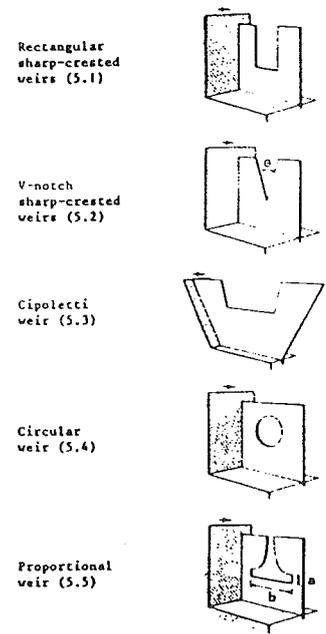


Figura 9. Varios tipos de vertederos afilados.

Los vertederos deben funcionar con caída libre y la cámara de aire debe estar lo suficientemente aireada para que no se produzcan subpresiones que originarían un aumento de la curvatura de la lámina de vertido y un aumento de la descarga del vertedero.

Los tipos de escotadura que se emplean normalmente son los siguientes:

- rectangular
- triangular de ángulo de 20 a 100°
- trapezoidal (Cipoletti)

4.1.1. Vertederos afilados rectangulares

El vertedero rectangular puede ser:

1) Vertedero de contracción completa, lo cual ocurre cuando el fondo y paredes de la acequia están lo suficientemente lejos de la cresta y lados de la escotadura para no influir en la contracción de la lámina de vertido.

2) Vertedero de anchura máxima, cuya anchura de cresta coincide con la anchura de la acequia.

3) Vertedero parcialmente contraído, que ocurre cuando la contracción no está desarrollada totalmente debido a la influencia de paredes y fondo del canal.

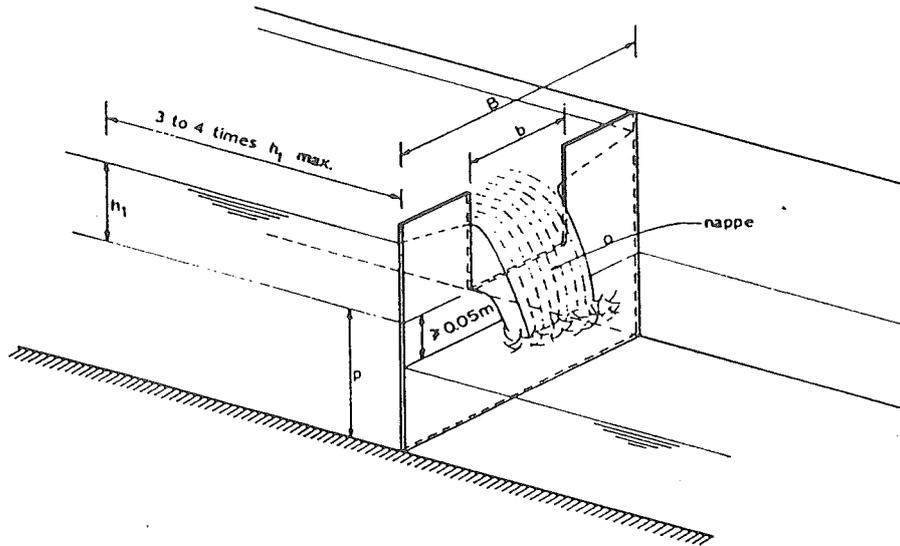


Figura 10. Vertedero rectangular afilado.

La ecuación que descarga para los vertederos afilados rectangulares es $Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_1^{1.5}$, donde C_e es un coeficiente de descarga función de b/B y h_1/p en el Cuadro 1, g es la aceleración de la gravedad, b es la anchura de la cresta y h_1 es la altura de agua.

Cuadro 1. Valores de C_e en función de b/B y h_1/p en vertederos afilados rectangulares de Bos, 1978.

TABLE 5.2. VALUES FOR C_e AS A FUNCTION OF THE RATIOS b/B AND h_1/p
(FROM GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY)

b/B	C_e
1.0	$0.602 + 0.075 h_1/p$
0.9	$0.599 + 0.064 h_1/p$
0.8	$0.597 + 0.045 h_1/p$
0.7	$0.595 + 0.030 h_1/p$
0.6	$0.593 + 0.018 h_1/p$
0.5	$0.592 + 0.011 h_1/p$
0.4	$0.591 + 0.0058 h_1/p$
0.3	$0.590 + 0.0020 h_1/p$
0.2	$0.589 - 0.0018 h_1/p$
0.1	$0.588 - 0.0021 h_1/p$
0	$0.587 - 0.0023 h_1/p$

Los límites de aplicación son los siguientes:

- 1) El límite inferior recomendado de h es de 0.03 m.
- 2) El límite superior recomendado de h_1/p es de 2.0 y p debe ser por lo menos de 0.10 m.
- 3) La anchura de la cresta debe ser mayor de 0.15 m.
- 4) Para facilitar la aireación el nivel aguas abajo del vertedero debe ser como mínimo de 0.05 m por debajo de la cresta.

4.1.2. Vertederos afilados triangulares

La plancha con una escotadura en forma de V se coloca perpendicularmente a las paredes y fondo de la acequia, de forma que la línea que divide el ángulo por la mitad sea vertical y se encuentre en el centro de la sección del canal.

El vertedero triangular, debido a su forma, es fácil de construir y es muy preciso para un amplio rango de caudales.

Puede funcionar como un vertedero parcialmente contraído o con contracción total.

La ecuación de descarga es:

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} h_1^{2.5}, \text{ donde}$$

$$C_e = \text{coeficiente de descarga} \quad C_e = f \left[\frac{h_1}{p}, \frac{p}{B}, \theta \right]$$

θ = ángulo de los lados del vertedero

h_1 = altura de agua en el vertedero

Los límites de aplicación son los siguientes:

- 1) La relación h_1/p debe ser igual o menor de 1.2
- 2) La relación h_1/B debe ser igual o menor de 0.4
- 3) La altura de agua sobre el vértice debe estar comprendida entre 0.05 m y 0.60 m
- 4) La altura del vértice sobre el fondo del canal debe ser mayor de 0.10 m
- 5) La anchura del canal de aproximación debe ser mayor de 0.6 m
- 6) El nivel aguas abajo del vertedero debe estar por lo menos a 0.05 m por debajo de la cresta.

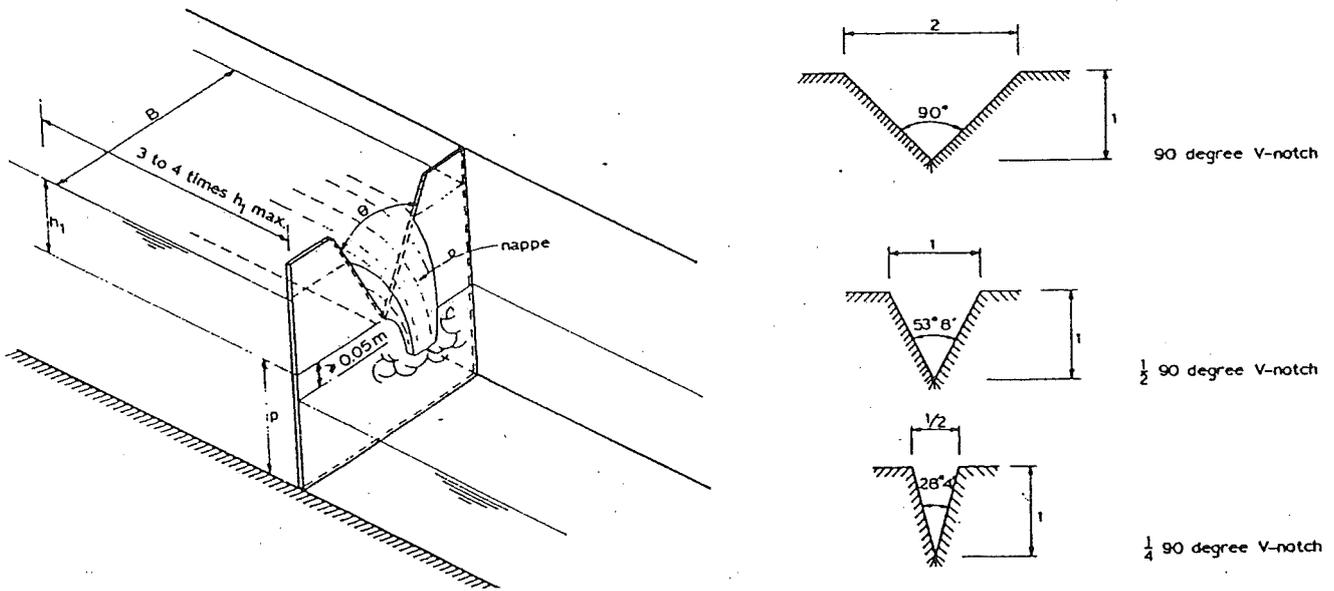


Figura 11. Esquema de un vertedero triangular afilado. Secciones del vertedero triangular de 90° ($\theta = 90^\circ$), $\frac{1}{2}$ 90° ($\theta = 53^\circ 8'$) y $\frac{1}{4}$ 90° ($\theta = 28^\circ 4'$).

El Cuadro 2 presenta la descarga de los vertederos triangulares de 90° , $53^\circ 8'$ y $28^\circ 4'$ para distintas alturas.

Cuadro 2. Descarga del vertedero afilado triangular de 90° 1/2 90° y 1/4 90°, según la altura de agua.

HEAD metre	DISCHARGE l/sec														
	90°	1/2 90°	1/4 90°		90°	1/2 90°	1/4 90°		90°	1/2 90°	1/4 90°		90°	1/2 90°	1/4 90°
0.050	0.803	0.406	0.215	0.100	4.420	2.249	1.161	0.150	12.066	6.130	3.140	0.200	24.719	12.506	6.379
0.051	0.843	0.427	0.225	0.101	4.530	2.305	1.190	0.151	12.267	6.231	3.192	0.201	25.028	12.662	6.458
0.052	0.884	0.448	0.236	0.102	4.641	2.362	1.219	0.152	12.471	6.334	3.245	0.202	25.339	12.819	6.537
0.053	0.926	0.469	0.247	0.103	4.754	2.420	1.249	0.153	12.676	6.437	3.297	0.203	25.652	12.977	6.617
0.054	0.970	0.491	0.259	0.104	4.869	2.478	1.278	0.154	12.883	6.542	3.350	0.204	25.969	13.136	6.698
0.055	1.015	0.514	0.271	0.105	4.985	2.537	1.309	0.155	13.093	6.648	3.404	0.205	26.288	13.296	6.780
0.056	1.061	0.537	0.283	0.106	5.103	2.598	1.339	0.156	13.304	6.755	3.458	0.206	26.610	13.457	6.862
0.057	1.108	0.561	0.295	0.107	5.222	2.659	1.371	0.157	13.517	6.863	3.513	0.207	26.934	13.620	6.944
0.058	1.156	0.586	0.308	0.108	5.344	2.720	1.402	0.158	13.732	6.971	3.568	0.208	27.261	13.784	7.028
0.059	1.206	0.611	0.321	0.109	5.467	2.783	1.434	0.159	13.950	7.081	3.624	0.209	27.590	13.949	7.111
0.060	1.257	0.637	0.334	0.110	5.592	2.847	1.466	0.160	14.169	7.192	3.680	0.210	27.921	14.115	7.196
0.061	1.309	0.663	0.348	0.111	5.719	2.911	1.499	0.161	14.391	7.304	3.737	0.211	28.254	14.282	7.281
0.062	1.362	0.691	0.362	0.112	5.847	2.976	1.533	0.162	14.614	7.417	3.794	0.212	28.588	14.450	7.366
0.063	1.417	0.718	0.376	0.113	5.977	3.042	1.566	0.163	14.840	7.531	3.852	0.213	28.924	14.620	7.453
0.064	1.473	0.747	0.391	0.114	6.108	3.109	1.601	0.164	15.067	7.646	3.911	0.214	29.264	14.794	7.539
0.065	1.530	0.776	0.406	0.115	6.242	3.177	1.635	0.165	15.297	7.762	3.969	0.215	29.607	14.964	7.627
0.066	1.588	0.806	0.421	0.116	6.377	3.246	1.670	0.166	15.529	7.879	4.029	0.216	29.953	15.138	7.715
0.067	1.648	0.836	0.437	0.117	6.514	3.315	1.706	0.167	15.763	7.998	4.089	0.217	30.301	15.313	7.803
0.068	1.710	0.867	0.453	0.118	6.653	3.386	1.742	0.168	15.999	8.117	4.149	0.218	30.651	15.489	7.893
0.069	1.772	0.899	0.470	0.119	6.793	3.457	1.778	0.169	16.237	8.237	4.210	0.219	31.004	15.666	7.982
0.070	1.836	0.932	0.486	0.120	6.935	3.529	1.815	0.170	16.477	8.358	4.272	0.220	31.359	15.844	8.073
0.071	1.901	0.965	0.503	0.121	7.079	3.602	1.853	0.171	16.719	8.481	4.334	0.221	31.717	16.024	8.164
0.072	1.967	0.999	0.521	0.122	7.224	3.677	1.891	0.172	16.964	8.604	4.397	0.222	32.077	16.204	8.255
0.073	2.035	1.033	0.539	0.123	7.372	3.751	1.929	0.173	17.210	8.728	4.460	0.223	32.439	16.386	8.347
0.074	2.105	1.069	0.557	0.124	7.522	3.827	1.968	0.174	17.459	8.854	4.524	0.224	32.803	16.570	8.441
0.075	2.176	1.105	0.575	0.125	7.673	3.904	2.007	0.175	17.709	8.980	4.588	0.225	33.168	16.754	8.535
0.076	2.248	1.141	0.594	0.126	7.827	3.982	2.046	0.176	17.963	9.108	4.653	0.226	33.535	16.940	8.629
0.077	2.322	1.179	0.613	0.127	7.982	4.060	2.086	0.177	18.219	9.237	4.718	0.227	33.907	17.127	8.724
0.078	2.397	1.217	0.633	0.128	8.139	4.140	2.127	0.178	18.478	9.367	4.784	0.228	34.282	17.315	8.819
0.079	2.473	1.256	0.653	0.129	8.298	4.220	2.168	0.179	18.738	9.497	4.851	0.229	34.659	17.504	8.915
0.080	2.551	1.296	0.673	0.130	8.458	4.302	2.209	0.180	19.001	9.629	4.918	0.230	35.039	17.695	9.011
0.081	2.630	1.336	0.694	0.131	8.621	4.384	2.251	0.181	19.265	9.762	4.986	0.231	35.421	17.886	9.108
0.082	2.710	1.377	0.715	0.132	8.785	4.467	2.294	0.182	19.531	9.896	5.054	0.232	35.806	18.079	9.207
0.083	2.792	1.419	0.737	0.133	8.951	4.551	2.337	0.183	19.800	10.032	5.122	0.233	36.193	18.274	9.306
0.084	2.876	1.462	0.759	0.134	9.119	4.636	2.380	0.184	20.071	10.168	5.192	0.234	36.582	18.469	9.405
0.085	2.961	1.505	0.781	0.135	9.289	4.722	2.424	0.185	20.345	10.305	5.261	0.235	36.974	18.666	9.504
0.086	3.048	1.549	0.803	0.136	9.461	4.809	2.468	0.186	20.621	10.444	5.332	0.236	37.369	18.864	9.605
0.087	3.136	1.594	0.826	0.137	9.634	4.897	2.513	0.187	20.899	10.584	5.403	0.237	37.766	19.063	9.706
0.088	3.225	1.640	0.850	0.138	9.810	4.986	2.559	0.188	21.180	10.726	5.475	0.238	38.166	19.263	9.808
0.089	3.316	1.686	0.874	0.139	9.987	5.075	2.604	0.189	21.463	10.867	5.547	0.239	38.568	19.465	9.910
0.090	3.409	1.734	0.898	0.140	10.167	5.166	2.651	0.190	21.748	11.010	5.620	0.240	38.973	19.668	10.013
0.091	3.503	1.782	0.922	0.141	10.348	5.258	2.697	0.191	22.034	11.155	5.693	0.241	39.380	19.872	10.116
0.092	3.598	1.830	0.947	0.142	10.532	5.351	2.744	0.192	22.322	11.300	5.766	0.242	39.790	20.079	10.220
0.093	3.696	1.880	0.973	0.143	10.717	5.444	2.792	0.193	22.612	11.447	5.841	0.243	40.202	20.287	10.325
0.094	3.795	1.930	0.998	0.144	10.904	5.539	2.840	0.194	22.906	11.595	5.916	0.244	40.617	20.496	10.430
0.095	3.895	1.981	1.025	0.145	11.093	5.635	2.889	0.195	23.203	11.743	5.992	0.245	41.034	20.705	10.536
0.096	3.997	2.033	1.051	0.146	11.284	5.732	2.938	0.196	23.501	11.893	6.068	0.246	41.454	20.916	10.642
0.097	4.101	2.086	1.078	0.147	11.476	5.830	2.988	0.197	23.802	12.044	6.145	0.247	41.877	21.127	10.750
0.098	4.206	2.139	1.106	0.148	11.671	5.929	3.038	0.198	24.106	12.197	6.222	0.248	42.302	21.340	10.858
0.099	4.312	2.194	1.133	0.149	11.867	6.029	3.089	0.199	24.411	12.351	6.300	0.249	42.730	21.555	10.967

Cuadro 2 (Continuación)

HEAD metre	DISCHARGE l/sec			HEAD metre	DISCHARGE l/sec			HEAD metre	DISCHARGE l/sec		
	90°	↓ 90°	↑ 90°		90°	↓ 90°	↑ 90°		90°	↓ 90°	↑ 90°
0.250	43.160	21.772	11.077	0.300	68.106	34.268	17.410	0.350	100.19	50.313	25.512
0.251	43.593	21.990	11.187	0.301	68.675	34.552	17.555	0.351	100.91	50.672	25.693
0.252	44.028	22.209	11.299	0.302	69.246	34.837	17.700	0.352	101.63	51.031	25.875
0.253	44.466	22.429	11.410	0.303	69.821	35.124	17.845	0.353	102.36	51.397	26.057
0.254	44.907	22.649	11.523	0.304	70.398	35.412	17.992	0.354	103.08	51.758	26.240
0.255	45.350	22.873	11.635	0.305	70.980	35.702	18.139	0.355	103.81	52.121	26.424
0.256	45.796	23.098	11.749	0.306	71.568	35.995	18.287	0.356	104.54	52.487	26.609
0.257	46.245	23.323	11.863	0.307	72.159	36.290	18.435	0.357	105.28	52.856	26.794
0.258	46.696	23.549	11.978	0.308	72.750	36.585	18.585	0.358	106.02	53.227	26.981
0.259	47.150	23.777	12.094	0.309	73.341	36.880	18.735	0.359	106.77	53.596	27.168
0.260	47.606	24.005	12.210	0.310	73.936	37.177	18.885	0.360	107.52	53.967	27.355
0.261	48.065	24.235	12.326	0.311	74.534	37.477	19.037	0.361	108.27	54.340	27.544
0.262	48.527	24.466	12.443	0.312	75.135	37.779	19.189	0.362	109.02	54.717	27.733
0.263	48.991	24.699	12.561	0.313	75.738	38.081	19.342	0.363	109.78	55.096	27.923
0.264	49.458	24.933	12.680	0.314	76.344	38.384	19.495	0.364	110.54	55.473	28.114
0.265	49.928	25.168	12.799	0.315	76.954	38.687	19.650	0.365	111.30	55.852	28.306
0.266	50.400	25.404	12.920	0.316	77.566	38.995	19.805	0.366	112.06	56.231	28.498
0.267	50.876	25.642	13.041	0.317	78.181	39.304	19.960	0.367	112.84	56.616	28.691
0.268	51.353	25.881	13.162	0.318	78.802	39.615	20.117	0.368	113.62	57.003	28.885
0.269	51.834	26.121	13.284	0.319	79.428	39.927	20.274	0.369	114.39	57.391	29.080
0.270	52.317	26.363	13.407	0.320	80.057	40.241	20.432	0.370	115.17	57.780	29.275
0.271	52.802	26.606	13.529	0.321	80.685	40.553	20.590	0.371	115.95	58.171	29.472
0.272	53.291	26.851	13.653	0.322	81.314	40.867	20.750	0.372	116.73	58.560	29.669
0.273	53.782	27.098	13.778	0.323	81.947	41.184	20.910	0.373	117.52	58.950	29.867
0.274	54.276	27.347	13.903	0.324	82.583	41.503	21.071	0.374	118.31	59.345	30.065
0.275	54.772	27.596	14.030	0.325	83.222	41.824	21.232	0.375	119.11	59.742	30.264
0.276	55.272	27.845	14.157	0.326	83.863	42.147	21.395	0.376	119.91	60.141	30.465
0.277	55.774	28.097	14.284	0.327	84.508	42.471	21.558	0.377	120.71	60.542	30.666
0.278	56.282	28.351	14.413	0.328	85.155	42.796	21.721	0.378	121.52	60.944	30.867
0.279	56.794	28.607	14.542	0.329	85.806	43.123	21.886	0.379	122.32	61.346	31.070
0.280	57.306	28.863	14.671	0.330	86.459	43.451	22.051	0.380	123.13	61.747	31.273
0.281	57.819	29.119	14.802	0.331	87.116	43.779	22.217	0.381	123.94	62.150	31.477
0.282	58.335	29.377	14.933	0.332	87.775	44.107	22.384				
0.283	58.853	29.638	15.065	0.333	88.438	44.438	22.551				
0.284	59.375	29.901	15.197	0.334	89.103	44.773	22.719				
0.285	59.899	30.163	15.330	0.335	89.772	45.108	22.888				
0.286	60.425	30.427	15.464	0.336	90.448	45.446	23.058				
0.287	60.955	30.691	15.598	0.337	91.128	45.785	23.228				
0.288	61.487	30.959	15.734	0.338	91.811	46.125	23.400				
0.289	62.023	31.229	15.870	0.339	92.499	46.467	23.572				
0.290	62.560	31.499	16.006	0.340	93.175	46.810	23.744				
0.291	63.101	31.769	16.143	0.341	93.862	47.153	23.910				
0.292	63.645	32.040	16.281	0.342	94.551	47.497	24.092				
0.293	64.195	32.315	16.420	0.343	95.244	47.842	24.267				
0.294	64.748	32.591	16.559	0.344	95.940	48.191	24.442				
0.295	65.303	32.869	16.699	0.345	96.638	48.542	24.619				
0.296	65.858	33.146	16.840	0.346	97.340	48.895	24.796				
0.297	66.416	33.424	16.982	0.347	98.045	49.249	24.974				
0.298	66.976	33.704	17.124	0.348	98.753	49.604	25.152				
0.299	67.539	33.985	17.267	0.349	99.471	49.958	25.332				

90° - v + θ = 90°
 ↓ 90° - v + θ = 53°8'
 ↑ 90° - v + θ = 28°4'

See Fig. 6.11.

Note: The number of significant figures given for the discharge does not imply a corresponding accuracy in the knowledge of the values given.

4.1.3. Vertedero Cipoletti

Es un vertedero afilado con una escotadura trapezoidal con la cresta en posición horizontal y los lados con una inclinación hacia afuera de 1 unidad en horizontal por 4 en vertical.

Los límites de aplicación del vertedero Cipoletti totalmente contraído son los siguientes:

- 1) La altura de la cresta por encima del canal debe ser por lo menos el doble que la altura de agua por encima de la cresta y con un mínimo de 0,30 m.
- 2) La distancia de los lados de la sección de la escotadura a los lados del canal debe ser por lo menos el doble que la altura de agua por encima de la cresta y con un mínimo de 0,30 m.
- 3) La altura de agua sobre la cresta debe estar comprendida entre 0,06 m y 0,60 m.
- 4) La relación h_1/b debe ser igual o menor de 0,5.
- 5) El nivel aguas abajo del vertedero debe estar por lo menos a 0,05 m por debajo de la cresta.

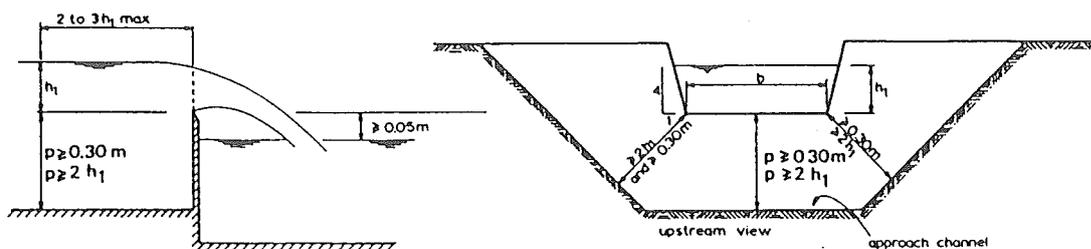


Figura 12. Vista lateral y frontal de un vertedero Cipoletti.

Este tipo de vertederos desarrollados por Cipoletti en 1886 no tiene una exactitud tan alta como la alcanzada con los vertederos afilados de tipo rectangular o triangular.

El Cuadro 3 presenta la descarga del vertedero Cipoletti en $m^3/s/m$ asumiendo que la velocidad de aproximación del agua al vertedero es despreciable.

Cuadro 3. Descarga del vertedero Cipoletti por unidad de anchura de cresta en $m^3/s/m$.

TABLE 5.5. DISCHARGE OF THE STANDARD CIPOLETTI WEIR
IN $m^3/sec/m$

Head metre	Discharge $m^3/sec/m^1$	Head metre	Discharge $m^3/sec/m^1$
0.06	0.0273	0.36	0.402
0.07	0.0344	0.37	0.418
0.08	0.0421	0.38	0.435
0.09	0.0502	0.39	0.453
0.10	0.0588	0.40	0.470
0.11	0.0678	0.41	0.488
0.12	0.0773	0.42	0.506
0.13	0.0871	0.43	0.524
0.14	0.0974	0.44	0.543
0.15	0.108	0.45	0.561
0.16	0.119	0.46	0.580
0.17	0.130	0.47	0.599
0.18	0.142	0.48	0.618
0.19	0.154	0.49	0.638
0.20	0.166	0.50	0.657
0.21	0.179	0.51	0.677
0.22	0.192	0.52	0.697
0.23	0.205	0.53	0.717
0.24	0.219	0.54	0.738
0.25	0.232	0.55	0.758
0.26	0.247	0.56	0.779
0.27	0.261	0.57	0.800
0.28	0.275	0.58	0.821
0.29	0.290	0.59	0.843
0.30	0.306	0.60	0.864
0.31	0.321		
0.32	0.337		
0.33	0.352		
0.34	0.369		
0.35	0.385		

NOTE: The approach velocity has been neglected ($C_v = 1.00$)

4.2. Medidores Parshall

Los medidores Parshall son unos instrumentos calibrados para la medida del caudal en cauces abiertos. El medidor consiste en una sección convergente con el fondo a nivel, una sección garganta con el fondo con pendiente descendente y una sección divergente con el fondo con pendiente ascendente (Figura 13).

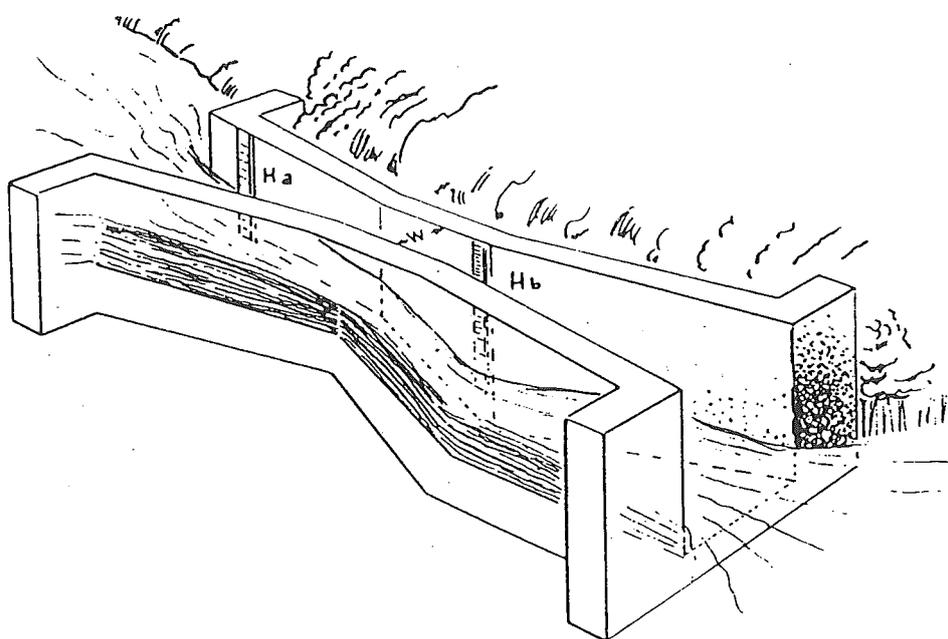


Figura 13. Esquema de un medidor Parshall.

La sección control del medidor está situada cerca del final de la sección convergente. Los medidores Parshall están calibrados para una altura piezométrica (h_a), medida en un lugar definido de la sección convergente. La altura piezométrica de aguas abajo (h_b) se mide en la sección garganta.

Los medidores Parshall son construídos de muy diversos tamaños y se clasifican según sea la anchura en la sección de

garganta. El Parshall más pequeño tiene una anchura de garganta de 1 pulgada (25,4 mm) y el más grande de 50 pies (15.250 mm).

La Figura 14 presenta la planta y vista lateral de un medidor Parshall y el Cuadro 4 presenta las dimensiones de los distintos tipos de medidores Parshall correspondientes a la Figura 14.

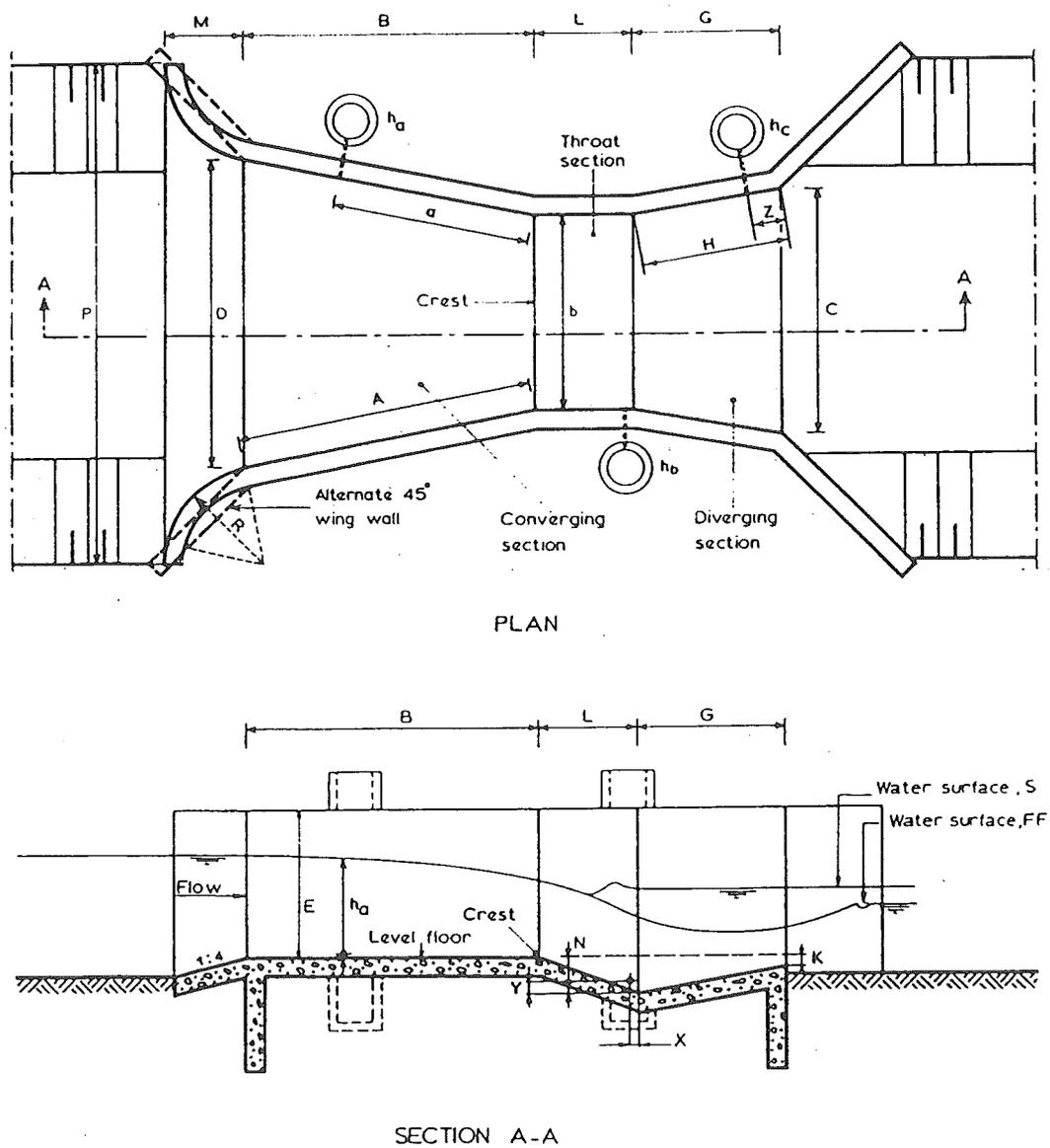


Figura 14. Planta y sección de un aforador Parshall.

Cuadro 4. Dimensiones de los medidores Parshall en mm correspondientes a los símbolos acotados de la Figura 14.

TABLE 7.3. PARSHALL FLUME DIMENSIONS (MILLIMETRES)

Dimensions as shown in Fig.7.9																		
	b	A	a	B	C	D	E	L	G	H	K	H	H	P	R	X	Y	Z
1"	25.4	363	242	356	93	167	229	76	203	206	19	-	29	-	-	8	13	3
2"	50.8	414	276	406	135	214	254	114	254	257	22	-	43	-	-	16	25	6
3"	76.2	467	311	457	178	259	457	152	305	309	25	-	57	-	-	25	38	13
6"	152.4	621	414	610	394	397	610	305	610	-	76	305	114	902	406	51	76	-
9"	228.6	879	587	864	381	575	762	305	457	-	76	305	114	1080	406	51	76	-
1'	304.8	1372	914	1363	610	845	914	610	914	-	76	381	229	1492	508	51	76	-
1'6"	457.2	1448	965	1419	762	1026	914	610	914	-	76	381	229	1676	508	51	76	-
2'	609.6	1524	1016	1495	914	1206	914	610	914	-	76	381	229	1854	508	51	76	-
3'	914.4	1676	1118	1645	1219	1572	914	610	914	-	76	381	229	2222	508	51	76	-
4'	1219.2	1829	1219	1794	1524	1937	914	610	914	-	76	457	229	2711	610	51	76	-
5'	1524.0	1981	1321	1943	1829	2302	914	610	914	-	76	457	229	3080	610	51	76	-
6'	1828.8	2134	1422	2092	2134	2667	914	610	914	-	76	457	229	3442	610	51	76	-
7'	2133.6	2286	1524	2242	2438	3032	914	610	914	-	76	457	229	3810	610	51	76	-
8'	2438.4	2438	1626	2391	2743	3397	914	610	914	-	76	457	229	4172	610	51	76	-
10'	3048	-	1829	4267	3658	4756	1219	914	1829	-	152	-	343	-	-	305	229	-
12'	3658	-	2032	4877	4470	5607	1524	914	2438	-	152	-	343	-	-	305	229	-
15'	4572	-	2337	7620	5588	7620	1829	1219	3048	-	229	-	457	-	-	305	229	-
20'	6096	-	2845	7620	7315	9144	2134	1829	3658	-	305	-	686	-	-	305	229	-
25'	7620	-	3353	7620	8941	10668	2134	1829	3962	-	305	-	686	-	-	305	229	-
30'	9144	-	3861	7925	10566	12313	2134	1829	4267	-	305	-	686	-	-	305	229	-
40'	12192	-	4877	8230	13818	15481	2134	1829	4877	-	305	-	686	-	-	305	229	-
50'	15240	-	5893	8230	17272	18529	2134	1829	6096	-	305	-	686	-	-	305	229	-

La construcción de estos medidores debe hacerse con mucha precaución para que todas las caras del medidor queden en su posición exacta y así se podrán utilizar las tablas de calibración existentes para estos medidores.

Si el medidor no va a funcionar por encima de una submergencia de 0.6, entonces no hay necesidad de construir la porción divergente. Este medidor Parshall truncado, que resulta de quitar la sección divergente, sigue teniendo las mismas características de descarga que el medidor ordinario.

La ecuación de descarga es de la forma $Q = K h_a^u$, donde:

K = coeficiente que depende de la anchura de la garganta

U = coeficiente que varía entre 1.522 y 1.60

h_a = altura piezométrica en la sección de control A

El Cuadro 5 presenta las ecuaciones de descarga para los distintos tipos de medidores Parshall existentes.

Cuando la relación de submergencia (h_b/h_a) excede el valor de 0,60 en medidores de 3, 6 y 9 pulgadas, de 0,70 en medidores de 1 hasta 8 pies y de 0,80 en medidores de 10 a 50 pies, entonces la descarga del medidor es reducida debido a la submergencia. Bajo estas condiciones, las ecuaciones de descarga de los vertederos del Cuadro 5 no son válidas y deben ser reducidas en la variación de la descarga debido a la submergencia (Q_E). El caudal corregido (Q_S) será:

$Q_S = Q - Q_E$ / Q_E = reducción de descarga debido a submergencia

La Figura 15 presenta las gráficas para estimar el valor de Q_E de acuerdo con el porcentaje de submergencia en los distintos medidores Parshall existentes.

Los límites de aplicación de los medidores Parshall son los siguientes:

- 1) Los medidores Parshall deben ser construidos exactamente con las dimensiones indicadas en el Cuadro 4.
- 2) Los medidores deben ser colocados a nivel
- 3) La relación de submergencia no debe sobrepasar el 95 %.

Cuadro 5. Características de la descarga de los medidores Parshall.

TABLE 7.4. DISCHARGE CHARACTERISTICS OF PARSHALL FLUMES

Throat width b in feet or inches	Discharge range in $m^3/s \times 10^{-3}$		Equation $Q = K h_a^u$ (Q in m^3/s)	Head range in metres		Modular limit h_b/h_a
	minimum	maximum		minimum	maximum	
1"	0.09	5.4	$0.0604 h_a^{1.55}$	0.015	0.21	0.50
2"	0.18	13.2	$0.1207 h_a^{1.55}$	0.015	0.24	0.50
3"	0.77	32.1	$0.1771 h_a^{1.55}$	0.03	0.33	0.50
6"	1.50	111	$0.3812 h_a^{1.58}$	0.03	0.45	0.60
9"	2.50	251	$0.5354 h_a^{1.53}$	0.03	0.61	0.60
1'	3.32	457	$0.6909 h_a^{1.522}$	0.03	0.76	0.70
1'6"	4.80	695	$1.056 h_a^{1.538}$	0.03	0.76	0.70
2'	12.1	937	$1.428 h_a^{1.550}$	0.046	0.76	0.70
3'	17.6	1427	$2.184 h_a^{1.566}$	0.046	0.76	0.70
4'	35.8	1923	$2.953 h_a^{1.578}$	0.06	0.76	0.70
5'	44.1	2424	$3.732 h_a^{1.587}$	0.06	0.76	0.70
6'	74.1	2929	$4.519 h_a^{1.595}$	0.076	0.76	0.70
7'	85.8	3438	$5.312 h_a^{1.601}$	0.076	0.76	0.70
8'	97.2	3949	$6.112 h_a^{1.607}$	0.076	0.76	0.70
		in m^3/s				
10'	0.16	8.28	$7.463 h_a^{1.60}$	0.09	1.07	0.80
12'	0.19	14.68	$8.859 h_a^{1.60}$	0.09	1.37	0.80
15'	0.23	25.04	$10.96 h_a^{1.60}$	0.09	1.67	0.80
20'	0.31	37.97	$14.45 h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
25'	0.38	47.14	$17.94 h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
30'	0.46	56.33	$21.44 h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
40'	0.60	74.70	$28.43 h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
50'	0.75	93.04	$35.41 h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80

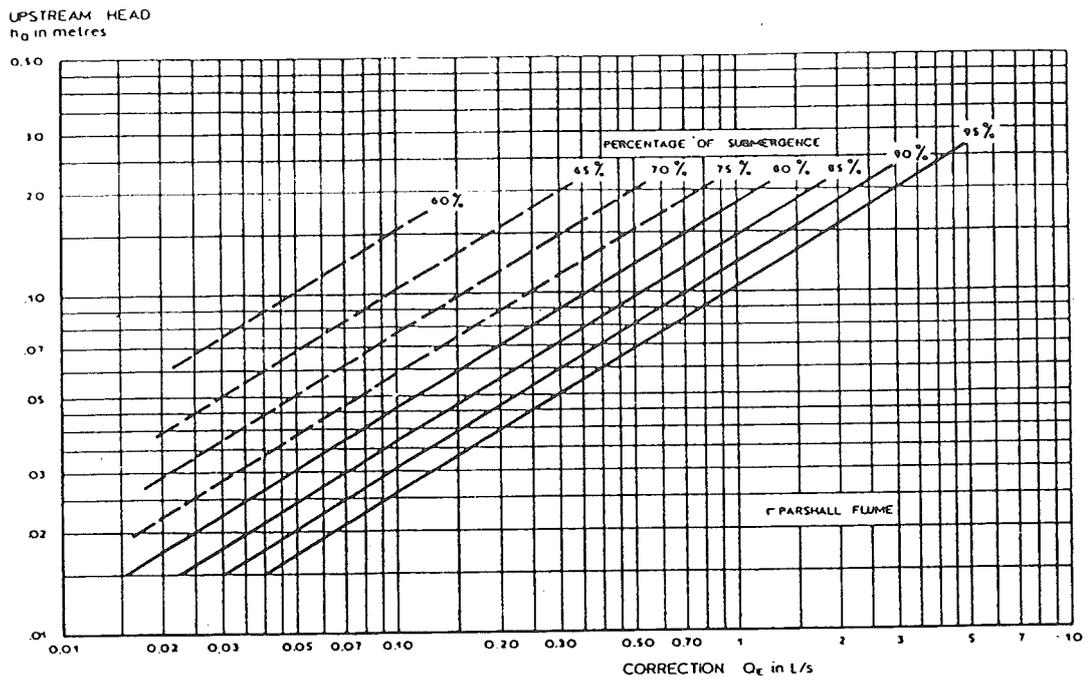


Fig.7.10. Discharge correction for submerged flow. 1" Parshall flume.

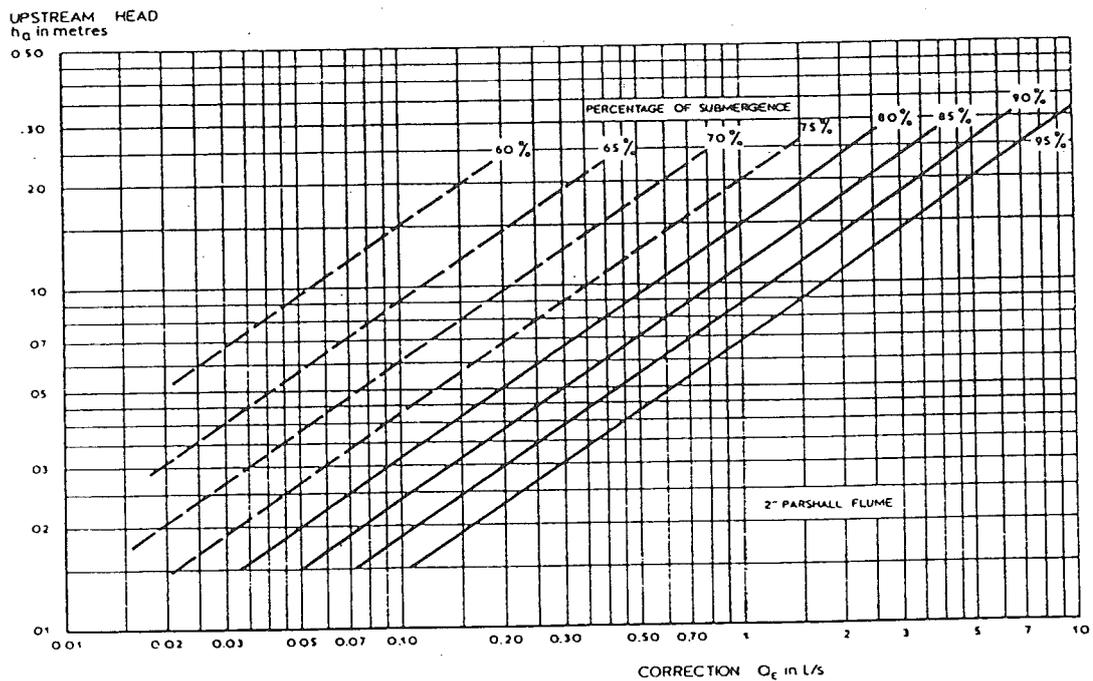


Fig.7.11. Discharge correction for submerged flow. 2" Parshall flume.

Figura 15. Gráficas de cálculo de la corrección de la descarga (Q_E) de los medidores Parshall de 1 y 2 pulgadas para flujo sumergido.

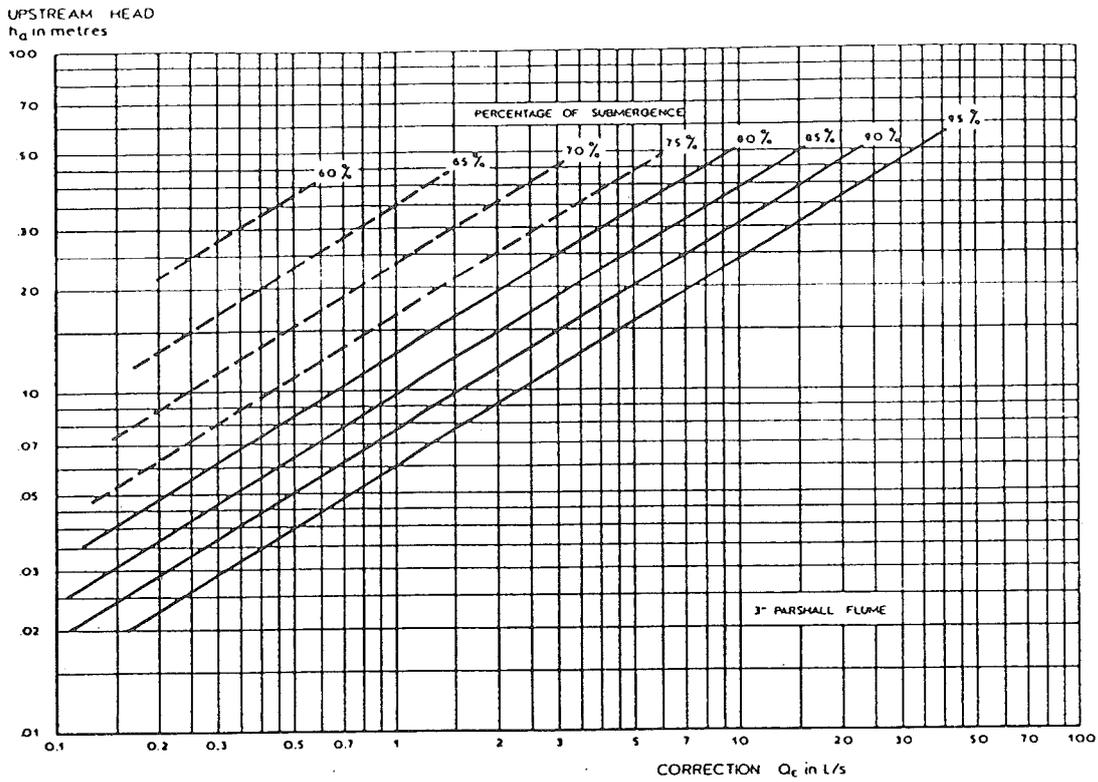


Fig.7.12. Discharge correction for submerged flow. 3" Parshall flume.

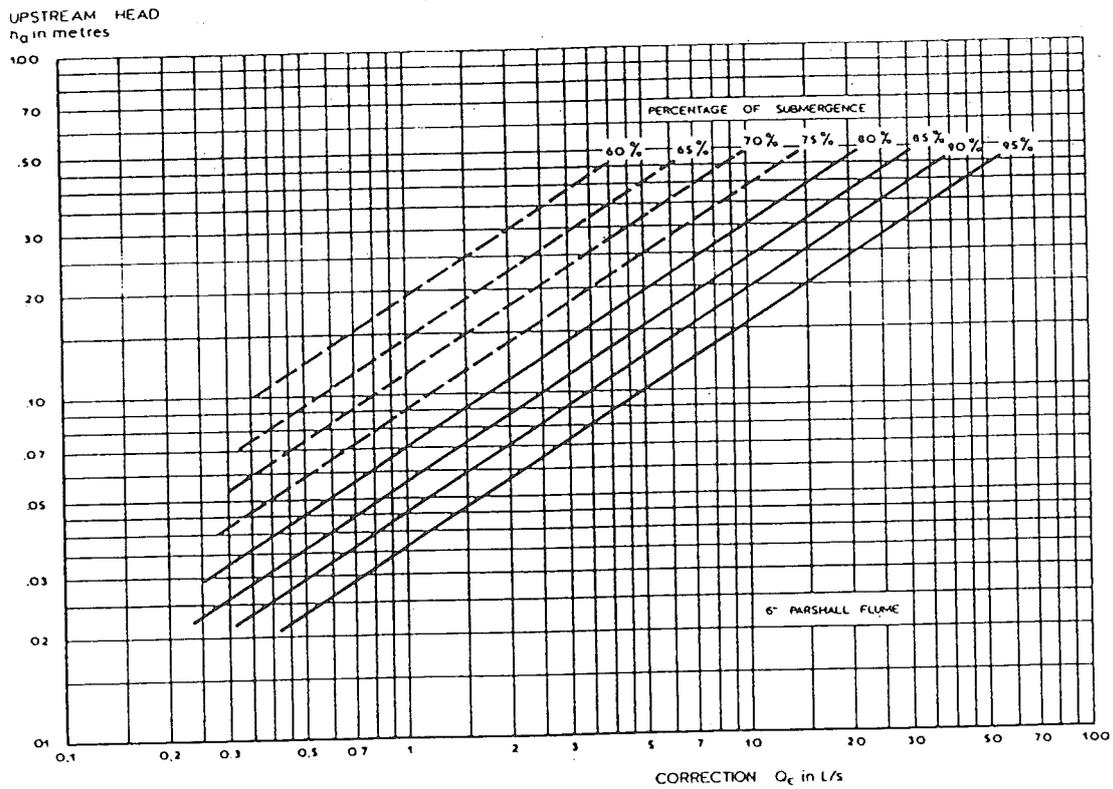


Fig.7.13. Discharge correction for submerged flow. 6" Parshall flume.

Figura 15 (Continuación). Corrección de la descarga (Q_E) de los medidores Parshall de 3 y 6 pulgadas para flujo sumergido.

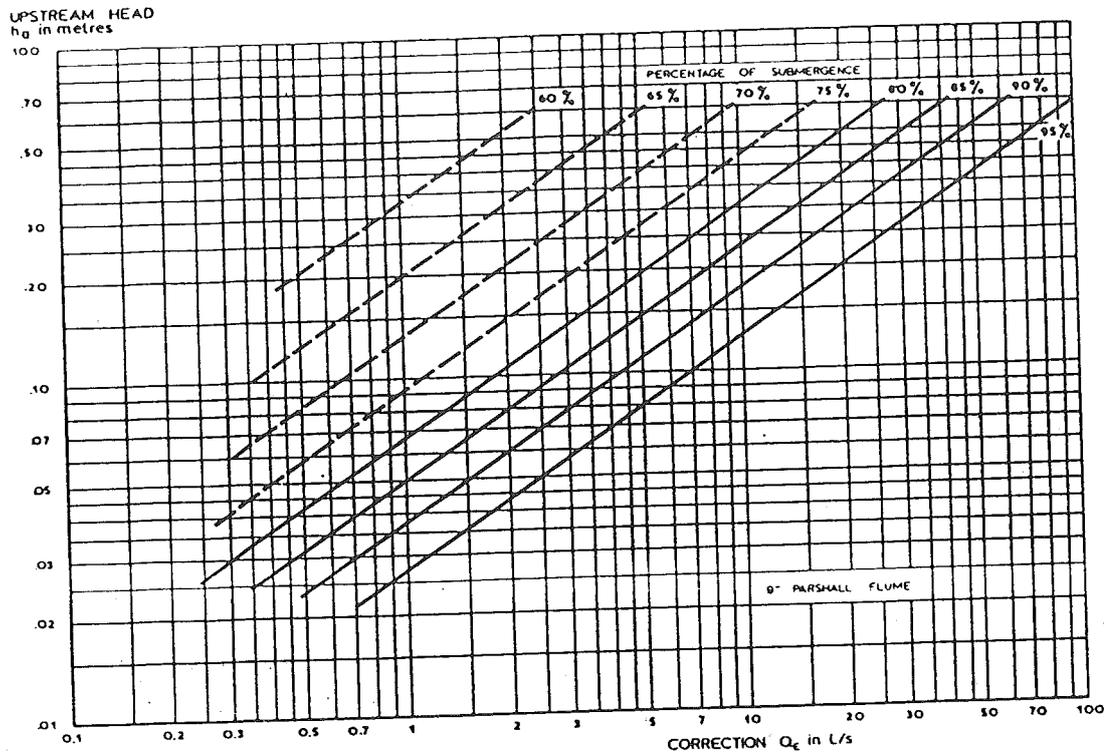


Fig.7.14. Discharge correction for submerged flow. 9" Parshall flume.

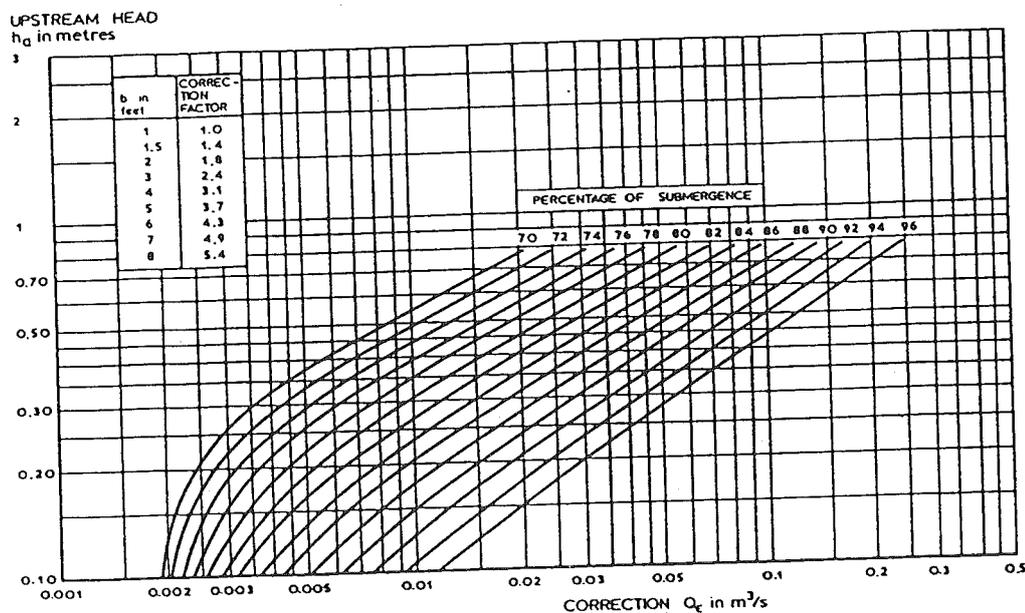


Fig.7.15. Discharge correction for submerged flow. 1' Parshall flume, correction Q_c (m^3/s).

Figura 15 (Continuación). Corrección de la descarga (Q_F) de los medidores Parshall de 9 pulgadas y de 1 pie para flujo sumergido.

4.3. MEDIDORES DE GARGANTA CORTADA

Este tipo de medidor de caudal fue desarrollado por Skorgeboe et al. (1967) en Utah, EE.UU. Este medidor puede funcionar satisfactoriamente bajo condiciones de flujo libre y flujo sumergido.

Las características más importantes de este medidor son su fondo plano y la ausencia de una sección de garganta, ya que la constricción del medidor está formada por la intersección de la sección convergente y la sección divergente del medidor.

Las ventajas más importantes respecto al medidor Parshall son: 1) fiabilidad de construcción; 2) se puede instalar dentro de acequias revestidas de hormigón y 3) se puede colocar al mismo nivel que el fondo de la acequia.

La Figura 16 presenta la planta y las dimensiones del medidor en función de la anchura de la constricción (W) y de la longitud del medidor (L).

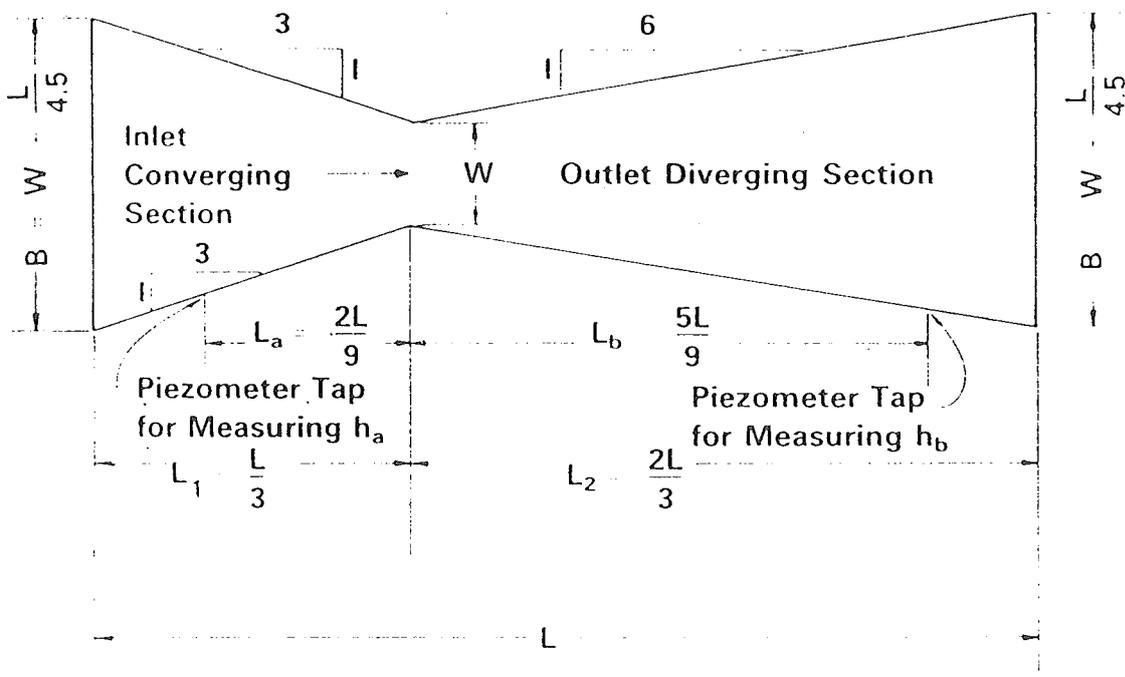


Figura 16. Esquema de la forma y dimensiones de un medidor de garganta cortada.

La ecuación de descarga en condiciones de flujo libre es la siguiente:

$$Q_f = 0'028321 K_f W^{1'025} h_a^{n_f}$$

donde:

Q_f = Caudal en flujo libre en m³/s.

K_f = Coeficiente de longitud del medidor para flujo libre en pies (Figura 16).

W = Anchura de la garganta en pies.

h_a = Altura piezométrica en la sección de control A del medidor en pies (Figura 16).

n_f = Exponente de la ecuación de descarga del medidor en flujo libre (Figura 16).

Para medidas precisas de este medidor se recomienda que la relación h_a/L sea igual o menor de 0'33.

Para flujo sumergido la ecuación de descarga toma la forma siguiente:

$$Q_s = \frac{0'028321 K_s W^{1'025} (h_a - h_b)^{n_f}}{(-\log S)^{n_s}}$$

donde:

Q_s = Caudal en flujo sumergido en m³/s.

K_s = Coeficiente de longitud del medidor para flujo sumergido en pies (Figura 17)

W = Anchura de la garganta en pies.

h_a = Altura piezométrica en la sección de control A del medidor en pies situada a una distancia L_a aguas arriba de la constricción (Figura 16)

h_b = Altura piezométrica en la sección de control B del medidor de pies situada a una distancia L_b aguas abajo de la constricción.

n_f = Exponente de la ecuación de descarga del medidor en flujo libre. (Figura 17).

n_s = Exponente de la ecuación de descarga del medidor en flujo sumergido (Fig.17).

S = Relación de sumergencia h_a/h_b .

Por encima de una sumergencia de 0,95 el error de medida de la descarga aumenta y no es adecuado sobrepasarla.

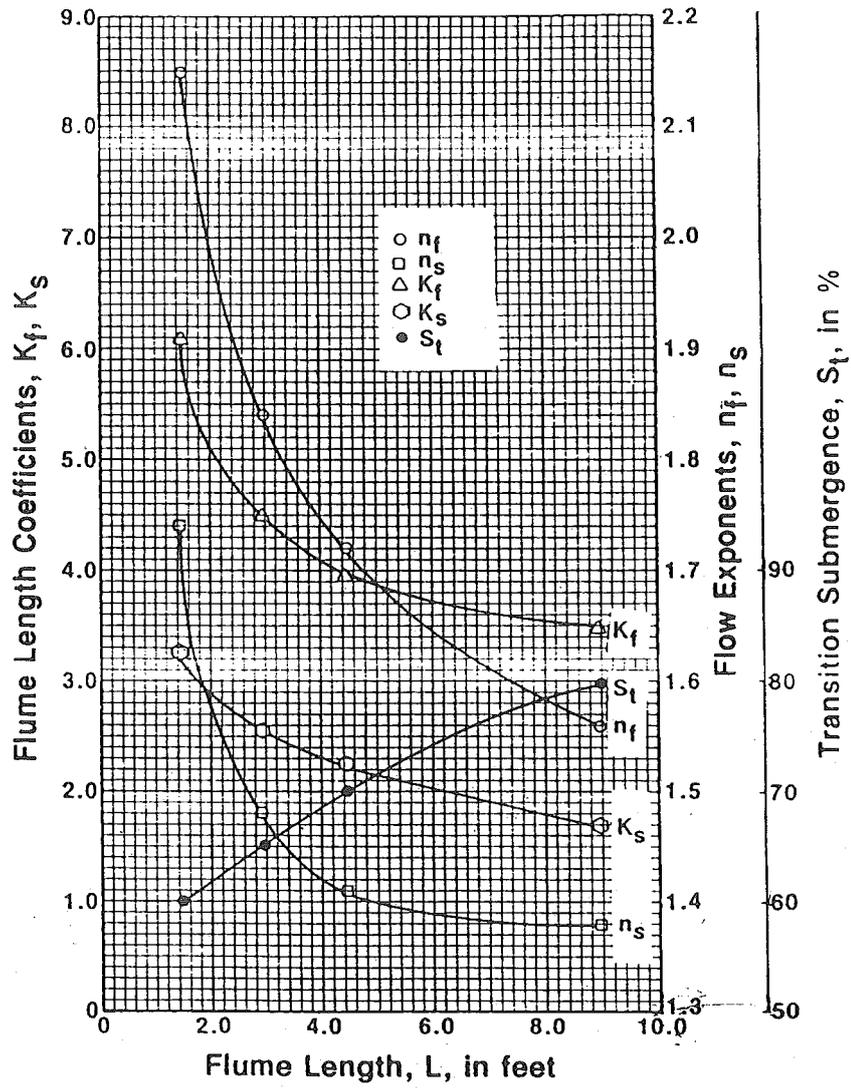


Figura 17: Abaco para la determinación de los coeficientes y exponentes de las ecuaciones de descarga de los medidores de garganta cortada en condiciones de flujo libre y sumergido.

4.4. Medidor de cresta ancha del Water Conservation Laboratory (Phoenix, Arizona)

El Water Conservation Laboratory de Phoenix, Arizona ha desarrollado un medidor muy simple y similar a un vertedero de cresta ancha (Figura 16).

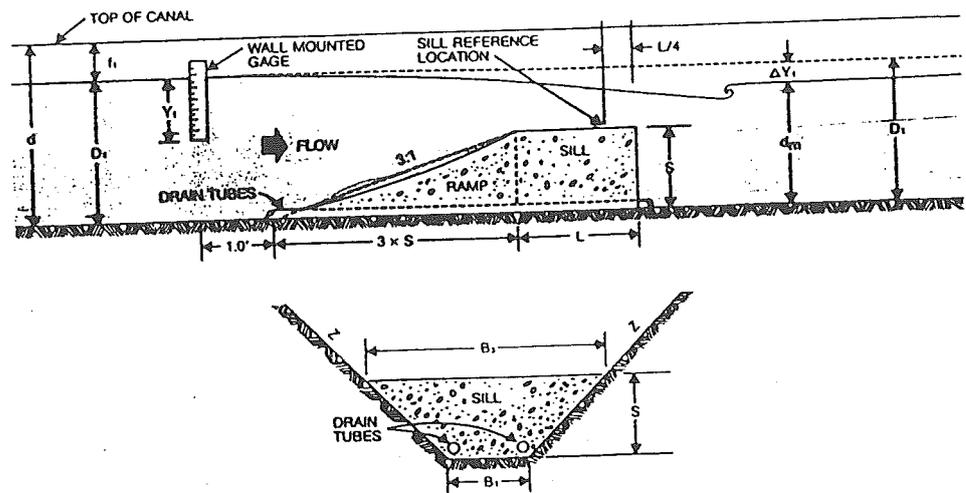


FIGURE 3.— Flume dimensions in profile (top) and cross section (bottom). Abbreviations used in the profile are as follows: d = constructed depth; D_1 = upstream water depth; f_1 = actual freeboard; Y_1 = sill-referenced flow depth; L = sill length; ΔY_1 = actual increase in water depth caused by the flume; S = sill height; d_m = flow depth; $3 \times S$ = three times the sill height (ramp length). Abbreviations used in the cross section (bottom) are as follows: B_1 = sill width; B_2 = canal bottom width; Z = sideslopes; S = sill height.

Figura 18. Medidor de cresta ancha del Water Conservation Laboratory de Phoenix, Arizona, instalado en una acequia trapezoidal (Clemmens y Replogle, 1980).

Estos medidores son muy sencillos de construir en madera o hormigón o fábrica de ladrillo, producen pequeñas pérdidas de carga, pueden funcionar con un alto valor de submergencia, se pueden instalar en cualquier tipo de acequias y su calibración se realiza fácilmente con un modelo matemático.

Para cada tipo de acequia se elegirán las dimensiones del medidor adecuado de acuerdo con el caudal normal de circulación en

la acequia y el resguardo disponible. Las dimensiones más importantes del medidor son la altura y anchura de la cresta y se debe tener especial precaución en que la superficie de la misma quede perfectamente nivelada.

La gran ventaja de este medidor, además de las ya enumeradas, es que una vez construido e instalado se pueden volver a medir las dimensiones reales del medidor y mediante un modelo matemático se puede obtener la ecuación de descarga para ese específico medidor.

Debido a que las acequias más frecuentes en los regadíos españoles son las de forma rectangular, en el Cuadro 6 se presentan los valores de descarga por metro lineal de anchura del medidor para distintos tipos de medidores y para distintas anchuras de acequias rectangulares. Los parámetros de dicho cuadro quedan reflejados en la Figura 15.

Cuadro 6. Descarga en l/s/m de los vertederos de cresta ancha del Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona, en acequias rectangulares.

TABLE X
UNIT WIDTH DISCHARGES IN LITERS PER SECOND PER METER OF WIDTH FOR RECTANGULAR BROAD-CRESTED WEIRS^a

$b = 0.1-0.2$ m ($L = 0.2$ m, $L_u = 0.05$ m)		$b = 0.2-0.3$ m ($L = 0.4$ m, $L_u = 0.1$ m)		$b = 0.3-0.5$ m ($L = 0.5$ m, $L_u = 0.2$ m)		$b = 0.5-1.0$ m ($L = 0.8$ m, $L_u = 0.3$ m)				
q (liters/ sec m^{-1})	h_1 (m) ($p_1 = 0.05$)	q (liters/ sec m^{-1})	h_1 (m) ($p_1 = 0.1$ m)	q (liters/sec. m^{-1})	h_1 (m)		q (liters/ sec m^{-1})	h_1 (m)		
					$p_1 = 0.1$ m	$p_1 = 0.2$ m		$p_1 = 0.2$ m	$p_1 = 0.3$ m	$p_1 = 0.4$ m
2	0.012	6	0.024	10	0.034	0.034	20	0.053	0.053	0.053
3	0.015	8	0.029	20	0.052	0.053	40	0.083	0.083	0.083
4	0.018	10	0.034	30	0.067	0.068	60	0.108	0.109	0.109
5	0.021	12	0.038	40	0.080	0.082	80	0.129	0.131	0.132
6	0.024	14	0.041	50	0.093	0.095	100	0.149	0.151	0.152
7	0.026	16	0.045	60	0.104	0.107	120	0.168	0.170	0.171
8	0.029	18	0.049	70	0.115	0.118	140	0.185	0.188	0.189
9	0.031	20	0.052	80	0.125	0.129	160	0.201	0.204	0.206
10	0.033	25	0.060	90	0.135	0.139	180	0.217	0.220	0.222
12	0.037	30	0.067	100	0.144	0.149	200	0.231	0.236	0.238
14	0.041	35	0.074	110	0.153	0.158	220	0.246	0.250	0.253
16	0.044	40	0.080	120	0.161	0.167	240	0.260	0.265	0.267
18	0.048	45	0.087	130	0.170	0.176	260	0.273	0.278	0.281
20	0.051	50	0.093	140	0.178	0.184	280	0.286	0.292	0.295
22	0.054	55	0.098	150	0.185	0.192	300	0.299	0.305	—
24	0.057	60	0.104	160	0.192	—	320	0.311	0.317	—
26	0.060	65	0.110	170	0.200	—	340	0.323	0.330	—
28	0.062	70	0.115	180	0.208	—	360	0.335	0.342	—
30	0.065	75	0.120	190	0.215	—	380	0.346	0.354	—
35	0.072	80	0.125	200	0.222	—	400	0.357	0.365	—
40	0.078	90	0.135	220	0.235	—	420	0.368	0.377	—
45	0.084	100	0.144	240	0.248	—	440	0.379	0.388	—
50	0.089	110	0.153	260	0.261	—	460	0.390	0.399	—
55	0.095	120	0.161	280	0.273	—	480	0.400	—	—
		130	0.170	300	0.285	—	500	0.410	—	—
		140	0.178	320	0.296	—	550	0.435	—	—
		150	0.185	—	—	—	600	0.459	—	—
		160	0.193	—	—	—	650	0.483	—	—
$\Delta H =$	0.011 m		0.022 m		0.025 m	0.033 m	$\Delta H = 0.1h_1$ or ^b	0.047 m	0.058 m	0.059 m

Cuadro 6 (Continuación). Descarga en l/s/m de los vertederos de cresta ancha del Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona, en acequias rectangulares.

$b = 1.0-2.0 \text{ m}$ ($L = 1.0 \text{ m}, L_u = 0.3 \text{ m}$)				$b \geq 2.0 \text{ m}$ ($L = 1.5 \text{ m}, L_u = 0.3 \text{ m}$)			
q (liters/ sec m^{-1})	h_1 (m)			q (liters/ sec m^{-1})	h_1 (m)		
	$p_1 =$ 0.25 m	$p_1 =$ 0.50 m	$p_1 =$ 0.75 m		$p_1 =$ 0.50 m	$p_1 =$ 0.75 m	$p_1 =$ 1.00 m
20	0.054	0.054	0.054	50	0.098	0.098	0.099
40	0.083	0.084	0.084	100	0.154	0.155	0.155
60	0.109	0.110	0.110	150	0.200	0.201	0.202
80	0.131	0.132	0.133	200	0.240	0.242	0.243
100	0.151	0.153	0.154	250	0.277	0.280	0.281
120	0.169	0.172	0.173	300	0.311	0.315	0.316
140	0.187	0.190	0.191	350	0.344	0.347	0.350
160	0.203	0.207	0.209	400	0.374	0.379	0.381
180	0.219	0.224	0.225	450	0.403	0.409	0.411
			0.241	500	0.431	0.437	0.440
200	0.234	0.239	—	550	0.458	0.465	0.468
250	0.269	0.276	—	600	0.484	0.491	0.495
300	0.302	0.311	—	650	0.509	0.517	—
350	0.333	0.343	—	700	0.533	0.542	—
400	0.362	0.373	—	750	0.557	0.567	—
450	0.389	0.402	—	800	0.580	0.590	—
500	0.416	0.430	—	900	0.625	0.636	—
550	0.441	0.457	—	1000	0.667	0.680	—
600	0.465	0.483	—	1100	0.708	0.723	—
650	0.489	—	—	1200	0.748	—	—
700	0.512	—	—	1300	0.786	—	—
750	0.535	—	—	1400	0.823	—	—
800	0.556	—	—	1500	0.860	—	—
850	0.578	—	—	1600	0.895	—	—
900	0.598	—	—	1700	0.929	—	—
950	0.619	—	—	1800	0.963	—	—
1000	0.639	—	—	1900	0.996	—	—
1100	0.677	—	—				
1200	0.714	—	—				
$\Delta H = 0.1h_1$ or ^b	0.061 m	0.083 m	0.068 m		0.107 m	0.124 m	0.119 m

^a Ramp lengths (not tabulated) equal $3p_1$.

^b Use $0.1h_1$ or listed value, whichever is greater.

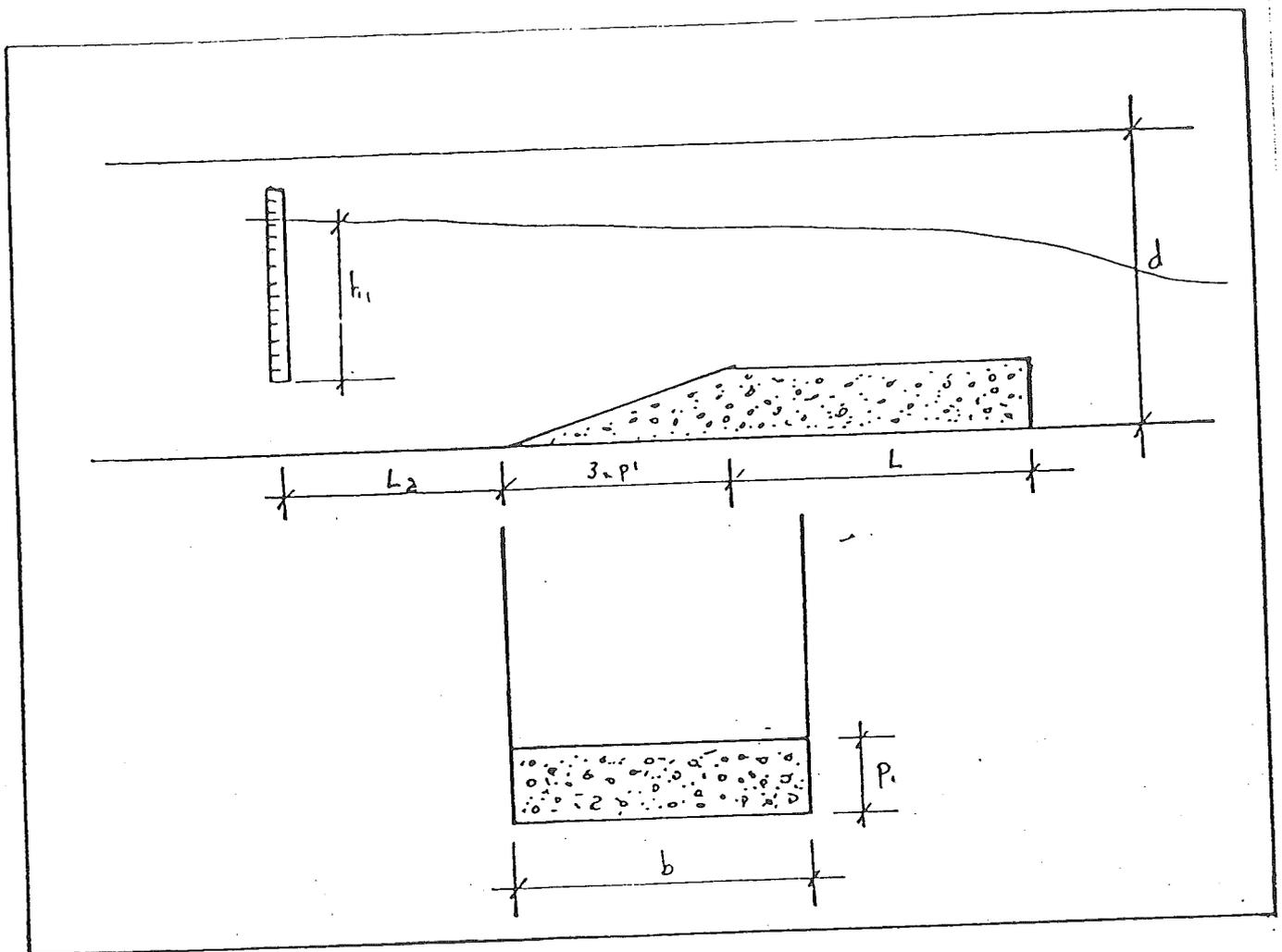


Figura 19 . Medidor de cresta ancha del Water Conservation Laboratory de Phoenix, Arizona, instalado en una acequia rectangular. Las dimensiones en letra co rresponden a los vertederos del Cuadro 6.

3.- En el año 1989, la Universidad de Utah desarrolló el programa **WEIR** para la calibración de los vertederos de cresta ancha.

Este programa es de muy fácil utilización y permite obtener la descarga del medidor para diferentes alturas de vertido.

Hay que definir los siguientes parámetros:

1.- Sección aguas arriba de la garganta:

- anchura
- pendiente de las paredes
- altura de la cresta
- longitud de la rampa.

2.- Sección de la garganta:

- anchura
- pendiente de las paredes
- longitud de la garganta
- factor de rugosidad

3.- Sección aguas abajo de la garganta:

- anchura
- pendiente de las paredes
- altura de la cresta

4.- Posición de la regla de medida:

- Distancia de la regla al origen de la rampa aguas arriba de la cresta.
- Incremento de caudal para para establecimiento de lectura directa de caudal.

5.- Límites de lectura en la regla del medidor:

- Lectura inicial
- Incremento
- Lectura final

Una vez ejecutado el programa, se obtiene la siguiente información:

1.- Cuadro de descarga del medidor en función de la altura.

- Descarga (m^3/s)
- Altura de agua en regla (m) a intervalos fijados
- Número de Froude al cuadrado
- Altura aguas abajo de la cresta (m)
- Límite modular

2.- Cuadro para contruir regla de aforo del medidor en m^3/s .

- Descarga (m^3/s) a intervalos fijados
- Altura de agua (m) en regla
- Posición de marcas en pared del canal.

El Cuadro 7 presenta los resultados del programa WEIR ejecutado con los datos de un medidor de cresta ancha instalado en la finca experimental del S.I.A. en Zaragoza.

Cuadro 7: Dimensiones y tablas de descarga de un medidor de cresta ancha instalado en la finca experimental del S.I.A. de Zaragoza, obtenidas con el programa WEIR (ver pg. siguiente):

B R O A D - C R E S T E D W E I R R A T I N G

1) Specification Data:

Upstream Section	Throat Section	Downstream Section
Base Width = 0.700 m	Base Width = 0.700 m	Base Width = 0.700 m
Side Slope = 0.000 -	Side Slope = 0.000 -	Side Slope = 0.000 -
Sill Height = 0.300 m	Throat Length = 0.500 m	Sill Height = 0.300 m
Ramp Length = 0.900 m	Roughness Factor = 0.200 mm	Ramp Length = 0.000 m

Staff Gauge Location: 0.300 m upstream of the ramp base

2) Stage-Discharge Rating:

Upstream Depth (m)	Discharge Rate (cms)	Squared Froude No. (-)	Downstream Depth (m)	Modular Limit (-)
0.050	0.013	0.0009	0.333	0.662
0.060	0.018	0.0014	0.341	0.677
0.070	0.022	0.0020	0.348	0.691
0.080	0.027	0.0028	0.356	0.703
0.090	0.032	0.0037	0.364	0.714
0.100	0.038	0.0047	0.372	0.726
0.110	0.044	0.0058	0.380	0.736
0.120	0.050	0.0071	0.389	0.745
0.130	0.057	0.0085	0.397	0.753
0.140	0.064	0.0099	0.405	0.761
0.150	0.071	0.0115	0.414	0.769
0.160	0.078	0.0131	0.423	0.777
0.170	0.086	0.0148	0.431	0.784
0.180	0.094	0.0166	0.440	0.790
0.190	0.102	0.0184	0.449	0.797
0.200	0.111	0.0204	0.458	0.803
0.210	0.119	0.0223	0.467	0.809
0.220	0.128	0.0244	0.476	0.814
0.230	0.137	0.0264	0.485	0.820
0.240	0.147	0.0285	0.494	0.825
0.250	0.157	0.0307	0.503	0.830
0.260	0.167	0.0329	0.512	0.834
0.270	0.177	0.0351	0.521	0.839
0.280	0.187	0.0373	0.530	0.843
0.290	0.198	0.0396	0.539	0.847
0.300	0.208	0.0419	0.549	0.851
0.310	0.220	0.0442	0.557	0.854
0.320	0.231	0.0465	0.567	0.859
0.330	0.242	0.0489	0.576	0.862
0.340	0.254	0.0512	0.585	0.866
0.350	0.266	0.0536	0.594	0.869

Notes: (a) Upstream Depth is referenced from the sill height; (b) Downstream Depth is the maximum depth for free (modular) flow; and (c) Modular Limit is the maximum submergence ratio for free (modular) flow.

(3) Staff Gauge Calibration:

Discharge	Upstream	Staff Gauge
-----------	----------	-------------

Rate (cms)	Depth (m)	Position (m)
0.015	0.054	0.054
0.020	0.065	0.065
0.025	0.076	0.076
0.030	0.085	0.085
0.035	0.095	0.095
0.040	0.103	0.103
0.045	0.112	0.112
0.050	0.120	0.120
0.055	0.127	0.127
0.060	0.135	0.135
0.065	0.142	0.142
0.070	0.149	0.149
0.075	0.156	0.156
0.080	0.162	0.162
0.085	0.169	0.169
0.090	0.175	0.175
0.095	0.181	0.181
0.100	0.187	0.187
0.105	0.193	0.193
0.110	0.199	0.199
0.115	0.205	0.205
0.120	0.211	0.211
0.125	0.216	0.216
0.130	0.222	0.222
0.135	0.227	0.227
0.140	0.233	0.233
0.145	0.238	0.238
0.150	0.243	0.243
0.155	0.248	0.248
0.160	0.253	0.253
0.165	0.258	0.258
0.170	0.263	0.263
0.175	0.268	0.268
0.180	0.273	0.273
0.185	0.278	0.278
0.190	0.283	0.283
0.195	0.288	0.288
0.200	0.292	0.292
0.205	0.297	0.297
0.210	0.301	0.301
0.215	0.306	0.306
0.220	0.310	0.310
0.225	0.315	0.315
0.230	0.319	0.319
0.235	0.324	0.324
0.240	0.328	0.328
0.245	0.332	0.332
0.250	0.337	0.337
0.255	0.341	0.341
0.260	0.345	0.345
0.265	0.349	0.349

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BOS, M.G. Discharge Measurement Structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. Holanda. 464 p. 1978.
- CLEMMENS, Albert J. y John A. Replogle. "Constructing Simple Measuring Flumes for Irrigation Canals". U.S. Department of Agriculture. Farmer's Bulletin Number 2268. 1980.
- FINKEL, Herman J. "Handbook of Irrigation Technology. Vol. I". CRC Press, Inc. Boca Ratón, Florida. 1982.
- GARCIA LOZANO, Faustino. "Medición del Agua de Riego". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos. 1977.
- HAGAN, Robert M., Haise, Howard R. y Talcott, W. Edminster. "Irrigation of Agricultural Lands". Agronomy No. 11. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1967.
- REPLOGLE, J.A. y BOS, M.G. Flow measurement flumes. Applications to irrigation water management. En: Advances in Irrigation, Vol. 1. Ed. Hillel, 147-217. Academic Press. New York. 1982.
- SCOTT, Verne H. y CLYDE, E. Houston. "Measuring Irrigation Water". Division of Agricultural Sciences. University of California. Leaflet 2956. 1977.
- SKOGERBOE, G.W., HYATT, M.L., ANDERSON, R.K., EGGLESTON, K.O., 1967. Design and calibration of submerged open channel flow measurement structures. Part.3. Cutthroat flumes. Rep. WG31-4. Utah State University, Logan, U.S.A.