



+4023-1

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS
DE LA O.E.A. - ZONA ANDINA

PROYECTO 39 — PROGRAMA DE COOPERACION TECNICA
LIMA, PERU

MANUAL DE RIEGOS Y AVENAMIENTOS

POR

ENRIQUE BLAIR F.

INGENIERO AGRICOLA



REEDITADO CON AUTORIZACION DEL AUTOR POR LA FACULTAD
DE AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

CARACAS

1963

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.

ZONA ANDINA

Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
Lima - Perú

M A N U A L

D E

R I R G O S Y A V E N A M I E N T O S

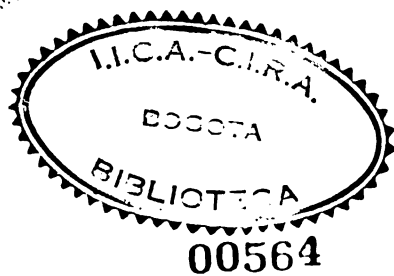
por

ENRIQUE BLAIR F.
Ingeniero Agrícola

REEDITADO CON AUTORIZACION DEL AUTOR POR LA FACULTAD DE
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
CARACAS
1963

obs del autor

6-3-611



00564

JUN. 3 1964

f 564

1101
6316
B51

I N F O R M A C I O N

El trabajo que aquí ofrecemos ha sido elaborado como parte del material de enseñanza que se presentó en el Primer Curso Internacional de Riegos y Avenamientos desarrollado en Lima, Perú, por la Zona Andina del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, durante los primeros meses del presente año.

El objetivo de este trabajo es ofrecer en forma didáctica, una buena proporción de información técnica seleccionada que permita al ingeniero agrícola diseñar pequeñas obras de riego y avenamiento, y muy especialmente, planear el riego dentro de los fundos, con máxima eficiencia para el mejor aprovechamiento de las aguas. Con este objetivo, para la elaboración de esta obra preliminar, se ha consultado la más reciente y confiable literatura sobre el tema.

El trabajo está aún inconcluso, por cuanto en él faltan todavía algunos capítulos sobre captación y almacenamiento de aguas para riego, y otros sobre el desagüe superficial y subterráneo de las tierras agrícolas, los cuales están en proceso de preparación. Varios de los capítulos ya elaborados, por otra parte, requieren una revisión adicional que también está realizándose ahora. Por esta razón la distribución de este material ha sido de orden muy limitado. En realidad, nuestro deseo original fué entregarlo solamente a aquellos ingenieros que participaron en el Curso Internacional de Riegos arriba mencionado, porque durante la presentación de las conferencias y de los trabajos prácticos de dicho curso, pudieron hacerse las correcciones y ampliaciones que demanda el texto ya elaborado, y se ofrecieron también los capítulos adicionales que no aparecen incluidos en este volumen.

La benevolencia de varios amigos, al considerar interesante esta primera fase del trabajo que estamos realizando, y el interés que ellos nos han manifestado por que les remitamos una copia del mismo, nos han obligado a distribuir este material aún inconcluso, con una amplitud que no consideramos originalmente.

Las críticas y sugerencias que se hagan al trabajo preliminar que ahora entregamos con las limitaciones indicadas, permitirán darle mejor forma a la edición definitiva, más completa, que proyectamos realizar. Por esos comentarios y por esas críticas, desde ahora expresamos nuestros agradecimientos.

Lima, 15 de Julio, 1957

EL AUTOR.

Nota de los Reeditores

El presente Manual del Dr. Blair ha sido utilizado en Venezuela como material de estudio principal en el Primer Curso Nacional de Riego y Drenaje (oct-dic de 1959) y en el Segundo (ene-feb de 1961), dictados ambos en la Facultad de Agronomía de la U.C.V., en Maracay, bajo la dirección del propio Dr. Blair.

Dado el rendimiento obtenido en dichos cursos para la elevación del nivel tecnológico de los profesionales que trabajan en el desarrollo y utilización del Riego en Venezuela, la Facultad de Agronomía, por órgano de su Departamento de Ingeniería Agrícola, ha decidido continuar esa labor, realizando el Tercer Curso Nacional en feb-marzo de 1963, aún cuando no se podía contar en esta ocasión con la presencia del Dr. Blair.

Dado, por otra parte, que la edición mimeografiada original de este valioso Manual está agotada, se solicitó autorización del autor para reeditarlo en Venezuela, la cual fué generosamente otorgada.

Sea propicia esta ocasión para agradecer al Dr. Blair la gentil autorización concedida y para expresarle nuestro reconocimiento por la labor que realiza en nuestro país en el Primero y Segundo Cursos, y que aspiramos a continuar en 1963 y en los años sucesivos.

Y aprovechamos también la oportunidad para expresar nuestro agradecimiento a los Ministerios de Obras Públicas y de Agricultura y Cría y al Fondo Nacional de Investigaciones Agro-Pecuarias, cuya amplia colaboración financiera y de estímulo han hecho posible la reedición de este Manual y la realización del Tercer Curso Nacional de Riego y Drenaje.

Facultad de Agronomía de la U.C.V.
Departamento de Ingeniería Agrícola
Maracay, enero de 1963

ECONOMIA DE AGUA DE LAS PLANTAS

Paulo de T. Alvim*

El estudio de las relaciones entre la planta y el agua, o de la "economía de agua de las plantas", constituye uno de los sectores de la Fisiología Vegetal que más atención ha recibido de los investigadores. La suma de conocimientos que se tiene hoy día sobre el asunto es tremendamente grande. La exposición que se hace a continuación es tan sólo un resumen elemental de algunos tópicos de mayor interés para quien estudia problemas de riego y avenamiento de cultivos agronómicos. A los que deseen familiarizarse con la literatura especializada sobre el asunto, se recomiendan los libros de Maximov (1929), Kramer (1949), Crafts et al (1949), y el simposium editado por Ruhland (1956), todos citados al final de esta exposición.

A. HIDROLOGIA DE LA PLANTA

Para tener una noción suscita -como la que se justifica en este curso- de los procesos fisiológicos que están incluidos en lo que hemos llamado "economía de agua de la planta", quizá sea recomendable imaginarse una planta, como por ejemplo el maíz, creciendo bajo condiciones de campo en un día normal de verano, esto es, con sol y sin lluvia, procurando acompañar durante un ciclo de 24 horas todo lo que ocurra al agua que participa en la fisiología de esta planta. Si iniciamos nuestras observaciones en la madrugada, antes que nazca el sol, como por ejemplo a las 5 a.m., veremos que la planta probablemente tendrá sus hojas revestidas de rocío. Este se ha depositado porque las hojas se han enfriado durante la noche (irradiación de calor), provocando la condensación de la humedad en su superficie. Como las hojas están más frías que el aire, y este último presenta elevada humedad relativa, no hay posibilidad de que haya

* Eng. Agr., Ph. D., Fitofisiólogo del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Zona Andina, Lima, Perú.

transpiración, que es la pérdida de agua en forma de vapor por la planta. Esta última está así con su máxima cantidad de agua o máximo grado de turgencia. La absorción de agua por las raíces es muy pequeña o nula, a consecuencia precisamente del elevado grado de saturación de todos los tejidos de la planta. También se puede considerar como nulo el movimiento de agua dentro de la planta, pues no hay las diferencias de presión o diferencias de grado de saturación que son siempre indispensables para que dicho movimiento se verifique.

Naturalmente, las hojas absorben gran parte del rocío que se ha depositado en su superficie, pero no se debe creer que esta absorción sea suficiente para satisfacer las necesidades de agua de la planta, pues la transpiración durante el día, siempre que hay sol, es muy superior a la absorción de agua que pueden hacer las hojas por ese proceso. La absorción más eficiente y que realmente satisface la necesidad de agua de la planta es la que se procesa a través de las raíces. Esto no se debe a que las raíces tengan más fuerza que las hojas para absorber el agua (por el contrario, su fuerza de absorción es por lo general más baja que la de las hojas), sino porque la superficie radicular de la planta en contacto con el suelo es generalmente mucho más grande que su superficie foliar en contacto con el aire (alrededor de 100 veces más en el caso de la avena, por ejemplo), y además hay siempre más agua en el suelo que en el aire.

Con la salida del sol hay un aumento gradual de la temperatura y la intensidad de la luz, y ambos factores provocan a su vez un aumento gradual de la pérdida de agua de la planta. Con la elevación de temperatura la hoja se calienta, aumentando la presión del agua en sus tejidos y forzando así la evaporación. Después que se haya evaporado el rocío, lo que por lo general lleva de 1 a 2 horas, se inicia la transpiración propiamente dicha, o sea, la pérdida de agua en forma de vapor por la propia

planta. Si no hubiera luz, el valor de esa transpiración sería relativamente bajo, pues los estomas permanecerían cerrados y el vapor de agua podría salir tan sólo a través de la epidermis de la hoja, la cual se encuentra revestida de una capa poco permeable que se llama cutícula ("transpiración outicular"). En presencia de la luz los estomas -que son pequeños poros en número que varía según la especie de 5,000 a 100,000 por cm^2 de hoja- tienen la propiedad de abrirse y de este modo establecer contacto directo entre el interior de la hoja (mesófilo) y la atmósfera. Esto tiene gran importancia para la planta, pues aumenta la absorción de CO_2 de la atmósfera en el proceso de la fotosíntesis, pero también tiene la desventaja de facilitar la salida de vapor de agua de la planta, o sea, aumentar la transpiración ("transpiración estomatal").

Con la deshidratación de la hoja, a consecuencia del gradual aumento de transpiración, disminuye la tensión del agua en sus tejidos y empieza el movimiento ascendente de la columna hídrica que se extiende desde las raíces hasta las hojas, pasando por el tejido conductor llamado xilema (formado por los vasos leñosos). La fuerza que provoca ese movimiento resulta así del que se llama "déficit de la presión de difusión del agua". La ascensión del agua transmite ese "déficit" a las células de las raíces, la cual pasa de ese modo a absorber el agua del suelo a través de los llamados "pelos absorbentes".

Se comprende que tanto la pérdida de agua como el movimiento de la columna hídrica en la planta y la absorción de la humedad del suelo, siguen más o menos paralelamente el ciclo de la temperatura y la intensidad de luz durante el día. Sus valores máximos generalmente se observan alrededor del medio día. Por la tarde, entre las

2 y 4 p.m. la temperatura generalmente presenta sus valores más altos, pero por lo general, a esas horas la apertura de los estomas puede disminuir por efecto de la propia deshidratación de los tejidos de la hoja, evitando de ese modo que la pérdida de agua sea muy elevada.

Con la disminución de la intensidad de luz y de la temperatura en la tarde, la pérdida de agua disminuye gradualmente. Entre las 6:00 6:30 los estomas ya están, por lo general, completamente cerrados. Como los tejidos de la planta siempre ofrecen cierta resistencia a la absorción y movimiento ascendente del agua, el valor de la transpiración durante el día siempre excede al de la absorción por las raíces y el "déficit de la presión de difusión del agua" en la planta tiende a aumentar hasta llegar a un valor máximo (menor cantidad de agua en la planta), por lo general entre las 3 5 p.m. Este "déficit" continuará en la planta, aún después que los estomas se hayan cerrado y la transpiración prácticamente paralizado en las primeras horas de la noche. Por ese motivo el movimiento y la absorción de agua podrán continuar relativamente intensos durante esas primeras horas de la noche y tan sólo cesarán cuando los tejidos de la planta se hayan saturado nuevamente, lo que, por lo general, sólo se observa en las horas de la madrugada. En la Fig. 1 se presentan las curvas probables del ciclo de transpiración y absorción de agua de la planta en un día normal como el que acabamos de describir. En ella se incluyen también los ciclos de la intensidad de luz y temperatura, y se señalan algunos de los puntos a que se hizo referencia en la descripción anterior.

B. MARCHITAMIENTO Y MUERTE POR DESHIDRATACION

Siempre que la pérdida de agua es superior a la absorción, las células de las plantas disminuyen su turgencia. Si esa pérdida de turgencia es suficientemente in-

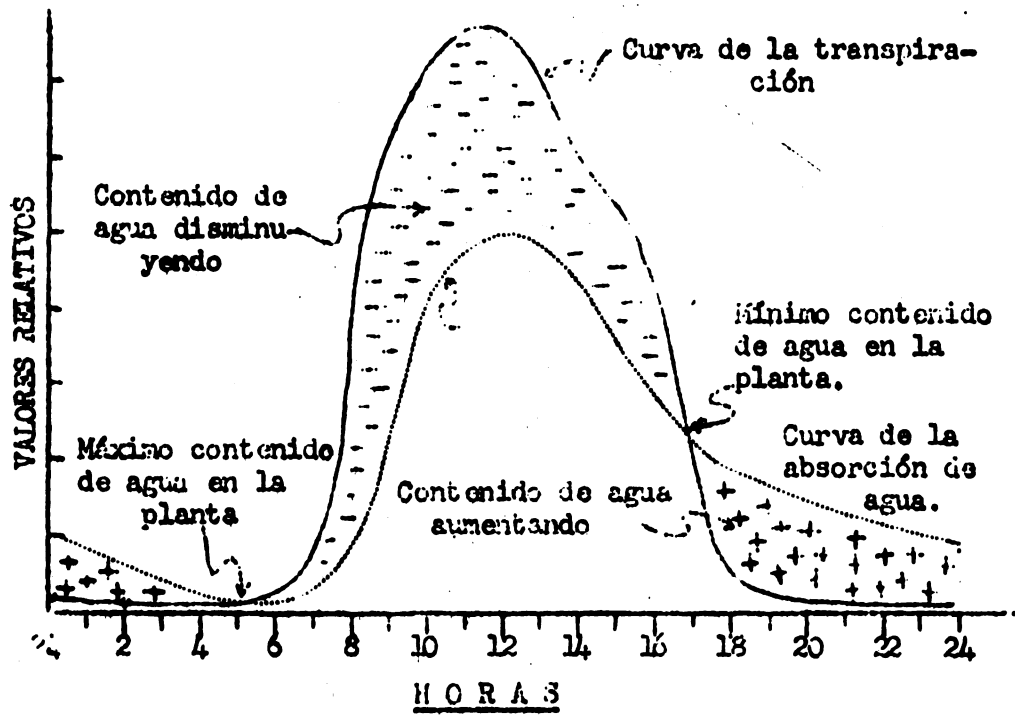
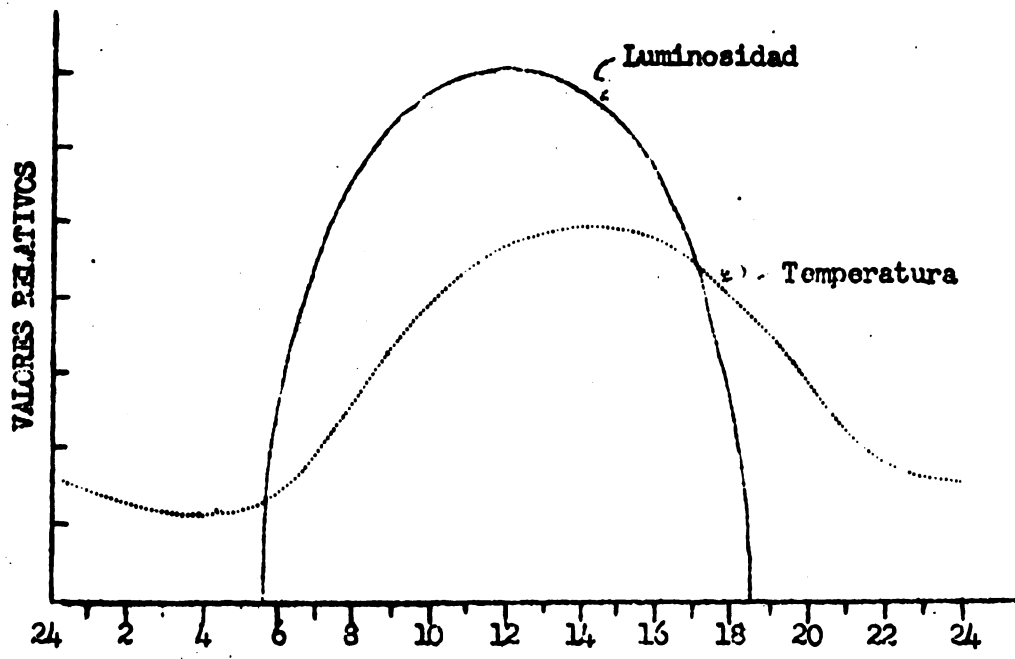


Fig. 1.- Arriba: curvas de los valores relativos de la luminosidad y la temperatura en un ciclo de 24 horas en un día "normal" de verano; Abaajo: marcha probable de la transpiración y absorción de agua de la planta en ese mismo día.

tensa, las hojas se tornan flácidas o marchitas. En las hojas es donde mejor se observa el fenómeno del marchitamiento, pero se debe recordar que la pérdida de turgencia es un fenómeno general de toda la planta, en el que todos sus tejidos, inclusive los de las raíces, son afectados.

Cuando las plantas se marchitan por exceso de transpiración sobre la absorción, sin que el porcentaje de agua en el suelo esté próximo al "punto de marchitez", se dice que el marchitamiento es temporal, pues las plantas recuperan la turgencia en la noche, sin necesidad de añadir agua al suelo. Ese tipo de marchitamiento se observa, por lo general, en las horas de la tarde, entre las 2 y 4 p.m., cuando el "déficit" de agua alcanza sus valores más altos (Fig. 1), y es más común en plantas de hojas poco leñosas, como por ejemplo el tabaco. El marchitamiento temporal debe considerarse como un fenómeno normal de la planta en días de sol.

Cuando el porcentaje de agua en el suelo llega al punto de marchitez, la absorción queda muy disminuída y las plantas entran en el llamado marchitamiento permanente. La recuperación de la turgencia en este caso, solamente es posible con la irrigación del suelo. El tiempo que la planta puede soportar ese marchitamiento permanente varía según la especie y las condiciones en que el vegetal fué cultivado, o sea, según su "resistencia a la sequía" o capacidad de soportar la deshidratación de sus células.

Para comprender por qué las plantas difieren en su capacidad de resistencia a la deshidratación, quizá sea conveniente explicar la razón por la cual dicha deshidratación provoca la muerte de las células. Cuando las células se marchitan, su protoplasma es sometido a una tensión o presión negativa resultante de la resistencia o-

frecida por la pared celular (pared de celulosa) a la contracción (abajo del tamaño normal de dicha pared). El agua que la célula pierde proviene, en su gran mayoría, de la "vacuola", que es una especie de "bolsa de agua" que se encuentra en el interior del protoplasma. Es precisamente la disminución de volumen de la vacuola la que acarrea la tensión sobre el protoplasma. Se comprende que dicha tensión aumenta progresivamente con la pérdida de agua, pudiendo alcanzar valores muy altos. Llega, naturalmente, a un punto en que el protoplasma no resiste más a la acción mecánica de esa tensión y pierde las características responsables por su vida. En algunos casos el protoplasma puede exhibir señales de roturas o rajaduras a consecuencia de esa tensión. De esto se comprende que no es propiamente la falta de agua, sino la tensión mecánica resultante de la contracción de la vacuola, la que provoca la muerte de las células.

C. RESISTENCIA A LA SEQUIA.

En la Ecología, las plantas son generalmente clasificadas, de acuerdo con sus relaciones con el agua, en Hidrófitas (plantas acuáticas), Hygrófitas (plantas de climas húmedos), Mesófitas (climas intermedios en cuanto a agua), y Xerófitas (climas secos). Hay, naturalmente, muchas plantas que ocupan una posición intermedia, siendo por tanto difícil la clasificación. La característica que distingue estos cuatro grupos de plantas no es propiamente la "exigencia de agua", sino su resistencia a la sequía o a la deshidratación. Las Xerófitas, por ejemplo, crecen más y producen más cuando reciben agua regularmente. Su característica principal no es, pues, exigir poca agua, sino soportar la falta de agua. Las demás plantas no tienen esta capacidad de "resistencia a la sequía", y por esto no pueden vivir en un ambiente seco. Las hidrófitas son las que tienen menor

resistencia, o mejor, no tienen resistencia alguna a la deshidratación. Le siguen las higrófitas, las mesófitas y finalmente las xerófitas. Es oportuno llamar la atención a la impropiedad del término "xerófila" (xero = seco; phyllus = amigo), a menudo encontrado en la literatura como sinónimo de xerófitas; las plantas no son amigas de la sequía, sino que la soportan.

Hay tres tipos distintos de xerófitas; las efímeras, las suculentas, y las típicas o verdaderas.

Las xerófitas efímeras no son propiamente resistentes a la sequía. Viven en las regiones secas tan sólo porque tienen un ciclo vegetativo relativamente corto, que les permite crecer y producir semillas durante los pocos meses de lluvias que hay. En la época seca estas plantas mueren, pero sus semillas se conservan en el suelo y darán origen a nuevas plantas en el próximo período lluvioso. En este grupo están las malezas de las regiones secas, principalmente Gramíneas y Cyporáceas.

Las xerófitas suculentas soportan la sequía gracias a las grandes reservas de agua que almacenan en el tallo principalmente, o en las dilataciones subterráneas llamadas "xilopodios". Los grupos más conocidos de suculentas son las Cactáceas y una gran parte de la familia Euforbiáceas. Algunos cactus pueden pasar hasta más de un año sin absorber agua del suelo y, aún así, continúan vivos. Muchas palmeras y algunas especies de Bombáceas pueden ser consideradas también como suculentas. La presencia de "xilopodios" es una de las adaptaciones más comunes en la flora de las regiones secas de Sud-América.

Las xerófitas típicas tienen adaptaciones que les permiten evitar, por lo menos en parte, la deshidratación de sus tejidos y, lo que es tal vez más importante, soportar un grado de deshidratación relativamente alto,

en comparación a otras plantas.

Las características principales de las células que tienden a aumentar su resistencia a la deshidratación son las siguientes:

(a) Volumen de la Célula: Cuanto más pequeña es la célula, más grande es su superficie en relación a su volumen. Las células pequeñas, en general, son más resistentes a la deshidratación porque en ellas la tensión resultante de la pérdida de agua es distribuida por una superficie relativamente grande de protoplasma, siendo por tanto más pequeña por unidad de área. Las xerófitas verdaderas tienen, en general, células muy pequeñas.

(b) Volúmenes de la Vacuola: Cuanto menor es la relación entre el volumen de la vacuola y el volumen de los otros constituyentes de las células (protoplasma, granos de almidón, etc.), menor será el peligro de la deshidratación, pues las vacuolas relativamente pequeñas tienen menos agua para perder, evitando así que el protoplasma sea sometido a tensiones muy fuertes. La gran resistencia de las semillas a la deshidratación se explica por la poca cantidad de agua en sus vacuolas, las cuales se encuentran generalmente llenas de granos de almidón.

(c) Viscosidad del Protoplasma: Hay indicaciones de que cuanto más fluido es el protoplasma, más grande es su poder de soportar tensiones altas. Los protoplasmas más viscosos son menos elásticos y, por tanto, sufren más con las tensiones. Es probable que las plantas resistentes a la sequía tengan protoplasmas más fluidos, por lo menos en las capas superficiales que entran en contacto con la pared celular. Hay muy pocos estudios sobre este asunto.

Las adaptaciones para evitar la deshidratación de los tejidos de la planta son aquellas que tienden a redu

cir la transpiración o aumentar la absorción de agua:

(a) Reducción de la Transpiración: En general, las plantas xerófitas tienen una transpiración relativamente pequeña debido principalmente a las siguientes características: menor crecimiento de la parte aérea en relación a la parte subterránea, hojas pequeñas, cutícula muy espesa, alta concentración osmótica de las células (que disminuye la presión de difusión del agua, y por lo tanto la transpiración), etc. La influencia de estas modificaciones sobre la transpiración ya fué estudiada en las páginas anteriores.

(b) Aumento de la Absorción del Agua: El principal factor es la extensión del sistema radicular. Las xerófitas, en general, tienen un sistema radicular muy profundo, lo que les permite absorber el agua de las capas inferiores del suelo cuando la parte más cercana a la superficie está seca. Hay algunas xerófitas con raíces hasta de 60 m de profundidad.

Es oportuno mencionar que las características que disminuyen la transpiración o aumentan la absorción de agua no siempre son de origen genético, sino que resultan de la acción del medio sobre el crecimiento de las plantas. El tamaño de las células es también muy afectado por las condiciones del medio. Algunos autores usan el término "xeromorfismo" para designar estas modificaciones de la forma de las plantas provocadas por la acción del medio, que resultan en un aumento de resistencia a la sequía.

D. EFFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA DEFICIENCIA DE AGUA

Se debe primeramente señalar que todos los procesos fisiológicos de la planta son afectados directa o indirectamente por la cantidad de agua existente en el suelo. La producción es una función de las actividades fi-

siológicas de los vegetales y está naturalmente subordinada a factores que, como el agua afectan dichas actividades.

Al discutir los efectos de la deficiencia de agua en la fisiología de la planta, no se considerará aquí el caso extremo en que la deshidratación causa la muerte de las células, asunto a que ya se hizo referencia en las páginas anteriores. Se discutirá brevemente el efecto de la deficiencia de agua sobre la apertura de los estomas, la fotosíntesis, la nutrición mineral, el crecimiento, la floración, y la fructificación.

1. Apertura de los Estomas.

Para comprender la importancia que tiene el agua para el funcionamiento de los estomas, se debe explicar primeramente el mecanismo que controla el movimiento de apertura y cierre de los mismos. Los estomas están formados por dos células especiales denominadas "células guardianas", cuya forma por lo general se asemeja a la de dos riñones unidos por la parte cóncava, conforme se ilustra en la Fig. 2.

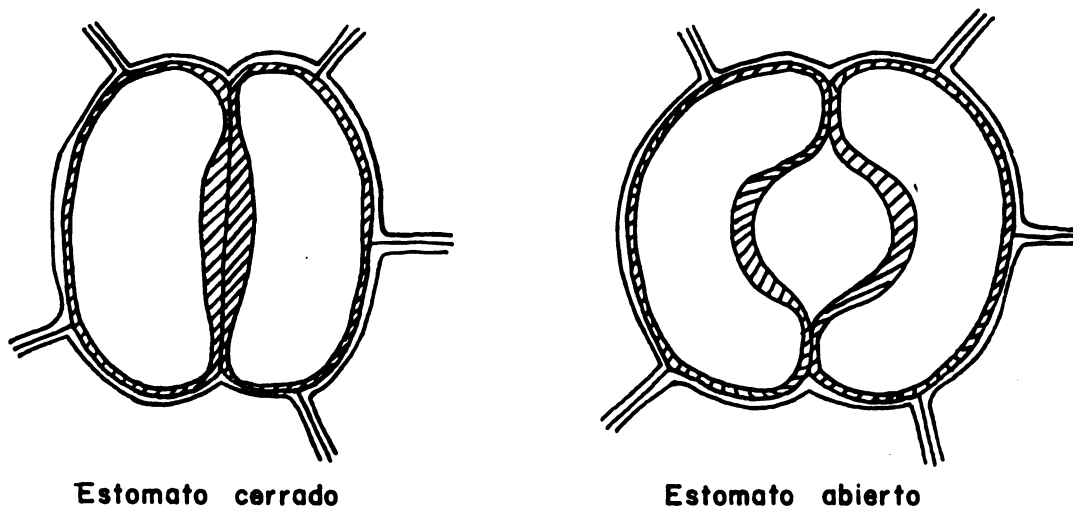


Figura N° 2

La característica fundamental de esas células está en la irregularidad del espesor de su pared: la parte correspondiente al lado cóncavo de la célula posee una pared mucho más espesa que la parte del lado opuesto. Cuando las células guardianas aumentan de volumen por efecto de la absorción de agua, sus paredes naturalmente se expanden más en las partes menos gruesas, trayendo como consecuencia el encurvamiento de la célula hacia la parte más gruesa. Esto provoca la apertura del orificio estomático ("ostíolo") situado entre las dos células guardianas. La disminución de la turgencia causa por otro lado el cierre del orificio estomático.

La luz tiene la propiedad de aumentar la capacidad de absorción de agua de las células guardianas, provocando de este modo, su movimiento de apertura. La oscuridad tiene efecto inverso. Por acción de la luz los estomas inician su movimiento de apertura en las primeras horas de la mañana, alcanzando el máximo alrededor de las 8 a.m., y, por lo general, permanecen en ese estado por lo menos hasta las 12 ó 1 p.m. cuando pueden presentar una ligera disminución en su apertura por efecto del marchitamiento temporal de las hojas. Alrededor de las 6 de la tarde, con la puesta del sol, los estomas se cierran completamente.

Por la descripción anterior se comprende que el agua es indispensable para el perfecto funcionamiento del mecanismo estomático. Cuando hay deficiencia de agua en el suelo, las células guardianas no pueden adquirir su turgencia máxima y los estomas, por consiguiente, no pueden alcanzar su total apertura. Eso trae como resultado una disminución en la absorción de gas carbónico por la hoja en el proceso de la fotosíntesis, y, obviamente, perjudica la produc

ción de la planta. También provoca una disminución en la transpiración de la planta, pero eso no es una "desventaja" para el vegetal.

Se debe señalar que la sensibilidad de los estomas a la deficiencia de agua es una característica que varía según las plantas. En general, los vegetales de clima húmedo, como el cacao y el caucho, cierran sus estomas completamente cuando existe una deficiencia de agua en el suelo. Las plantas adaptadas a climas más secos, como el maíz, la caña, etc., apenas cierran sus estomas parcialmente, cuando el agua es deficiente.

2. Fotosíntesis.

La fotosíntesis es una reacción fotoquímica entre el CO_2 y el H_2O catalizada por la clorofila, de la cual resulta la síntesis de un compuesto orgánico (carbohidrato) que sirve de materia prima para la formación de todos los compuestos orgánicos de las plantas (e indirectamente también de los animales). Es fácil comprender la gran importancia que tiene la fotosíntesis para la vida, y, naturalmente, para la producción de los vegetales.

Una deficiencia de agua en el suelo disminuye la intensidad de la fotosíntesis. Esto no se debe, como se podría pensar, a la acción directa del agua en el mecanismo fotosintético, pues las células vivas de las plantas superiores tienen siempre suficiente cantidad de agua para satisfacer las exigencias de la reacción química de la fotosíntesis.



Conforme se explicó anteriormente, el efecto de la falta de agua es indirecto y se debe principalmente a su acción sobre la apertura de los estomas.

3. Nutrición Mineral.

La absorción de minerales por las raíces es también disminuída cuando hay deficiencia de agua en el suelo. Esto se debe, en parte, a la poca disolución de los minerales en el suelo y, en parte, a la menor permeabilidad de las células de las raíces a estos minerales cuando el suelo se encuentre relativamente seco. En los casos más severos ocurre la muerte de los pelos absorbentes, perjudicando, naturalmente, la absorción tanto de minerales como del agua.

El nitrógeno, por ser generalmente el mineral del suelo que las plantas utilizan en mayores proporciones, es casi siempre el primer elemento que acusa deficiencia cuando el agua escasea. Por ese motivo es que durante las sequías prolongadas muchas plantas muestran síntomas de deficiencia de nitrógeno, caracterizados por la clorosis general de todas las hojas.

4. Crecimiento.

El aumento de volumen de las células resulta en gran parte de la expansión de vacuolas por efecto de la absorción del agua. Cuando el agua se encuentra escasa las vacuolas no se expanden y las células quedan con un tamaño reducido. Esto se refleja, naturalmente, en toda la planta, la cual se queda relativamente pequeña, con hojas pequeñas y generalmente gruesas, internudos cortos, etc. Estas alteraciones morfológicas provocadas por deficiencia de agua se conocen generalmente como "xeromorfismo".

Se debe recordar que la producción de la planta está íntimamente relacionada a su área foliar. Como la deficiencia de agua reduce el área foliar de

la planta, la fotosíntesis total queda, naturalmente, reducida perjudicando de ese modo la producción. Quizá sea ese el principal factor responsable de la disminución en la capacidad productiva de la planta, cuando ésta se cultiva bajo un régimen deficiente en agua.

5. Floración y Fructificación.

La cantidad de agua en el suelo no afecta el fenómeno de la diferenciación sexual de la planta. La temperatura y el fotoperiodismo son casi siempre los principales factores ambientales que provocan la formación de las flores. La expansión y apertura de estas flores, entretanto, es un fenómeno de crecimiento y, naturalmente, depende del agua. Un ejemplo muy conocido de la influencia del agua sobre la apertura de las flores es observado en el cafeto, en las regiones sujetas a períodos de deficiencia de agua: las irrigaciones practicadas en épocas relativamente secas, por lo general provocan la apertura de las flores 8 ó 10 días después de la aplicación de agua.

La deficiencia de agua también causa con frecuencia la abscisión o caída de las flores y de frutos jóvenes. La abscisión de frutos es un fenómeno observado en muchas plantas frutales, como el naranjo, el manzano, el mango, etc. La disminución en el tamaño de los frutos es otro fenómeno muy común que se observa prácticamente en todas las plantas crecidas en ambientes secos.

E. EFECTOS FISIOLOGICOS DEL EXCESO DE AGUA.

Los efectos dañinos causados por exceso de agua en el suelo se deben todos a la falta de aereamiento del sistema radicular. Cuando el aereamiento del suelo es

deficiente, la respiración normal (aeróbica) de las raíces queda muy reducida y tanto la absorción de agua como la de minerales disminuyen. Se puede, pues, hablar de una "sequía fisiológica" causada por exceso de agua (o falta de aereamiento). Esta "sequía" tiene los mismos efectos de la deficiencia de agua sobre los procesos fisiológicos de las plantas.

Casi siempre las raíces mueren cuando el suelo permanece saturado de agua durante largos períodos. En suelos con avenamiento inadecuado, el sistema radicular de las plantas se desarrolla apenas en la capa superficial, donde las condiciones de aereamiento son adecuadas; las raíces que se dirigen hacia las capas saturadas de agua no encuentran condiciones favorables a la respiración y, por consiguiente, mueren.

Entre las plantas que se cultivan existen unas, como el arroz por ejemplo, que poseen adaptaciones especiales para vivir en suelos saturados de agua. La adaptación más común es la presencia de aerenquima en la zona cortical de las raíces. El aerenquima es una modalidad de tejido parenquimatoso con células muy separadas unas de las otras y con aire en los espacios intercelulares. Las raíces con aerenquima poseen un sistema interno para circulación de aire (entrada de oxígeno y salida de gas carbónico) que les permite respirar normalmente, aún cuando las condiciones de aereamiento del suelo sean inadecuadas.

Además de la presencia de aerenquima, hay indicaciones de que las células de las raíces de las plantas acuáticas poseen adaptaciones metabólicas especiales, que les permiten utilizar eficientemente la energía resultante de la respiración anaeróbica, sin necesitar del concurso de una respiración aeróbica muy activa. En las plantas de ambientes normales la respiración anaeróbica

no es suficiente para satisfacer las necesidades de energía de las células, y, además, resulta en la formación de sustancias tóxicas que matan dichas células.

F. ORIENTACION DEL RIEGO POR INDICADORES FISIOLOGICOS.

Los métodos que se pueden recomendar para determinar la época en que se debe aplicar agua al suelo en un programa de riego, se pueden clasificar de modo general en dos grupos: Métodos edafológicos, basados en la determinación del contenido de agua "disponible" en el suelo, y métodos fisiológicos, esto es, basados en la indicación de la propia planta. Los métodos edafológicos son estudiados en otra parte de este curso. Se discutirán aquí solamente los métodos fisiológicos, bajo los siguientes tópicos: 1) Requerimiento de agua de las plantas; 2) Índice de humedad de las hojas; 3) Apertura de los estomas.

1. Requerimiento de Agua de las Plantas.

El llamado "requerimiento de agua de la planta" será discutido aquí tan sólo por su valor histórico, pues su utilidad en un programa de riegos es prácticamente nula. Se sabe que la frecuencia y el volumen de las irrigaciones se determinan por el consumo o evaporación de agua del campo cultivado, y esto, naturalmente, varía según el tamaño de las plantas, el número y tamaño de las hojas, la transpiración por unidad de área foliar, etc. Un campo cubierto por un cultivo arbóreo evapora naturalmente más agua que un campo con plantas más pequeñas, como maíz, frijoles, caña, etc., cultivados en la misma zona. Los primeros, naturalmente, requieren una irrigación más abundante. Sin embargo, se debe recalcar que el consumo de agua de un campo cultivado está subordinado, principalmente, a los factores meteorológicos que afectan la evaporación del agua, como temperatura, irradia-

ción solar, humedad relativa, vientos, etc.

Briggs y Schantz, en 1914, determinaron el consumo de agua de diferentes plantas (cultivadas en tambores metálicos relativamente grandes) estableciendo el índice numérico que denominaron "requerimiento de agua", el cual al principio se creyó de mucha utilidad para evaluar la cantidad de agua que se debe aplicar en las irrigaciones. El valor de ese índice representa la relación entre la cantidad de agua transpirada y la cantidad de materia seca producida por la planta. Así, un requerimiento de agua con el valor 500, significaría que la planta transpira 500 litros de agua para cada kilogramo de materia seca que produce. Ese índice también ha sido designado como "relación de transpiración", "relación transpiratoria", o "eficiencia transpiratoria".

Los estudios más recientes han demostrado, sin lugar a duda, que el valor práctico del "requerimiento de agua" es muy limitado, ya que su valor varía enormemente según las condiciones climáticas y del suelo. Como ya se dijo anteriormente, la influencia de los factores climatológicos, por ejemplo, es más importante para estimar el consumo de agua de un campo cultivado, que el tipo de planta en este campo. Se sabe, además, que las plantas cultivadas en suelos relativamente ricos, producen, dentro de un mismo período, más materia seca que las cultivadas en suelos pobres, y, naturalmente, presentan un "requerimiento" mucho más bajo que las últimas. Por otro lado, en climas más secos la transpiración es muy aumentada, sin que la producción de materia seca lo sea, y el requerimiento, naturalmente, aumenta. Aún en la misma región y con la misma planta, se puede, por esos motivos, encontrar valores muy diferentes, según las condi

ciones climáticas de cada año. Así, en una misma variedad de alfalfa se ha encontrado, por ejemplo, el valor de 1.068 en un año y 659 en el año siguiente, en la misma localidad.

2. Indice de Humedad de las Hojas

El método de orientación de riego por la determinación del llamado "índice de humedad de la hoja", ha sido desarrollado por H. F. Clements en Hawai, y hasta el momento se ha utilizado tan sólo en el cultivo de caña de azúcar. El método se basa en la determinación del porcentaje de agua de las vainas de las hojas terminales de la caña, a intervalos de aproximadamente 1 mes. Según los trabajos experimentales de Clements, la caña debidamente regada tiene un índice de humedad de 85% o más, durante los primeros 6 meses de su desarrollo; entre 80 y 82% durante su vida intermedia, y un descenso en el contenido de humedad, hasta llegar al 73% en el momento de la zafra. El índice de humedad serviría así para determinar aproximadamente si las operaciones de cultivo se están haciendo a satisfacción. Por lo general, los factores asociados a niveles inadecuados de humedad en las hojas son los siguientes: Intervalos demasiado largos entre los riegos; hileras demasiado empinadas; un riego demasiado rápido, que da una penetración insuficiente del agua a lo largo de la hilera; cañaveral demasiado ralo; imperfecto control de malezas; imperfecta fertilización del suelo, principalmente en potasa y Nitrógeno, y por último, pero no menos importante, suelo mal preparado o con capa laborable mala, debido a una aradura pobre o hecha con terreno húmedo. El índice sirve, según Clements, para comprobar el éxito o indicar la bondad de estas operaciones, inclusive el programa de riego, pero no

sirve para determinar cuándo se debe aplicar el próximo riego, por la razón de que al encontrarse un valor considerado bajo, ya sería demasiado tarde para aplicar el agua.

3. Apertura de los Estomas.

Ya se explicó anteriormente que una falta de agua en el suelo impide que los estomas alcancen su máxima apertura. Basados en este hecho, algunos investigadores han pensado en utilizar métodos para medir la apertura de los estomas, como indicadores de la necesidad de riego de los cultivos. La dificultad en la utilización práctica del sistema estaba precisamente en la inexistencia de un método sencillo y, sin embargo, suficientemente preciso que se pudiera recomendar para trabajos en el propio campo. La observación directa de los estomas al microscopio (previa fijación del tejido en alcohol) quizá haya sido el primer método utilizado para esta finalidad, pero tuvo que ser desechado por su inadaptabilidad en los trabajos de campo. El método de infiltración de las hojas con líquidos de baja tensión superficial (xylol, kerosene, parafina líquida, etc.), utilizado primeramente por Molisch -e indudablemente el más sencillo de todos los métodos- ha sido recomendado por algunos autores, pero su utilización práctica no ha sido aceptada, en virtud de la poca precisión del referido método.

Alvim y Havis (1954) han perfeccionado el método de infiltración, conservando su sencillez y conveniencia para trabajos de campo y haciéndolo más preciso para evaluar la apertura de los estomas. Este método perfeccionado consiste en la utilización de una serie de soluciones preparadas con Nujol y kerosene (o xylol), mezclados en diferentes proporciones

(0:10; 1:9; 2:8; 3:7; 4:6; 5:5; 6:4; 7:3; 8:2; 9:1; 10:0). Se referirá a esas soluciones por números, siendo la N° 1 el kerosene y la N° 11 el Nujol puro. Cuando los estomas están muy abiertos todas las soluciones penetran en las hojas (en algunas plantas con estomas muy pequeños, como por ejemplo el cacao, las soluciones arriba de la 9, esto es, con 80% de Nujol, nunca penetran, y deben, por lo tanto, ser eliminadas de la serie). Esto se verifica con mucha facilidad y rapidez poniendo gotas de las soluciones en el envés de las hojas (para algunas plantas con estomas en los dos lados de la hoja, como en el caso del maíz, se ha preferido poner la gota en el as de la hoja): las soluciones que penetran producen una mancha oleosa en el punto de aplicación y el tejido se torna traslúcido. Cuando los estomas están medio abiertos, las soluciones con más de 50 ó 60% de Nujol no penetran. En las hojas con los estomas completa-mente cerrados no hay penetración de ninguna de las soluciones.

Los trabajos preliminares realizados hasta la fecha con caña, maíz, y algodón, parecen indicar que se puede recomendar en el caso de esos cultivos el empleo de la solución N° 9 (80% de Nujol y 20% de kerosene), para diferenciar entre plantas con buena provisión de agua y plantas con deficiente provisión de agua.

Para mayor seguridad de los resultados se recomienda que las pruebas de infiltración con esta solución sean efectuadas en horas de la mañana, de preferencia entre las 8 y las 10 (o las dos o tres primeras horas de sol), llevando a cabo un número relativamente grande de pruebas -digamos de 20 a 30 - en plantas situadas en distintas localidades del campo,

y adoptándose, por ejemplo, el criterio de aplicar agua solamente cuando más del 50% de las pruebas indique disminución de la apertura estomatal.

En la orientación práctica de un programa de riego, el método de determinar la falta de agua por medio de la apertura de los estomas, ofrecería indudables ventajas sobre el tradicional procedimiento de determinar el "punto de marchitez" del suelo y medir periódicamente el "agua disponible", o sea, la diferencia entre el porcentaje de agua del suelo y su punto de marchitez. Por lo general, el sistema radicular de la planta es extenso y muy variable, según el tipo de suelo, al extremo de que muy difícilmente las determinaciones de humedad en ciertos puntos del terreno, dan una apreciación real de la disponibilidad de agua para las plantas. Las frecuentes variaciones en las características del suelo, aún en áreas relativamente pequeñas, constituyen, además, un problema serio para la determinación del agua disponible, obligando a aumentar de tal modo el número de muestras, que frecuentemente el trabajo se torna económicamente impracticable. A esto se debe añadir que el concepto según el cual las plantas pueden absorber agua con la misma facilidad hasta que el porcentaje de agua en el suelo llegue a su punto de marchitez - concepto que es la base de todos los métodos en que las mediciones de la humedad del suelo sirven de orientación para la necesidad de riego - no es universalmente aceptado, ya que varios trabajos indican que la capacidad de absorción de agua por las plantas disminuye antes de que el suelo alcance el punto de marchitez.

Ninguna de estas objeciones se aplicaría al método de diagnóstico por medio de la apertura de los estomas. Este se basa en una indicación de la propia

planta, y no es afectada por las variaciones en características físicas del suelo. Además, el método desarrollado por Alvim y Havis (1954) para medir la apertura de los estomas es de fácil aplicación, rápida ejecución, y no requiere elaborados procedimientos de laboratorio.

Las pruebas de infiltración se pueden repetir a intervalos de pocos días, lográndose de este modo descubrir la falta de agua en el suelo, tan pronto como las plantas comiencen a sentirla.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALVIN, P. de T. La Posibilidad de Reconocer la Necesidad de Riego en Maíz, Algodón y Caña de Azúcar por Medición de la Apertura de los Estomas, Revista "AGRONOMIA", Escuela Nacional de Agricultura La Molina, Lima, Perú. 23: 7-17. 1956.
2. ----- & HAVIS, J. R. An Improved Infiltration Series for Studying Stomatal Opening as Illustrated with Coffee. Plant Physiol. 29 (1): 97-98. 1954.
3. CLEMENTS, H. F. & KUBOTA, T. Internal Moisture Relations of Sugar Cane. The Selection of a Moisture Index. Hawaiian Planters' Record. 46 (1): 17-35, 1942.
4. CRAFTS, A. S.; CURRIER, H. B.; AND, STOCKING, C. R. Water in the Physiology of Plants. Chronica Botanica, Waltham, Mass., 1949. 240 p.
5. KRAMER, P. J. Plant and Soil Water Relationship. New York, McGraw-Hill Book Co., 1949. 347 p.
6. MAXIMOV, N. A. The Plant in Relation to Water. London, George Allen and Unwin, 1929.
7. RUHLAND, W. (Editor). Handbuch der Pflanzenphysiologie, Band III: Pflanze und Wasser / Encyclopedia of Plant Physiology, Vol. III. Water Relations of Plants. Lange and Springer, Berlin, 1956. 1073 p.

PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS

Para el uso adecuado y eficiente del agua de riego resulta especialmente importante el estudio de aquellas propiedades físicas de los suelos que tienen relación con la aptitud de éstos para retener el agua o para facilitar su movimiento.

La Textura.

Los suelos están constituidos por materiales sólidos, líquidos y gaseosos. La materia sólida está formada de partículas minerales y orgánicas, cuyo tamaño y proporción determinan la textura de los suelos. Las partículas sólidas que constituyen el suelo han sido denominadas según su tamaño en la forma que indica la Fig. N° 1.

Los suelos, por otra parte, toman su nombre según el tamaño y la proporción de las partículas que lo constituyen, según el triángulo de clasificación de la Fig. N° 2 que ha sido convencionalmente aceptado para estos fines.

Aún cuando las propiedades físicas de un suelo están íntimamente relacionadas con su textura, no existe una relación directa entre las unas y la otra. Es sabido, por ejemplo, que mientras más finas son las partículas de un suelo, mayor será la proporción de humedad que puede retener contra la fuerza de la gravedad y mayor en consecuencia su capacidad de retención de agua. Estas relaciones cualitativas, sin embargo, no pueden expresarse en forma matemática, ya que el origen de los materiales, la forma de las partículas, la edad del suelo, la acción de los agentes meteorizantes y, en general, todos los factores de formación del suelo, crean condiciones muy complejas, imposibles de describir por medio de una simple fórmula.

Mientras más pequeño es el diámetro de las partículas de suelo, mayor es la superficie de éstas por unidad de volumen y más pequeño el tamaño de los poros. Lo primero crea mayor resistencia al flujo de agua y lo segundo, mayor capacidad para

retenerla. Esto explica la poca permeabilidad y el alto poder de retención de los suelos arcillosos, en contraste con la alta permeabilidad y escasa retentividad de los suelos arenosos.

La Estructura.

La estructura de un suelo está definida por la forma en que se agregan las partículas primarias que lo constituyen. Los suelos de gránulos uniformes tienen poros relativamente más grandes que aquellos constituidos por agregados de tamaño escalonado.

La estructura tiene un efecto pronunciado sobre ciertas propiedades físicas del suelo, tales como la erodabilidad, la porosidad, la permeabilidad, la infiltración y la capacidad de retención de agua. Los suelos de textura fina, si son manejados en forma adecuada, adoptan una estructura granular, en la que cada gránulo funciona como una partícula independiente, favoreciéndose así las propiedades físicas indicadas y la labranza de dichos suelos.

Gravedad Específica.

La gravedad específica de una substancia es la relación que existe entre el peso de esa substancia y el peso de un volumen igual de agua. En el suelo se distinguen dos gravedades específicas: La real, que considera el volumen absoluto de las partículas, y la aparente, que considera el peso de un volumen de suelo en su condición natural, dentro del cual se incluyen, por consiguiente, los espacios porosos. Tanto una como otra, por ser relaciones de pesos, carecen de dimensión.

La gravedad específica de los minerales que constituyen los suelos varía entre 2.5 y 5.0. Los compuestos principales son, generalmente, el cuarzo y los feldespatos, cuya gravedad específica es de 2.7. Sin embargo, debido al contenido de materia orgánica en los suelos, la gravedad específica real de éstos es, corrientemente, igual a 2.65. Cuando el contenido de ma

tería orgánica es muy alto, este valor puede reducirse a 2.0 y excepcionalmente a 0.5.

La gravedad específica real no es afectada, ni por la estructura ni por la textura del suelo, y depende solamente del peso de los materiales que lo constituyen. La gravedad específica aparente, en cambio, varía con la textura y con la estructura, disminuyendo en valor con el aumento de los espacios porosos del suelo.

Espacios Porosos.

Los espacios porosos del suelo ocupan en promedio el 50% del volumen total de éste y constituyen los pequeños depósitos donde se almacena el agua, o los conductos por donde circulan el agua y el aire.

En el estudio de los poros del suelo hay dos factores importantes a considerar: 1) El tamaño de los poros, que tiene mucha relación con la permeabilidad y la retentividad de los suelos, y 2) El porcentaje total de espacios porosos, que tiene especial importancia en la determinación indirecta de la gravedad específica aparente.

El tamaño de los poros es difícil de determinar en un material tan heterogéneo como el suelo, en el cual las partículas menores ocupan los espacios comprendidos entre aquellos de mayor tamaño. En términos generales, sin embargo, el diámetro medio de los poros del suelo es mayor, mientras más grande sean las partículas que lo constituyen y mientras más uniforme sea el tamaño de las mismas, y es menor a medida que aumenta el grado de compactación del suelo.

El porcentaje de espacios porosos, por otra parte, es mayor en los suelos de textura fina y escasa compactación. La estructura tiene, así, un efecto importante en la determinación del porcentaje de espacios porosos.

Las relaciones entre el porcentaje de espacios porosos y

las gravedades específicas, real y aparente de un suelo, pueden expresarse en la forma siguiente:

Llamando:

Gr = Gravedad específica real

Ga = " " aparente

S = Porcentaje de espacios porosos

Pr = Peso de un litro de sólidos del suelo

Pa = Peso de un litro de suelo

$$\frac{Gr}{Ga} = \frac{Pr}{Pa}$$

$$S = \frac{Pr - Pa}{Pr} \times 100 = \left(1 - \frac{Ga}{Gr}\right) 100$$

$$Ga = Gr \left(1 - \frac{S}{100}\right)$$

$$\text{Si se asume } Gr = 2.65$$

$$Ga = 2.65 \left(1 - \frac{S}{100}\right)$$

El Agua del Suelo.

El agua del suelo puede presentarse en tres formas diferentes, según la naturaleza de las fuerzas que la retienen:

1) Agua higroscópica, 2) Agua capilar y 3) Agua gravitacional.

El agua higroscópica es aquella que se halla retenida en el suelo por fuerzas de absorción, cuyo valor está en equilibrio con la presión del vapor del aire circundante. Por esta razón la cantidad de agua higroscópica presente en un suelo dado, variará con la humedad relativa y con la temperatura del ambiente.

El agua capilar es aquella que está por encima del agua higroscópica y que el suelo retiene, debido a fuerzas de tensión superficial, contra la fuerza de gravedad.

CLASIFICACION DEL DEPTO. DE AGR DE LE UU.

	0.002		0.05	0.1	0.25	0.5	10	20	mm.
ARCILLA		LIMO	Muy fina	Fina	Media	Gruesa	Muy gruesa		CASCAJO
			ARENA						
ARCILLA		LIMO	ARENA						CASCAJO
			Fina		Gruesa				
	0.002		0.02		0.2			20	mm.

CLASIFICACION DE ATTERBERG.

FIG Nº 1. SISTEMAS PARA LA CLASIFICACION DE LOS SUELOS.

Ref. 9.

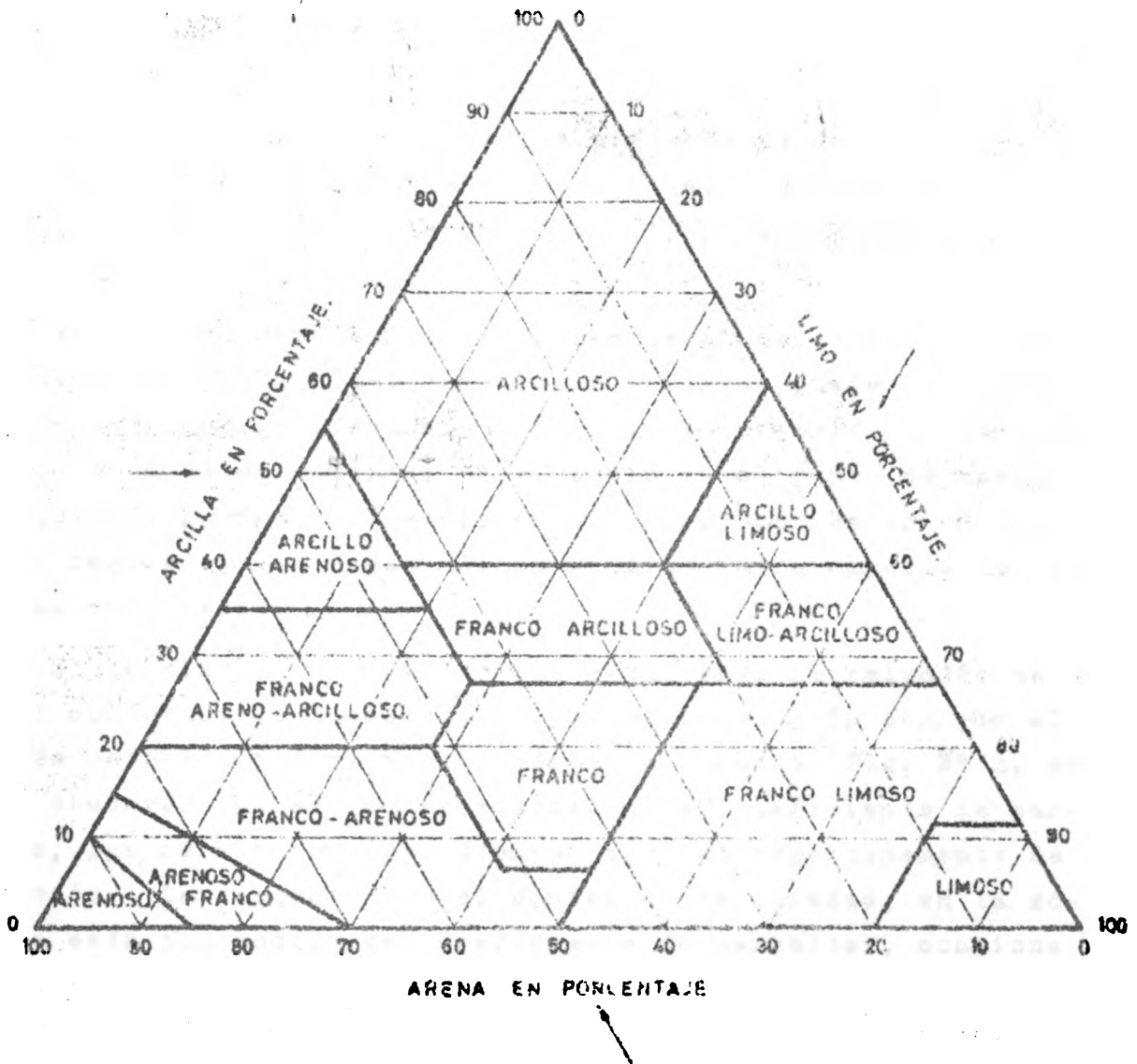


FIG Nº 2. GRAFICO PARA LA DENOMINACION DE LOS SUELOS SEGUN LA TEXTURA.

El agua gravitacional es la que está por encima del agua capilar, y que es susceptible de moverse en el suelo por la fuerza de la gravedad.

Dentro de esta clasificación los límites entre una y otra forma de humedad no son bien definidos, ni están asociados en forma directa con el desarrollo fisiológico del vegetal.

Desde el punto de vista del riego y del drenaje, resulta más conveniente clasificar el agua del suelo en relación con la habilidad de las plantas para desarrollarse, y con la habilidad del suelo para almacenar el agua.

Constantes de la Humedad del Suelo.- La clasificación del agua del suelo indicada en el párrafo anterior, puede realizarse con base en dos constantes de la humedad del suelo: la primera es el coeficiente de marchitez, que tiene un origen fisiológico, y la segunda es la capacidad de campo, que tiene un origen físico.

El coeficiente de marchitez representa el límite mínimo de humedad por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua del suelo para efectuar un desarrollo normal. La tensión con que el agua es retenida en el suelo en el punto de marchitez equivale a unas 13.6 atmósferas, que parecen estar en equilibrio con la máxima capacidad de succión de la mayoría de las plantas cultivadas.

Si se elabora un gráfico que establezca la relación entre el contenido de humedad del suelo y la succión con que el agua es retenida a distintos niveles de humedad, Fig. N° 4, se puede observar que en las proximidades del coeficiente de marchitez, las curvas correspondientes cambian repentinamente de dirección. La variación en el contenido de humedad, en la zona que está por encima del coeficiente de marchitez, ocasiona cambios muy ligeros en la fuerza de succión, en tanto que una ligera reducción en el contenido de humedad, en la zona inferior a dicho coeficiente, implica un aumento considerable de

dicha fuerza. Por esta razón, aún cuando el coeficiente de marchitez no correspondiera al mismo porcentaje de humedad para todas las plantas, en un mismo suelo, las diferencias que puedan existir resultan tan pequeñas, que justifican ampliamente el uso de este coeficiente como un límite crítico de la humedad del suelo.

El coeficiente de marchitez se considera, así, como un punto, cuyo valor se ha asumido igual para todas las plantas dentro del mismo suelo.

El coeficiente de marchitez se puede determinar de una manera directa cultivando una planta cualquiera (generalmente girasol) en un recipiente que contenga el suelo en estudio. Una vez que la planta haya desarrollado suficientemente su sistema radicular, se suspende el suministro de agua para provocar su marchitez. El contenido de humedad del suelo cuando la planta marchita no reviva en una atmósfera húmeda, representa el coeficiente de marchitez.

La capacidad de campo, por otra parte, representa el contenido de humedad del suelo, cuando el agua que éste contiene, deja de fluir por gravedad. Cuando este fenómeno ocurre, el agua libre o gravitacional deja de existir en el suelo. En los suelos provistos con buen drenaje interno, la máxima capacidad de almacenamiento de agua está representada por la capacidad de campo. El contenido de humedad de un suelo, por otra parte, no podrá sobrepasar a su capacidad de campo sino por cortos períodos, a menos que exista algún obstáculo para el libre flujo del agua.

La capacidad de campo puede determinarse directamente en el campo, humedeciendo completamente el suelo considerado y determinando luego su contenido de humedad, cuando el agua haya cesado su descenso gravitacional. Para hacer esta determinación resulta necesario observar las siguientes normas: 1) Debe conseguirse una completa saturación capilar, aplicando una abundante cantidad de agua; 2) Debe reducirse la evaporación

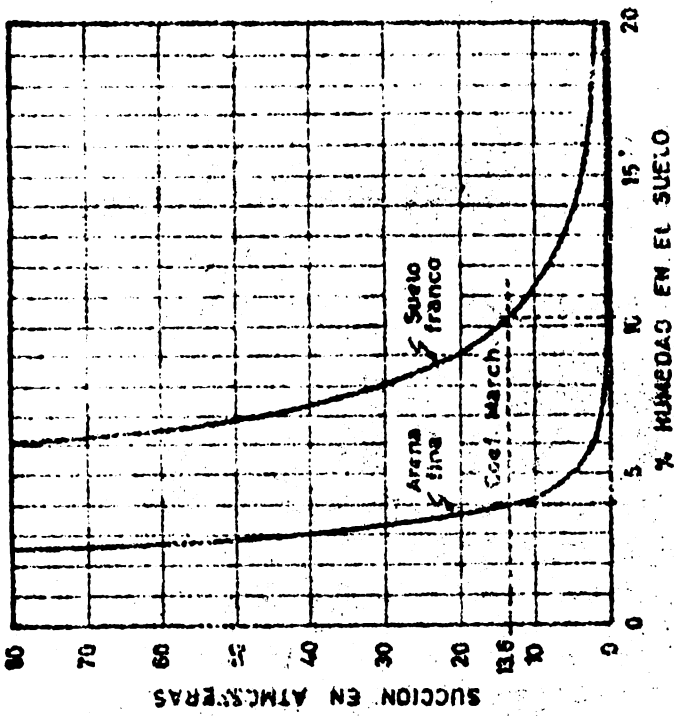


FIG. Nº 4 Variación del contenido de humedad de humedad ar relación con la fuerza de succión.
 • Dibujo de información de Ref 8.

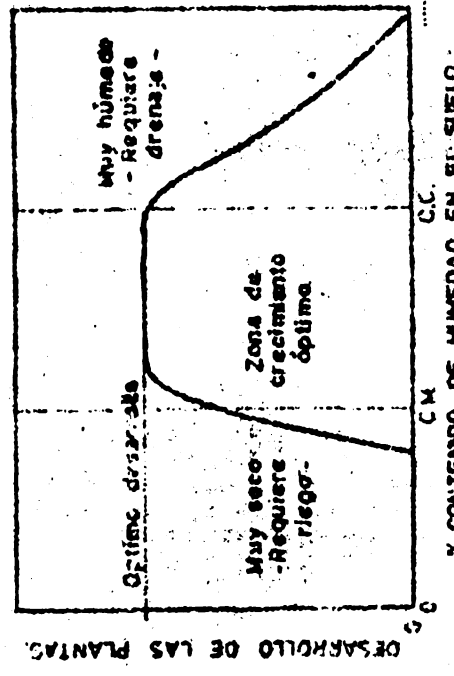


FIG. Nº 5 Relación entre el desarrollo vegetal y el contenido de humedad del suelo.
 Ref. 5.

APARIENCIA DEL SUELO	TENSION EQUIVALENTE A:		AMPLITUD EN LA DETERMINACION DE HUMEDAD	PUNTOS CRITICOS DE LA HUMEDAD DEL SUELO	CLASES DE AGUA DEL SUELO		
	Pf	Ergios por gramo x 10 ⁶			Atmosfera	Agua inóvil	Agua aprovechable
Mojado	7	-98 x 10 ⁶	10,000	Seco 16°C	Humedad higroscópica	Humedad capilar	Humedad gravitacional
	6	-98 x 10 ⁵	100				
	5	-98 x 10 ⁴	100				
Húmedo	43			Coeficiente de marchitez	Agua inóvil	Agua aprovechable	Humedad capilar
	4	-98 x 10 ³	10				
Mojado	3	-98 x 10 ²	1	Cap. Campo. Hum. Equiv.	Agua inóvil	Agua aprovechable	Humedad capilar
	2	-98 x 10 ¹	0.1				
	1	-98 x 10 ⁰	0.01				
0	-990	0.001		Saturación			

Relaciones y Constantes de la humedad del suelo.
 Ref. 7

superficial, cubriendo el suelo con una capa gruesa de paja o estiércol; 3) Debe escogerse una zona desprovista de vegetación, a fin de eliminar las pérdidas por transpiración; 4) Como el tiempo necesario para que ocurra el descenso gravitacional del agua varía según el tipo de suelo, el porcentaje de humedad debe determinarse en forma periódica a partir del segundo día de la aplicación del agua, hasta cuando dicho porcentaje sea constante; y 5) Debe seleccionarse un campo con una tabla de agua suficientemente profunda para evitar el efecto de un posible ascenso capilar.

La determinación directa de la capacidad de campo ofrece, así, algunas dificultades prácticas, por lo que ésta se determina usualmente en función de la humedad equivalente del suelo. La humedad equivalente es, en realidad, un coeficiente arbitrario que se define como el porcentaje de humedad que queda en una muestra de suelo de peso definido, después de que ésta ha sido sometida a una fuerza centrífuga mil veces mayor que la fuerza de la gravedad, por un período determinado de tiempo.

El coeficiente así determinado tiene un valor aproximadamente igual a la capacidad de campo para la mayoría de los suelos, aún cuando se observan diferencias apreciables en los suelos arenosos. Roe (Ref. 8) trae la siguiente fórmula general para determinar la capacidad de campo, con base en la humedad equivalente:

$$cc. = 0.865 H.E. + 2.62$$

Esta fórmula produce valores de cc. suficientemente aproximados para todos los tipos de suelos.

Clasificación del Agua del Suelo.- Con base en los dos puntos críticos de la humedad del suelo, definidos arriba, el agua del suelo puede clasificarse en tres categorías relacionadas con la aptitud de las plantas para utilizarla. Toda agua que está retenida en el suelo con

das al final del proceso sufrirían trastornos en su desarrollo.

En la práctica del riego el coeficiente de marchitez representa el límite mínimo de la humedad aprovechable, pero en ningún caso resultará práctico ni conveniente llegar a ese límite, aún cuando el agua del suelo en las proximidades del mismo sea aprovechada por las plantas con la misma eficiencia que a niveles superiores.

La Fig. N° 5 muestra la relación probable que existe entre el desarrollo de las plantas y el contenido de humedad del suelo. Esta relación es la que orienta, en la práctica, la mecánica del riego.

La Tabla N° 1 da valores promedios típicos de espacios porosos, gravedad específica aparente, coeficiente de marchitez, capacidad de campo y cantidad de agua aprovechable, para varios tipos de suelos. Estos valores son muy generales y se presentan con el fin de ilustrar en forma cualitativa, la forma en que estos factores varían con la textura del suelo, aún cuando otros factores, tales como la estructura, el contenido de materia orgánica, etc., tienen marcada influencia sobre los mismos, como se indicó anteriormente.

TABLA N° 1 (1)

Tipo de Suelo	Esp. porosos %	Grav. Esp. aparente	Coef. de marchitez %	Cap. de campo %	Agua aprox. en mm/cms
Arenosos	28-33	1.9-1.7	1.0- 3.5	2.5- 7.5	0.50-0.65
Franco arenosos	33-42	1.7-1.5	3.5-10.0	7.5- 20.5	0.65-1.25
Franco limosos	42-51	1.5-1.3	10.0-16.0	20.5- 33.0	1.25-1.80
Arcillosos	51-59	1.3-1.1	16.0-25.0	33.0- 50.0	1.80-2.50

(1) Adaptada de Refs. Nos. 8 y 10.

Almacenamiento de Agua en el Suelo

La práctica del riego consiste, esencialmente, en aprovechar la capacidad de retención del suelo para almacenar en él, en forma periódica, el agua que las plantas van utilizando de manera continuada. La capacidad del suelo para almacenar el agua que las plantas pueden aprovechar, depende básicamente de dos factores: la capacidad de retención de agua por unidad de volumen de suelo, y la profundidad de suelo que está al alcance de las plantas cultivadas.

Capacidad de Retención del Suelo.- Con base en las discusiones que preceden, la capacidad de retención del suelo puede definirse como la diferencia entre su capacidad de campo (CC) y su coeficiente de marchitez (CM).

El peso en kilos (Ps) de un volumen de suelo (Vs), expresado en litros, puede calcularse con base en la gravedad específica aparente, (Ga), según la siguiente relación:

$$Ps = Vs \times Ga$$

El peso de agua (Pa) que puede almacenarse en ese volumen de suelo, será el producto de Ps por el porcentaje de agua almacenable, o sea que:

$$Pa = \frac{CC - CM}{100} \times Vs \times Ga$$

El peso del agua (Pa) por otra parte, es igual al volumen (Va) de agua correspondiente, multiplicada por su peso específico, que es un Kilo por litro. De estas relaciones puede derivarse la siguiente fórmula general:

$$Va = \frac{CC - CM}{100} \times Vs \times Ga$$

Si en un terreno determinado la profundidad de suelo que sirve de depósito es D_s , el espesor de la lámina de agua que en él puede almacenarse (D_a) será:

$$D_a = \frac{CC - CM}{100} \times D_s \times G_a$$

Profundidad de las Raíces.— La profundidad de penetración de las raíces en el suelo está determinada por cuatro factores, principalmente: 1) La especie vegetal; 2) El perfil del suelo; 3) La profundidad de la tabla de agua; y 4) La penetración de la humedad en el perfil del suelo.

Hay plantas que, por naturaleza, tienen un sistema radicular profundo, en tanto que otras desarrollan sus raíces de manera superficial, aún en condiciones favorables de suelo y humedad. La alfalfa, por ejemplo, puede extender sus raíces hasta profundidades de 4 o más metros, en tanto que los pastos raras veces exceden los 60 centímetros.

Aún las plantas de raíces más profundas, como la alfalfa, pueden sufrir un estancamiento en su sistema radicular, ya sea por la presencia de alguna obstrucción (arcilla o roca) localizada a poca profundidad de la superficie del suelo, o por la presencia de una tabla de agua demasiado alta.

Por otra parte, si la cantidad de agua que recibe el suelo no es suficiente para que éste se humedezca hasta la profundidad normal de las raíces, éstas se desarrollarán solamente hasta el límite húmedo del suelo.

Las Figs. Nos. 6 y 7 ofrecen ejemplos del desarrollo radicular de varias plantas, cultivadas en condiciones diferentes.

En estos gráficos puede observarse que la mayor proporción de agua es absorbida por las raíces de las capas superiores del suelo, aún cuando una porción más pequeña es tomada de las capas inferiores. En general, para los efectos prácticos del riego, las plantas cultivadas se dividen en tres catego-

rías, según la profundidad efectiva de sus raíces:

1. Plantas de raíces superficiales, cuya profundidad de penetración efectiva es de unos 40 a 50 centímetros. Entre éstas se encuentran la mayoría de los pastos gramíneos y las hortalizas.
2. Plantas de raíces medias, cuya profundidad de penetración efectiva está entre 60 y 120 centímetros. Dentro de este grupo se pueden catalogar la papa, el maíz, el algodón, la caña de azúcar, etc., y
3. Plantas de raíces profundas, como la alfalfa y los frutales, que toman humedad a profundidades de 120 a 200 centímetros.

Métodos para determinar la Humedad del Suelo

El momento oportuno para aplicar el agua de riego a un campo de cultivo, se determina, generalmente, sobre la base del contenido de humedad del suelo. La determinación del grado de humedad del suelo por medio de métodos simples y confiables, tiene, por esto, importancia especial en la práctica del riego, por lo que se discutirán a continuación algunos de los métodos más corrientemente usados.

Método de la Estufa.— Este método consiste en tomar una muestra de suelo a la profundidad deseada y ponerla a secar en una estufa a 105°C hasta cuando el peso de muestra se haga constante. El porcentaje de humedad de la muestra, será la relación entre el peso de agua perdido por la muestra y el peso de la muestra seca multiplicado por 100.

Este es sin duda el método más exacto, pero es un tanto elaborado y requiere equipo relativamente caro, por lo cual se emplea solamente en trabajos de laboratorio y para verificar o controlar los resultados de otros métodos.

La toma de las muestras puede hacerse con cualquier tipo de barreno agrológico, pero cuando se desean muestras precisas de horizontes definidos, sin mezclas con otros horizontes, resultará más adecuado el tubo de Veihmeyer que se ilustra en la

PROFUNDIDAD

0.00
0.20
0.40
0.60
0.80
1.00
1.20
1.40
1.60
1.80
2.00

Porcentaje de raíces	Tipo de suelo
25.7	Francé arenoso.
15.6	" " " "
11.6	" " " "
8.2	" " " "
5.0	" " " "
4.3	" " " "
3.6	" " " "
4.4	" " " "
3.1	" " " "
3.3	" " " "
2.8	" " " "
2.2	Arena fina.
1.0	" " " "

Porcentaje de raíces	Tipo de suelo
51.1	Arenoso.
40.5	" " " "
2.0	" " " "
0.3	Tobis de agua.

9.

A.

FIG. N° 6. Desarrollo de raíces de alfalfa en diferentes condiciones de suelo:

A.- Suelo profundo y aplicación liberal de agua. Par. N° 6

B.- Tabla de agua próxima a la superficie.

PROFUNDIDAD

0.00
0.20
0.40
0.60
0.80
1.00
1.20
1.40
1.60
1.80
2.00
2.40
2.70
3.00

ALFALFA

Agua usada.	% del total.
17.3	72
18.3	14
18.5	14
17.0	13
14.2	11
11.9	9
10.2	8
8.9	7
7.1	6
5.8	5

ALGODON.

Agua usada.	% del total.
21.8	10
18.5	8
13.2	10
9.4	10
5.6	8
3.3	5

PAPA

Agua usada	% del total.
19.7	57
8.3	27
5.2	15
2.3	6

AVENA

Agua usada	% del total
23.4	63
5.4	15
4.0	11
3.2	9

REMOLACHA AZUCARERA.

Agua usada	% del total.
37.0	61
11.5	19
7.3	12
4.9	8

FIG. N° 7 Agua consumida a diferentes profundidades por varias plantas en condiciones normales de riego y en suelos de perfil uniforme. Adaptado de Refs. 4, 5 y 6.

Fig. N° 8.

Tensiómetros.— Los tensiómetros son aparatos que miden la tensión con que el agua es retenida por las partículas de suelo, lo cual indica el grado de disponibilidad del agua en el suelo y constituye una medida indirecta del contenido de humedad en un suelo determinado.

Los tensiómetros están constituidos, como se indica en la Fig. N° 9, por una cápsula porosa que se coloca en contacto directa con el suelo, un tubo de agua que transmite la tensión del agua en el suelo y un manómetro de mercurio que registra dicha tensión. Estos aparatos dan resultados adecuados cuando la tensión del agua en el suelo es menor que 850 centímetros (Refs. 2 y 5). Cuando la tensión es mayor, la columna de agua tiende a romperse y los resultados son erráticos.

Resistencia Eléctrica.— El método de determinar la humedad del suelo por medio de la resistencia eléctrica, ha sido principalmente estudiado y desarrollado por Bouyoucos (Ref. N° 3). El equipo necesario está constituido por dos electrodos embebidos en un bloque de yeso o de nylon, bloque éste que se coloca en contacto con el suelo (Fig. N° 10). Sendos cables procedentes de los electrodos se conectan a un puente de Wheatstone, en donde se registra la resistencia que ofrece el bloque al paso de la corriente eléctrica procedente de una batería. La resistencia eléctrica es una medida del contenido de agua del bloque, el cual se halla en equilibrio con el suelo que lo rodea.

Los bloques de yeso tienden a ser afectados por la concentración de sales en el suelo, por lo cual, cuando se desea un alto grado de precisión, los bloques deben calibrarse para las condiciones locales del suelo que se estudia. Los bloques de yeso, por otra parte, tienden a disolverse en el agua del suelo y, en general, tienen una corta duración.

Estos bloques permiten la determinación del contenido de humedad en toda la amplitud del contenido de agua del suelo, desde el coeficiente de marchitez hasta cerca de la saturación.

Punta Gravimétrica. - Este aparato está constituido por un bloque de yeso hueco y de forma cónica, que se coloca en el suelo a la profundidad deseada (Fig. N° 11). En el hueco correspondiente va colocado un cono macizo de yeso, cuyo peso ha sido previamente calibrado con la humedad del suelo, y la determinación del grado de humedad se hace extrayendo y pesando este cono. La deficiencia de este método consiste en la relativa lentitud con que el cono de yeso alcanza una condición de equilibrio en el suelo.

Estimativos Aproximados en el Campo. - Una forma práctica para estimar el contenido de humedad del suelo en el campo, consiste en tomar un puñado de suelo y observar su consistencia y apariencia al presionarlo entre la mano. El estimativo del contenido de humedad se hace con base en la Tabla N° 2, que da el porcentaje de agua disponible en el suelo, siendo 100% la diferencia entre la capacidad de campo y el coeficiente de marchitez.

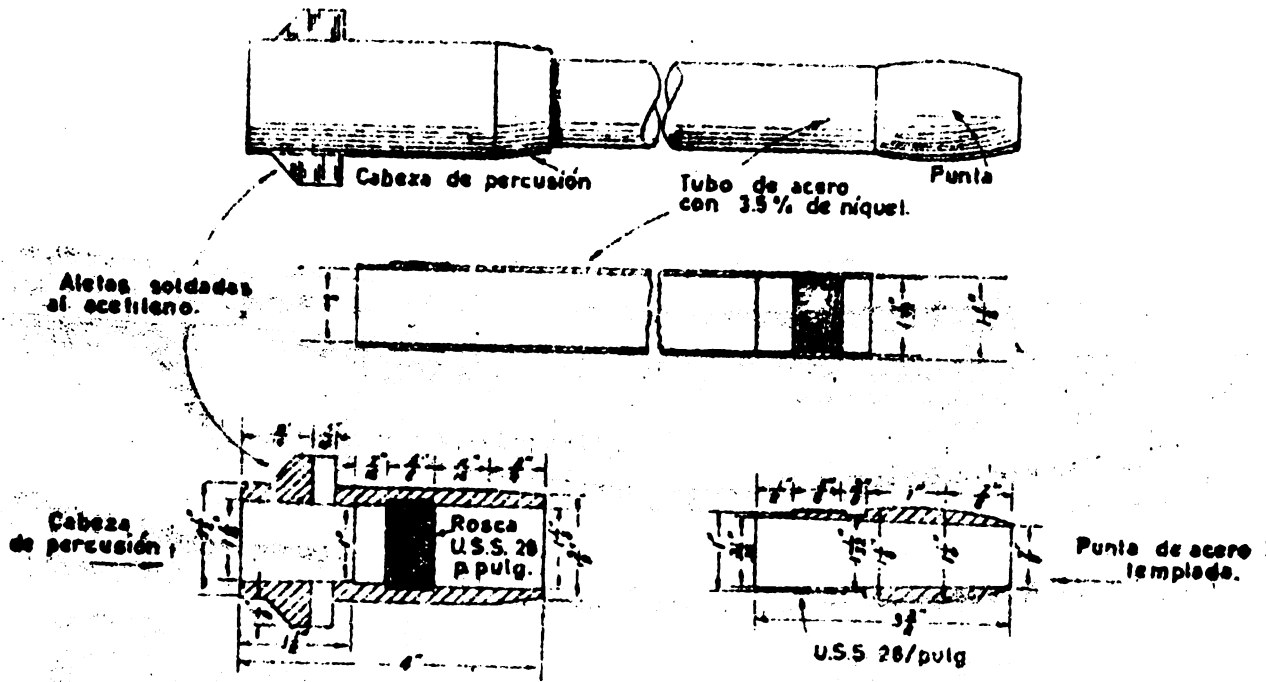


FIG. N° 8. Tubo para muestreo de suelos Tomado de Soil. Sci. Vol. 27: N° 2

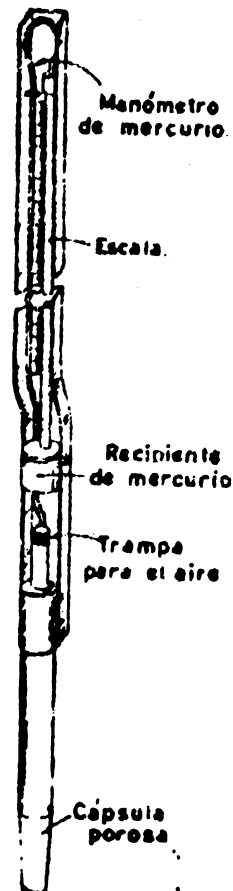


FIG. N° 9. Tensiómetro para determinar el grado de humedad del suelo.

Cortesía de Irrigation Engineering Co

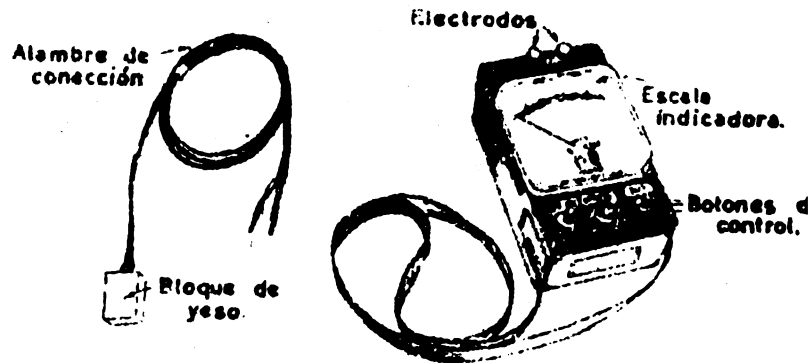


FIG N° 10 Equipo de Bouyoucos para determinar la humedad del suelo.

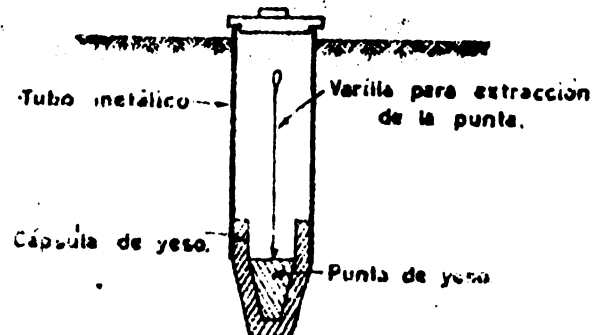


FIG. N° 11. Punta gravimétrica para determinar grado de humedad del suelo.

Tabla N° 2

Porcentaje de Humedad del suelo, aprovechable por las plantas	Consistencia y apariencia del suelo al presionar un puñado entre la mano; según su textura			
	Gruesa	Liviana	Media	Pesada y muy pesada
0	Seca, suelta, granulada, se escurre a través de los dedos.	Seca, suelta, se escurre a través de los dedos.	Pulverulenta, seca, a veces ligeramente encostrada siendo fácilmente desmenuzable.	Dura, compacta, agrietada, algunas veces presenta terrones en su superficie.
50% o menos	Todavía se presenta seca; al presionarla no forma bolas.	Todavía se presenta seca, no forma bolas al presionarla.	Algo desmenuzable, pero se une al presionarla.	Algo blanda, formará bolas al presionarla. (1)
50 % hasta 75%	La misma textura correspondiente a 50% o menos.	Tiende a formar bola al presionarla, pero rara vez mantiene su forma.	Forma una bola; algo plástica, algunas veces se resbala al presionarla.	Forma una bola y produce una cinta al presionarla entre el dedo pulgar y el índice.
75 % hasta la capacidad de campo	Tiende a pegarse ligeramente, a veces forma una bola débil al presionarla.	Forma una bola débil, se rompe fácilmente, no resbala entre el índice y el pulgar.	Forma una bola y es muy dúctil, resbala fácilmente si tiene mucha arcilla.	Fácilmente forma una cinta entre los dedos, produce una sensación resbalosa.
A la capacidad de campo	Al presionarla, el agua libre no se hace aparente en el suelo, pero queda una huella de la bola en la mano.	Lo mismo que para textura gruesa.	Lo mismo que para textura gruesa.	Lo mismo que para textura gruesa.
Sobre la capacidad de campo	Aparecerá agua libre cuando el suelo es golpeado en la mano.	Liberará agua al ser amasada.	Liberará agua al comprimirla en la mano.	Se enfanga y el agua libre aparece en la superficie.

(1) Se forman bolas apretando firmemente un puñado de tierra.

R E F E R E N C I A S

1. ADAMS, FRANK The Moisture Equivalent a Practical Measure of the Maximum Capillary Capacity. Conference on Research Problems in Consumptive Use of Water and Conservation of Rainfall. Report of American Society of Civil Engineers, 1930 (Mimeógrafa).
2. BAVER, L. D. Soil Physics, New York, John Wiley and Sons Inc. 1948.
3. BOUYOUCOS, G. J. and MICK, A. H. An Electrical Resistance Method for the Continuous Measurement of Soil Moisture under Field Conditions. Mich. Agr. Exp. Sta. Tech. Bulletin 172. 1940.
4. BOWEN, L. Irrigation of Field Crops on the Great Plains. Agr. Eng. 19:13-16. 1938.
5. FREVERT, R. K. and OTHERS. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor. Edwards Brothers Inc. 1953.
6. ISRAELSEN, O. W. Irrigation Principles and Practices. New York, John Wiley and Sons, Inc. 1952. 405 P.
7. KOHNKE, H. The Practical Use of Energy Concept of Soil Moisture. Soil Science Soc. Am. Proc. 11:64-66. 1946.
8. ROE, H. B. Moisture Requirements in Agriculture. New York McGraw Hill Book Co. 1951.
9. U. S. BUREAU PLANT INDUSTRY SOILS AND AGR. ENGINEERING Soil Survey Manual. U.S.D.A. Handbook N° 18. 1951.
10. U. S. DEPT. OF INTERIOR. Irrigation Adviser's Guide. Washington 1951. 216 P.
11. VEIHMEYER, F. J. and HENDRICKSON, A. H. Essentials of Irrigation and Cultivation of Orchards. California Agricultural Extension Service Circular 50, 1943. 23 P.

.-.-.-.-.-.

MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

El movimiento del agua en el suelo se realiza por razón de dos fuerzas principalmente: la fuerza de la gravedad, que produce el flujo gravitacional y la tensión capilar, que produce el flujo capilar. Un estudio relacionado con la mecánica de estos movimientos permitirá apreciar en mejor forma todos los procesos asociados con la práctica del riego y del drenaje.

Ascenso Capilar.

Si un tubo de diámetro pequeño se sumerge en un recipiente con agua, ésta ascenderá en el tubo hasta cuando la tensión superficial del agua sea equilibrada por la fuerza de la gravedad. En la Fig. N° 1 podemos asumir una condición de equilibrio, en la cual el peso de la columna de agua, de altura H y de radio R, está balanceada por la tensión superficial del agua o sea que:

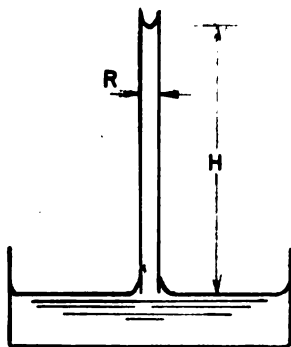


Figura N° 1

$$\pi R^2 H W = 2 \pi R T$$

$$H = \frac{2 T}{W R}$$

La tensión superficial del agua a 4°C (T), en el sistema métrico es igual a 0.077 gramos por centímetro y el peso específico del agua (W) es de un gramo por centímetro cúbico. El valor de H en centímetros, estaría dado entonces por la siguiente relación:

$$H = \frac{0.15}{R}$$

En los suelos, en donde la sección transversal de los poros capilares puede asumirse triangular, se ha demostrado que el ascenso capilar teórico probable está dado por la siguiente relación:

$$H_s = \frac{0.75}{R_p} = \frac{1.5}{D_p}$$

En donde H_s representa el ascenso capilar del agua en el suelo en centímetros, y R_p y D_p , el radio y el diámetro de las partículas de suelo, respectivamente, en milímetros. La Tabla N° 1 indica los valores de H_s teóricos para suelos ideales, constituidos por partículas esféricas de tamaño uniforme.

Tabla N° 1
Ascenso capilar en suelos ideales

Material	Diámetro medio en mm.	Ascenso capilar en mts.
Cascajo	2.0	0.0075
Arena	0.25	0.06
Limo	0.025	0.60
Arcilla	0.0025	6.00

Aún cuando el ascenso capilar indicado en la Tabla N° 1 es teóricamente posible, debido a la constitución heterogénea del suelo, la altura del agua capilar es, generalmente, inferior a los valores calculados. Por otra parte, el lento movimiento del agua capilar le resta importancia práctica a este fenómeno para suplir la demanda de agua de las plantas, a menos que la tabla de agua se encuentre a poca distancia (menos de 1 a 1.5 metros) de la superficie del suelo.

Equilibrio de la Humedad del Suelo

Si se considera una columna de suelo, Fig. 2 que ha estado en contacto, por largo tiempo, con una superficie de agua libre, de tal manera que el movimiento de humedad haya cesado completamente en la columna, puede asumirse una condición de equilibrio dinámico de la humedad del suelo en cualquier punto que se considere a lo largo de la columna. Para que exista esta condición de equilibrio, en un punto cualquiera, A, de la columna de suelo, la fuerza que tiende a mover el agua hacia arriba debe ser compensada por una fuerza descendente de igual magnitud.

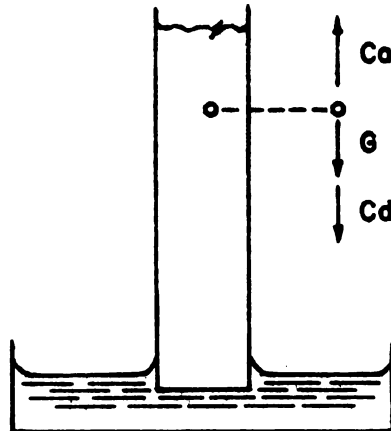


Figura N° 2

La fuerza ascendente (Ca) es de origen capilar o molecular, según el contenido de humedad del suelo y las fuerzas descendentes están constituidas por la atracción de la gravedad (G) y por fuerzas que dependen también de la tensión capilar o de la atracción molecular (Cd). La condición de equilibrio en el punto A ocurrirá cuando se satisfaga la siguiente relación:

$$Ca = G + Cd$$

En estas condiciones resulta aparente que el valor de la tensión capilar hacia arriba es mayor que la tensión capilar hacia abajo, lo cual sólo puede lograrse cuando el contenido de humedad en la parte superior es inferior al contenido de humedad en la parte inmediatamente debajo del punto considerado.

Este razonamiento demuestra que en una columna de suelo como la indicada, el contenido de humedad decrece a medida que el punto considerado se aleja de la superficie libre del agua. Esta conclusión ha sido demostrada con trabajos experimentales como el que se representa en la Fig. N° 3.

La tensión capilar aumenta en razón inversa con el diámetro de los poros capilares, que son menores en los suelos de textura más fina. Por esta razón, para una misma tensión capilar, el contenido de humedad será mayor en los suelos arcillosos que en los suelos de textura más gruesa. La Fig. N° 3 ilustra, también, la magnitud de las diferencias probables entre suelos de textura diferente.

Movimiento Capilar del Agua en el Suelo.

El movimiento capilar del agua en el suelo se produce en relación directa con la diferencia de tensión capilar entre dos puntos considerados. Si llamamos h_c a la diferencia de la tensión capilar entre dos planos considerados; L a la distancia entre dichos planos y K_c al coeficiente de transmisión capilar, la velocidad V del flujo capilar puede expresarse con la siguiente relación:

$$V_c = -K_c \frac{h_c}{L}$$

El signo negativo se incluye porque el movimiento del agua ocurre en la dirección de la mayor tensión capilar.

Dentro de un mismo suelo el agua se moverá desde las zonas más húmedas (menor tensión capilar) hacia las zonas más secas (mayor tensión capilar). Sin embargo, cuando dos suelos

de textura diferente se hallan en contacto, el contenido de humedad pierde significado, en cuanto hace referencia al movimiento del agua de uno a otro suelo.

Si el suelo arenoso A, de la Fig. N° 3, con una humedad de 10% (50 cms. de tensión capilar) se pusiera en contacto con el suelo arcilloso C de la misma figura, con un contenido de humedad de 20% (220 cms. de tensión capilar) el flujo de agua ocurriría del suelo A hacia el suelo C, aún cuando éste tenga un mayor porcentaje de humedad.

El coeficiente de transmisión capilar es una función del contenido de humedad del suelo y depende del número, del tamaño y de la continuidad de los espacios porosos del mismo. Pocos estudios han sido realizados para determinar el valor de K_c y la magnitud de los valores que lo afectan. Por esta razón, y porque el valor de la tensión capilar correspondiente a un mismo porcentaje de humedad en diferentes suelos del mismo tipo es tan variable, la utilidad de la fórmula para determinar el flujo capilar del agua en el suelo es de carácter muy limitado.

El movimiento capilar del agua en el suelo ha sido principalmente estudiado para establecer la importancia del fenómeno en varios procesos dinámicos de la humedad del suelo, tales como: la pérdida de agua por evaporación de la superficie del suelo; el movimiento descendente del agua capilar del suelo; el suministro de agua hacia las raíces de las plantas, cuando el suelo está por debajo de la capacidad de campo; el abastecimiento de agua a las plantas desde la tabla de agua del suelo; la distribución del agua en el suelo después de la aplicación del riego; y otros.

Trabajos experimentales realizados por Veihmeyer (Ver la Fig. N° 4) indican que el movimiento capilar del agua del suelo es muy lento cuando el contenido de humedad del suelo está por debajo de la capacidad de campo. Trabajos posteriores realizados por More establecen que este movimiento es prácticament

te nulo cuando la tensión del agua del suelo es menor que 0.1 atmósferas, aproximadamente.

Con base en tales conclusiones, y en otras observaciones al respecto, se pueden hacer las siguientes deducciones en relación con los procesos arriba anotados:

Evaporación del Agua de la Superficie del Suelo.- Como el contenido de humedad del suelo, bajo condiciones de drenaje interno normal, casi siempre estará por debajo de la capacidad de campo, se presume que el movimiento capilar ascendente del agua, será extremadamente lento, como para satisfacer el proceso normal de evaporación.

La evaporación de agua de la superficie del suelo tiene, en realidad, menos importancia de la que usualmente se le ha atribuido, en el agotamiento del agua del suelo. Trabajos experimentales realizados por Veihmeyer indican que sólo el agua contenida en los 5 ó 10 centímetros superiores del suelo es susceptible de perderse por evaporación en campos de cultivo comerciales.

Esto resta importancia a ciertas prácticas agrícolas que se ejecutan para reducir la evaporación, tales como la escarificación de la superficie del suelo, y el cultivo frecuente del mismo, aún cuando tales prácticas se hallen justificadas por otras razones importantes.

Movimiento Descendente del Agua del Suelo.- Después de una aplicación de riego, el agua comenzará a descender en el suelo por razón de la gravedad y de la diferencia de tensión capilar existente, pero una vez que cesa el flujo gravitacional y que el agua se ha distribuido en el suelo hasta llenar su capacidad de campo, el movimiento descendente del agua se reduce considerablemente, hasta hacerse casi nulo o de muy escasa significación práctica.

Este movimiento descendente del agua en el suelo, que se denomina infiltración, es un fenómeno que varía en razón del tipo de suelo y del contenido de humedad del mismo. La veloci

no en riegos localizados
de ↑ frecuencia

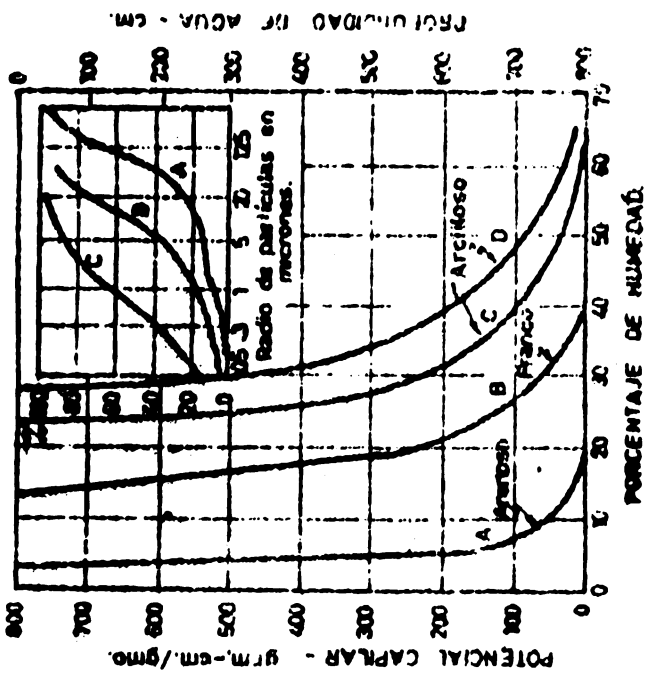


FIG. Nº 3 Relación entre contenido de humedad y tensión capilar en condiciones de equilibrio en varios suelos. Ref. Nº 4

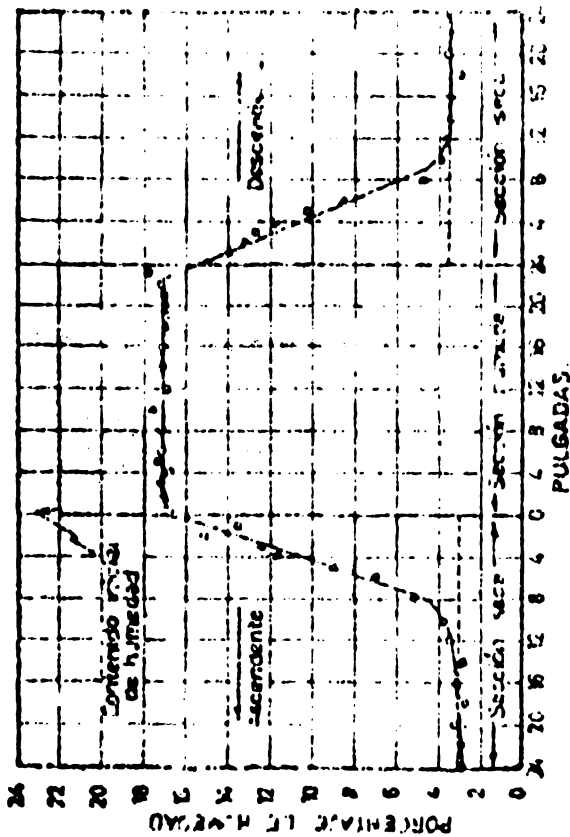


FIG. Nº 4 Movimiento ascendente y descendente del agua en columnas de suelo, desde una sección de suelo con humedad próxima a la saturación de campo. Ref. Nº 5 y 7.

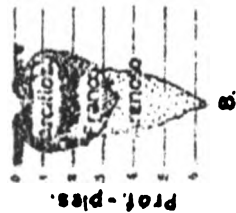


FIG. Nº 8 Distribución del agua en el suelo.
A.- Riego por aspersión.
B.- Riego por surcos

Ref. Nº 1.

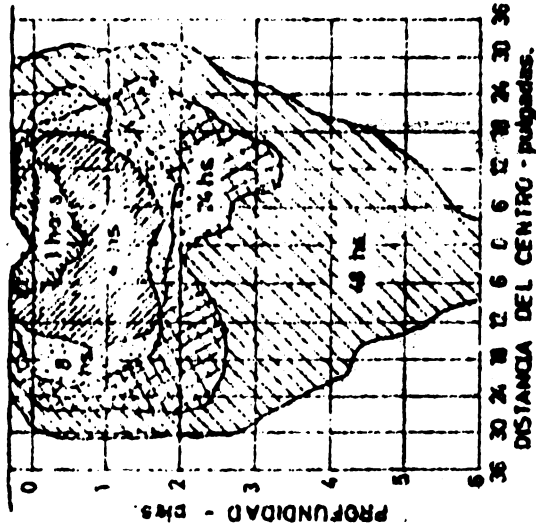
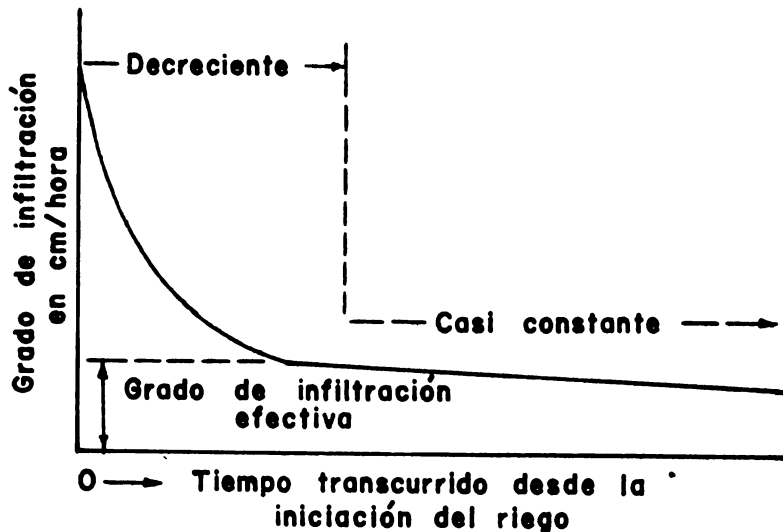


FIG. Nº 7. Movimiento del agua en un suelo franco de perfil uniforme.

dad de infiltración es más rápida en los suelos con menor contenido de humedad. A medida que la humedad de las capas superiores de suelos aumenta por razón del proceso mismo, el grado de infiltración decrece, debido a la mayor resistencia que encuentra el agua por razón de la reducción en el diámetro efectivo de los poros del suelo y por el incremento de la longitud de flujo. La curva que relaciona el grado de infiltración con el tiempo transcurrido durante el riego, tiene la forma general que indica la Fig. N° 5.



El Movimiento del Agua hacia las Raíces de las Plantas.- A la luz de los experimentos realizados sobre el movimiento capilar del agua en el suelo, parece muy improbable que el agua, continuamente absorbida y transpirada por las plantas, sea suministrada a las raíces de las mismas, en virtud de este fenómeno. Más importante que el movimiento del agua hacia las raíces, resul-

tará el movimiento de éstas hacia el agua, para asegurar el desarrollo normal de las mismas.

Abastecimiento de Agua desde la Tabla de Agua del Suelo.- Sólo cuando la tabla de agua del suelo está suficientemente próxima a la superficie del mismo, puede ocurrir un flujo ascendente de agua suficiente para satisfacer las necesidades de las plantas cultivadas. Algunos trabajos publicados sobre este asunto, indican que en la mayoría de los suelos la máxima profundidad deseable de la tabla de agua, para asegurar un abastecimiento normal, sería de uno a dos metros.

Distribución del Agua en el Suelo después del Riego.- Como se indicó anteriormente, inmediatamente después de aplicado el riego, el agua se distribuye vertical y horizontalmente en razón de la gravedad y de la tensión capilar. Durante la parte inicial de este proceso, todo el movimiento del agua está gobernado principalmente por la fuerza de la gravedad, y la distribución del agua se realiza como se indica en las Figs. Nos. 6 y 7. Posteriormente, prevalece el flujo capilar y el movimiento se hace casi nulo en todas direcciones.

Movimiento Gravitacional del Agua del Suelo

La velocidad (V) de un líquido que fluye en un medio poroso es directamente proporcional al coeficiente de permeabilidad (K) y a la pendiente hidráulica I , o sea que:

$$V = KI$$

Esta relación representa la ley de Darcy, y en ella I representa la relación entre la altura que produce el flujo (h_f) y la distancia (L) recorrida por el líquido.

En la Fig. N° 8, h_f será igual a $z_2 - z_1$, y el valor de I estará representado por $\frac{z_2 - z_1}{L}$. La velocidad del agua será:

$$V = K \frac{h_f}{L}$$

En la Fig. N° 9 (flujo vertical)

$$V = \frac{z_2 - z_1}{z_1} K$$

En ambos casos:

$$Q = AV = dbV$$

En estas fórmulas:

A = Area de flujo.
 d = Espesor del estrato.
 b = Ancho del estrato.
 Q = Gasto.

La determinación del coeficiente de permeabilidad se hace por medio de permeámetros, de los cuales hay dos tipos: permeámetro de altura constante y permeámetro de altura variable.

Permeámetro de Altura Constante.— Este aparato se ilustra en la Fig. N° 10. El valor de Q se determina dividiendo el volumen de agua W recogido en la probeta por el tiempo que haya transcurrido (t) o

$$Q = \frac{W}{t}$$

$$K = \frac{V}{I} = \frac{QL}{A h_f}$$

Permeámetro de Altura Variable.- Se describe en la Fig. N° 11.

Usualmente se usa para suelos de muy poca permeabilidad, donde es necesario proveer considerable presión para forzar pequeñas cantidades de agua a través de la muestra de suelo. El valor de K, cuando se usa este aparato, está dado por la fórmula siguiente:

$$K = \frac{2.3 aL}{A (t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

La mayor dificultad encontrada en cualquiera de los dos sistemas es la toma de la muestra, ya que es difícil obtenerla sin destruir en alguna forma su estructura natural. Por otra parte, el agua que pasa entre las paredes del recipiente y el suelo, afectan los resultados. Todas estas variaciones afectan considerablemente el valor de K, que es muy sensible, y restan importancia a las fórmulas que se han derivado con base en el coeficiente de permeabilidad.

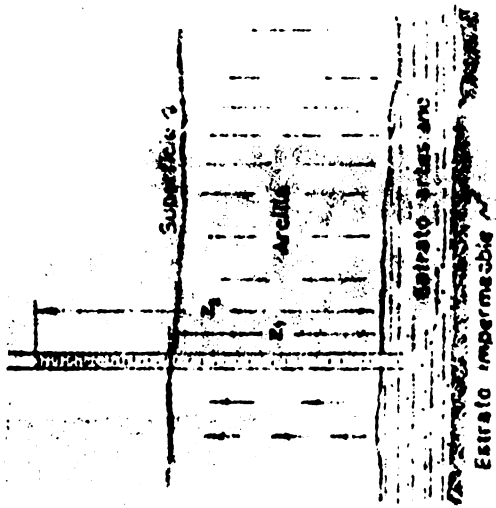


FIG. Nº 9

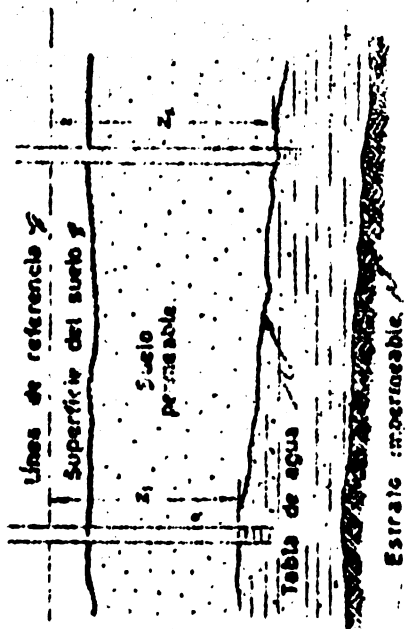


FIG. Nº 8

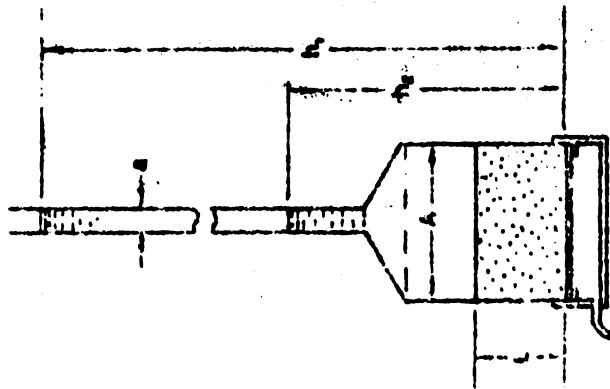
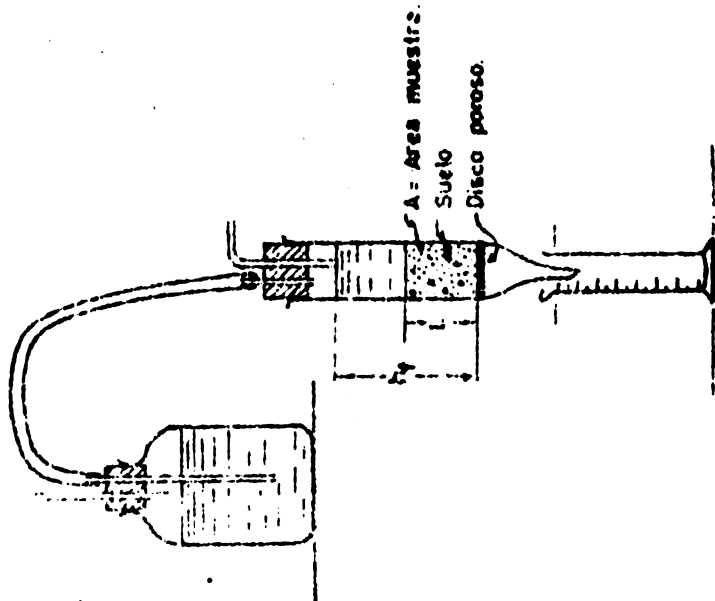


FIG. Nº 10

REFERENCES

1. **DOWSEN, L. D. and MACGILLIVRAY, J. H.** Suggestions on Irrigating Comercial Truck Crops. University of California. Agr. Exp. Sta. Leaflet. 1943.
2. **FREVERT, R. K. and OTHERS.** Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor, Edwards Brothers Inc., 1953.
3. **ISRAELSEN, O. W.** Irrigation Principles and Practices. New York, John Wiley and Sons Inc. 1952.
4. **ROE, H. B.** Moisture Requirements in Agriculture. New York. McGraw Hill Beck Co. Inc. 1950.
5. **VEIHMEYER, F. J.** Some Factors Affecting the Irrigation Requirements of Deciduous Orchards. Hilgardia N° 6 Vol. II. 1927.
6. _____ Essentials of Irrigation and Cultivation of Orchards. Calif. Agr. Ext. Service. Circular 50. Revised 1943.
7. _____ La Humedad del Suelo y su Aprovechamiento por las Plantas. Departamento de Conservación de Recursos Agrícolas, Ministerio de Agricultura de Chile. 1956.

.....

REQUISITOS DE AGUA DE LAS PLANTAS

Por requisitos de agua de las plantas se entiende la cantidad de agua necesaria para producir una cosecha determinada. Dentro del concepto general, así definido, es necesario establecer una diferencia entre la cantidad de agua realmente consumida por las plantas, en su mayor parte fuera del control humano, y la cantidad total de agua usada en la finca, que incluye a la primera, y que depende mucho de la eficiencia en los métodos de aplicación del agua en la finca.

La primera porción puede denominarse consumo de agua, en tanto que la segunda puede denominarse dotación de riego.

Consumo de Agua.

El consumo de agua representa la cantidad mínima de agua necesaria para producir una cosecha. Es, en realidad, el agua que la planta usa en su proceso fisiológico de transpiración y de formación de tejidos. Dentro de este concepto se ha incluido también, el agua que se evapora de la superficie del suelo cultivado, por lo cual el consumo de agua ha venido a representar la evapotranspiración.

La Transpiración.- La transpiración es el movimiento del agua, desde el suelo hacia el aire, a través del vegetal. Muchos experimentos se han realizado para obtener la relación que existe entre la cantidad de materia seca producida por las plantas y el agua transpirada por las mismas. Cuando estos valores se expresan en peso, se obtiene el coeficiente de transpiración o "relación de transpiración". La Tabla N° 1 que se inserta a continuación, indica los distintos valores obtenidos por varios autores, en localidades diferentes.

La marcada discrepancia que se observa entre los valores obtenidos en localidades diferentes, está indicando la dificultad que representaría el uso de estos coeficientes para establecer el consumo de agua en una localidad nueva. En realidad,

la transpiración es un fenómeno complejo que es afectado por muchos factores locales, difíciles de valorar cuantitativamente. La presión del vapor en la atmósfera, que está determinada por la temperatura y la humedad del ambiente; las condiciones físicas del suelo, su fertilidad, el nivel de agua que se mantenga en el mismo; la cantidad de luz solar disponible para los procesos metabólicos del vegetal; el ritmo de renovación del aire, que depende de la velocidad del mismo; y la longitud del ciclo vegetativo de las plantas, son algunos de los tantos factores que limitan el uso práctico de estos coeficientes, para valorar el consumo de agua en una nueva localidad.

La tabla 1 muestra, sin embargo, la magnitud del fenómeno e indica la habilidad relativa de las plantas para consumir agua.

La Evaporación.— La evaporación de agua de la superficie del suelo es un fenómeno natural que está gobernado, en general, por los mismos factores físicos que afectan la transpiración. Este fenómeno, sin embargo, se reduce considerablemente, a medida que la humedad del suelo decrece por debajo de la capacidad de campo. El movimiento del agua en el suelo es muy lento, cuando su contenido de humedad está dentro de los límites del agua capilar. Por esta razón, la evaporación de agua de la superficie del suelo es muy escasa en las tierras que tienen un drenaje interno normal y que no poseen una tabla de agua próxima a la superficie.

Ensayos realizados en California, demuestran que la evaporación puede extraer del suelo pequeñas cantidades de agua, proveniente sólo de las 4 ó 5 pulgadas superiores del perfil, y nada, o casi nada, de las zonas más profundas (Ref. 9). Por otra parte, los mismos ensayos demuestran que el cultivo frecuente del suelo tiene poca influencia en el control de las pérdidas de agua por evaporación. (Ref. 8).

Tabla N° 1

Relaciones de transpiración para varias plantas según distintas autoridades (1)

Planta	Lanes y Gilbert - Ingl.	Leather India	Briggs y Shantz Colorado	King Wisconsin	Widtsco Utah	Thom y Helts Washington	Hellriegel Alemania	Von Seelherst Alemania	Wellny Alemania
Alfalfa			1068		446	446			
Trébol rojo	251			557			330		
Trébol dulce			709			484			
Mijo			275						447
Cebada /	258	468	539	464		320	297	365	774
Maíz /		337	369	271	386	249			233
Lino		807							
Avena /		469	614	504	---	352	401		665
Arroz		811							
Centeno			724				337	386	
Trigo /	235	554	507	---	546	432	359	333	546
Cebollas						235			
Papas /			448	385	---	167	---	281	
Remolacha			377		497	262			
Frijoles	209								
Sergo		437	306			240			
Caña de Azúcar		212							

(1) Tomada de Ref. N° 5.

Determinación del Consumo de Agua.— Diversos métodos se han usado en épocas diferentes para determinar el consumo de agua de las plantas, en una localidad dada. Entre los métodos más usuales se pueden indicar los siguientes:

1. **Cultivo de plantas en tanques.**— Este tipo de determinación requiere, generalmente, tanques especiales, localizados en el centro de grandes áreas sembradas con la misma planta que ocupa el tanque, a fin de reproducir, tanto como sea posible las con-

diciones naturales. La precisión del método está condicionada por la habilidad para reproducir esas condiciones naturales, que son afectadas también por la alteración de la estructura del suelo, por el control del nivel de agua en el mismo y por la limitación que puede ocurrir en el desarrollo radicular. Una discusión completa sobre evapotranspirómetros puede encontrarse en la Ref. 6.

2. **Cultivos en parcelas.**- Este sistema consiste en regar periódicamente las parcelas en el campo y determinar la cantidad de agua aplicada y aquella que sale de la parcela como escorrentía. Este sistema conduce a determinaciones de gran valor práctico, siempre que el agua aplicada se dosifique en forma adecuada, para evitar la pérdida de agua por percolación profunda.
3. **Muestreo de suelos.**- Este sistema consiste en tomar muestras periódicas de suelo a profundidades escalonadas, para determinar el contenido de humedad de los mismos. Con esta información puede obtenerse el consumo de agua de las plantas durante el período de duración de la cosecha.
4. **Fórmulas basadas en datos climatológicos.**- Los sistemas antes mencionados tienen el carácter de experimentales. Con el fin de estimar el consumo de agua probable en una nueva localidad, los Ingenieros Blanney y Criddle (Ref. 2) han propuesto una fórmula empírica general de mucho valor práctico.

La fórmula en mención asume que el consumo mensual de agua U_m es una función de la temperatura media mensual (t), del porcentaje mensual de horas de sol en el

año (p) y de las características fisiológicas y culturales del vegetal considerado (k), o sea que

$$U_m = \text{función } (t, p, k)$$

Para desarrollar la fórmula, al producto de t en grados fahrenheit per P, correspondiente a cada mes, se ha denominado factor de consumo mensual (f) y U_m se ha asumido directamente proporcional a este factor, siendo K la constante de proporcionalidad correspondiente. En esta forma:

$$U_m = Kf$$

El consumo total de agua (U) es, entonces, la suma de los consumos mensuales correspondientes al ciclo vegetativo del cultivo que se estudia, o sea que:

$$U = \sum U_m$$

Los valores promedios de K fueron obtenidos experimentalmente después de estudiar la información disponible, en cuanto a consumo de agua, en un gran número de zonas irrigadas en los Estados Unidos. Calculado el valor de $\sum f$ para cada zona, y conocido el valor de U para cada cosecha en dicha zona, el valor de K correspondiente se obtuvo con la fórmula:

$$K = \frac{U}{\sum f}$$

La tabla N° 2 da los valores de K , así obtenidos, para varios cultivos.

Ver Israelson, pag 268

Tabla N° 2

Coefficiente de consumo K para distintas plantas y duración del período vegetativo (1)

Planta	Período de crecimiento en días	Coeficiente de consumo K en cms por cada unidad de f	
Alfalfa	Permanente	2.03	- 2.15
Algodón	120 a 180	1.52	- 1.65
Arroz	90 a 150	2.54	- 3.05
Caña de Azúcar	Permanente	2.29	
Cítricos	Permanente	1.27	- 1.65
Frijol	80 a 120	1.52	- 1.78
Maíz	80 a 200	1.91	- 2.15
Papas	120 a 180	1.65	- 1.91
Pastos (Gram.)	Permanente	1.91	
Tomates	120	1.78	

(1) Adaptada de Ref. 2.

Los valores de P, para cada mes, se ofrecen en la Tabla N° 3, dados en función de la latitud con relación al Ecuador geográfico.

Tabla N° 3

Porcentaje mensual de horas de sol en el año para latitudes entre 0 y 50 grados del Ecuador geográfico (1)

Latitud en grados con respecto al Ecuador geográfico	Latitud Sur											
	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
	Latitud Norte											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
5	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.5	8.4	8.3	8.2	8.1	8.1
10	8.0	8.1	8.4	8.5	8.6	8.7	8.7	8.5	8.4	8.2	8.0	8.0
15	7.8	8.0	8.3	8.6	8.8	8.9	8.9	8.7	8.4	8.1	7.8	7.7
20	7.6	7.8	8.3	8.6	9.0	9.2	9.1	8.8	8.4	8.0	7.7	7.5
25	7.5	7.1	8.4	8.6	9.4	9.3	9.4	9.1	8.3	8.1	7.4	7.4
30	7.3	7.0	8.4	8.7	9.5	9.5	9.7	9.2	8.3	8.0	7.2	7.1
35	7.0	6.9	8.4	8.8	9.7	9.8	9.9	9.4	8.4	7.9	7.0	6.8
40	6.8	6.7	8.3	8.9	10.0	10.1	10.2	9.5	8.4	7.7	6.7	6.5
45	6.4	6.5	8.3	9.1	10.3	10.5	10.5	9.7	8.4	7.6	6.5	6.1
50	6.1	6.3	8.2	9.2	10.6	10.9	11.0	10.0	8.4	7.4	6.2	5.8

(1) Tomada de Ref. 7

Eficiencia de Riego

La Fig. N° 1 presenta en forma esquemática, el curso que sigue el agua en un sistema de riego, desde la fuente de captación hasta cuando es finalmente transpirada por las plantas. La relación que hay entre el agua transpirada y el agua originalmente captada en un proyecto dado, representa la eficiencia total del riego del proyecto. Entre los puntos inicial y final del sistema hay, sin embargo, varias etapas dentro del proceso general del riego, en cada una de las cuales ocurren pérdidas de agua que resulta conveniente valorar en forma separada, por medio de la eficiencia correspondiente a la etapa considerada. La eficiencia total de riego resulta ser, entonces, el producto de las eficiencias parciales correspondientes a cada una de dichas etapas.

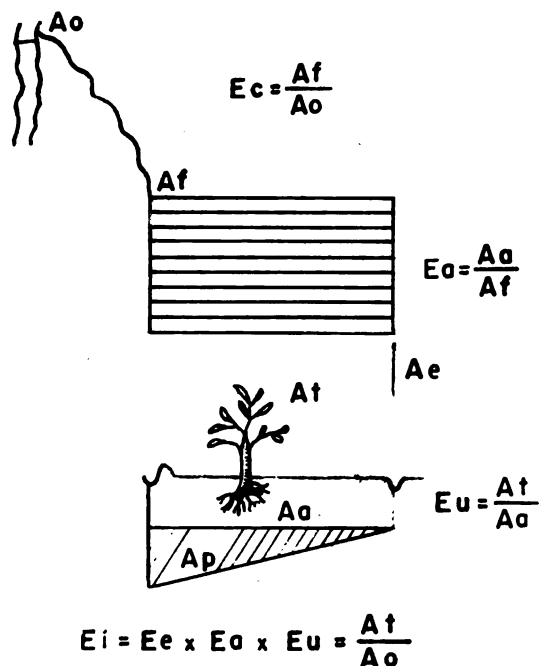


Figura N° 1

Eficiencia de Conducción.— En los canales de conducción de un proyecto de riegos, ocurren pérdidas de agua por evaporación de la superficie, y por infiltración a través de las paredes del canal. La relación que existe entre el agua que el canal entrega a las fincas (A_f) y el agua originalmente captada (A_o), representa la eficiencia de conducción (E_c).

$$E_c = \frac{A_f}{A_o}$$

El agua que se pierde por evaporación de la superficie del canal es, generalmente, muy escasa, en comparación con la que se pierde por infiltración. El volumen de ésta, por otra parte, depende de las condiciones de permeabilidad del lecho del canal y de la forma de la sección del mismo, y puede reducirse considerablemente revistiendo los canales con materiales adecuados de poca permeabilidad, y dando a la sección del canal una forma que asegure mínima infiltración.

Los valores de E_c varían entre 30 y 85 por ciento para canales en tierra, según las condiciones físicas de los mismos.

Eficiencia de Aplicación.— La eficiencia de aplicación (E_a) es la relación entre el agua almacenada en la zona de raíces (A_a) y el agua recibida por la finca (A_f).

$$E_a = \frac{A_a}{A_f}$$

El agua que la finca recibe (A_f) es igual al agua almacenada en la zona de raíces (A_a); el agua que se pierde por escorrentía (A_e) y el agua que se pierde por percolación profunda (A_p), o sea que:

$$E_a = \frac{A_f - (A_e + A_p)}{A_f} = 1 - \frac{A_e + A_p}{A_f}$$

E_a representa, hasta cierto punto, la habilidad del irrigador para aplicar el agua, de manera uniforme y precisa en la zona de absorción de las plantas. El grado de nivelación del terreno; el método de riego que se use; el planeamiento general de la finca, hecho en función de las características físicas y topográficas del suelo, y el manejo y control del agua, durante el riego, son los factores que principalmente determinan el valor de E_a , en una finca dada.

Hay otros factores, como la textura, la estructura y la profundidad del suelo, así como la pendiente del terreno y la cantidad de agua disponible, que también afectan el valor de E_a , pero sobre los cuales el irrigador puede ejercer muy poco control.

Estudios realizados por Israelsen (Ref. 4) en Utah indican que el valor de E_a en ese Estado varía entre 3 y 93 por ciento. Esta amplia variación refleja tanto la habilidad del irrigador para manejar el agua, como las condiciones físicas y topográficas de las fincas en que se realizó el estudio.

Eficiencia de Uso.— La eficiencia de uso (E_u) es la relación entre el agua transpirada por las plantas (A_t) y el agua almacenada en la zona radicular (A_a), o sea que:

$$E_u = \frac{A_t}{A_a}$$

El agua transpirada es igual al agua almacenada en la zona de raíces (A_a) menos el agua que se evapora de la superficie del suelo, sobre cuyo control se puede ejercer muy poca influencia. Afortunadamente el volumen de agua que se evapora del suelo es muy pequeño, como se indicó antes, de tal manera que los valores de E_u son altos, generalmente mayores de 90 por ciento.

Eficiencia de Irrigación.— La eficiencia de irrigación o eficiencia total (E_i), como se indicó antes, es el producto de todas las eficiencias y representa la relación entre el agua transpirada por las plantas (A_t) y el agua captada originalmente en las fuentes de abastecimiento (A_o)

$$E_i; \frac{A_t}{A_o} = \frac{A_f}{A_o} \times \frac{A_a}{A_f} \times \frac{A_t}{A_a}$$

Con base en los valores que se han indicado anteriormente para cada una de las eficiencias estudiadas, los valores de E_i varían entre 0.8%, cuando se reúnen las condiciones más adversas, y 75% cuando convergieran las más óptimas condiciones.

El mejoramiento de la eficiencia total de riego en un proyecto dado puede lograrse aumentando la eficiencia de conducción, por medio del revestimiento de los canales, cuando consideraciones de orden económico así lo justifiquen, y mejorando la eficiencia de aplicación hasta donde las condiciones físicas y topográficas de los suelos lo hagan posible.

Factores que Reducen la Eficiencia.— Trabajos realizados por Israelsen y otros en Utah (Ref. 4) conducen a las siguientes conclusiones, en cuanto a los factores que pueden causar bajas eficiencias de aplicación:

1. Superficies con topografía irregular que provocan el estancamiento del agua en las depresiones y que dificultan la distribución uniforme del agua.
2. Métodos inadecuados para distribuir y aplicar el agua de riego, y sistemas de distribución impropriamente diseñados.
3. Cuando la magnitud del gasto no se ajusta a las condiciones de permeabilidad del suelo: a) Gastos excesivos en suelos poco permeables (escurrimiento) y b) Gastos deficientes en suelos muy permeables (infiltración profunda).
4. Riego de los campos cuando los suelos están todavía húmedos.
5. Aplicación de volúmenes excesivos de agua en un solo riego, sobrepasando la capacidad de almacenamiento del suelo en la zona de raíces.

6. La disponibilidad de agua en forma excesiva, lo que propicia el desperdicio del agua.
7. Falta de atención personal del agricultor durante la operación del riego y en el planeamiento del sistema de distribución.

Todos estos factores pueden controlarse por medio de prácticas adecuadas, como se discute en otras secciones de este manual, para obtener una máxima eficiencia en la aplicación del agua.

Dotación de Riego

La dotación de riego o el requisito de agua para riego, representa la cantidad de agua necesaria en los fundos para producir una cosecha determinada. La dotación de riego incluye toda el agua suministrada al fundo en forma artificial, e incluye, tanto el agua consumida por las plantas, como el agua que se pierde en la finca, ya sea por infiltración profunda o por escorrentía.

En las zonas áridas, donde la precipitación es casi nula, la dotación de riego puede calcularse dividiendo el valor correspondiente al consumo de agua por la eficiencia de aplicación probable en la localidad.

Si llamamos U al consumo y E_a , a la eficiencia de aplicación, la dotación de riego A_r estará dada por la siguiente relación:

$$A_r = \frac{U}{E_a}$$

En las zonas sub-húmedas, la dotación de riego necesaria estará dada por la misma relación menos la precipitación que caiga en el período considerado. Se da un ejemplo en la página siguiente.

Ejemplo. Calcúlese el consumo de agua y la dotación de riego para algodón en las zonas próximas a Lima-Perú
latitud 12°C

Período de siembra: Septiembre-Octubre
Período de cosecha: Abril-Mayo

MES	Temperatura promedio mensual °C	% Luz solar P	Fact. de consumo mensual $f = \frac{t_p}{100}$	Coef. de consumo K	Consumo mensual en cm $Um = f \times K$	Precipitación mensual om	Eficiencia de aplicación $\frac{Ea}{Ea}$	Dotación de riego	
								$Af = \frac{Um}{Ea}$	$\frac{Um}{Ea}$
Septiembre	15.1	8.36	4.95	1.52	7.52	0.02	0.5	15.04	
Octubre	14.9	8.54	5.02	1.52	7.63	Vestigios	0.5	15.26	
Noviembre	16.3	8.68	5.32	1.52	8.09	0.00	0.5	16.18	
Diciembre	19.1	8.78	5.83	1.52	8.86	0.00	0.5	17.72	
Enero	20.7	8.78	6.08	1.52	9.24	0.10	0.5	18.48	
Febrero	22.5	8.58	6.22	1.52	9.45	0.16	0.5	18.90	
Marzo	21.7	8.40	5.97	1.52	9.07	Vestigios	0.5	18.14	
Abril	18.8	8.16	5.37	1.52	8.16	0.00	0.5	16.32	
TOTALES					68.02			136.04	

Datos meteorológicos de la Estación Experimental Agrícola de La Molina - 1955-56

Dotación de Agua en Cada Riego

Como se discutió en el capítulo relacionado con las propiedades físicas de los suelos, la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo en la zona radicular efectiva de una planta dada, puede expresarse en la forma siguiente:

$$Da = \frac{C.C. - C.H.}{100} \times Ga \times Dr$$

Donde: Da = Volumen de agua almacenada, expresada en centímetros de profundidad.

C.C.= Capacidad de campo del suelo, expresada en %.

C.H.= Contenido de humedad del suelo al momento del riego, expresado en %.

Ga = Gravedad específica aparente del suelo.

Dr = Profundidad efectiva del sistema radicular de la planta considerada, expresada en centímetros.

El valor de Da, multiplicado por el área de riego, representa, así, el volumen teórico de agua que debe aplicarse en cada riego. Este producto debe dividirse por la eficiencia de aplicación correspondiente para obtener el volumen total necesario.

Duración del Riego

El tiempo necesario para aplicar un volumen dado de agua estará en función del gasto disponible. La siguiente expresión representa esta relación que existe entre la duración del riego (T); el gasto utilizado (Q); el área de riego (A), y la profundidad de agua regresada (Da):

$$T \times Q = A \times Da$$

Si A se expresa en hectáreas; Da en centímetros y Q en litros por segundo; el valor de T, en horas, se expresa en la forma siguiente:

$$T = 27,8 \frac{A Da}{Q}$$

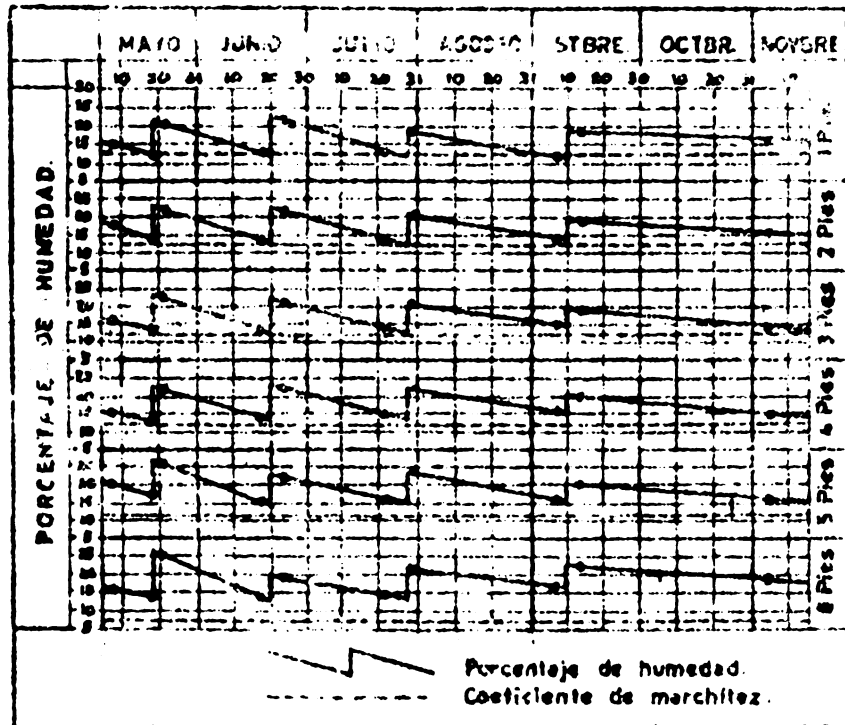
La manera de establecer el caudal conveniente para los distintos métodos de riego, según el tipo de suelo y según la pendiente, se discute detalladamente en el capítulo relacionado con los Métodos de Riego.

Frecuencia de los Riegos

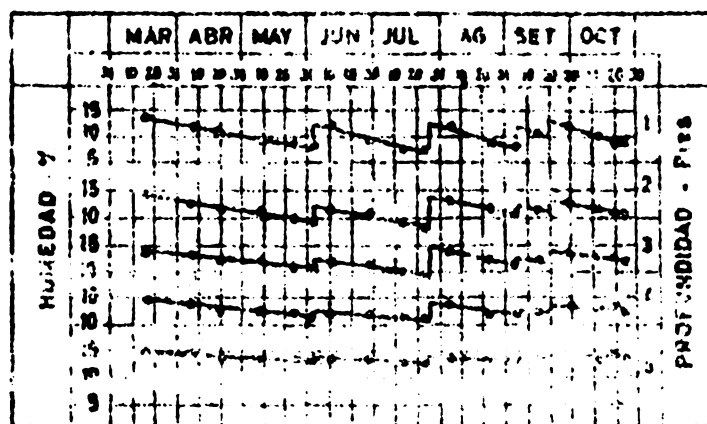
La frecuencia de los riegos, o sea, el tiempo que debe transcurrir entre una aplicación de agua y la siguiente, varía según el consumo de agua de las plantas consideradas y según la capacidad de almacenamiento del suelo.

El consumo de agua, como se explicó anteriormente, varía con el clima y con el estado de desarrollo de las plantas. Por esta razón la frecuencia de riegos no puede considerarse como un período uniforme durante toda la vida del vegetal, sino que, por el contrario, cada riego debe aplicarse cuando la planta lo requiera, esto es, cuando el contenido de humedad del suelo se aproxime al coeficiente de marchitez. La fig. N° 2 ofrece una representación gráfica de las variaciones de humedad en el suelo, en relación con el tiempo para un cultivo de alfalfa bajo riego, en California, y el espaciamento entre las épocas de riego.

En el capítulo relacionado con las Propiedades Físicas del Suelo, se discutieron varios métodos para determinar la humedad del suelo en el campo. Cualesquiera de estos métodos puede constituir un índice adecuado para establecer el momento en que debe regarse.



Variación periódica de la humedad del suelo en un cultivo de alfalfa en California
Tomado de Ref 3.



Variación periódica de la humedad del suelo en un cultivo de cítricos
Tomado de Ref 3.

FIGURA Nº 3.

El agricultor práctico usa algunos índices asociados con la apariencia de las plantas, principalmente los cambios en la intensidad de la coloración y la turgencia de las hojas. La alfalfa, por ejemplo, presenta un tono verde oscuro, cuando existe deficiencia de agua en el suelo; los cereales y la remolacha azucarera presentan síntomas de marchitez temporal durante el período más caluroso del día; el algodón presenta sus hojas ampergaminadas y de color rojizo, cuando la humedad del suelo se aproxima al coeficiente de marchitez.

Actualmente se desarrollan algunos trabajos (Ref. 1) para determinar la época de riego con base en el grado de apertura que presenten los estomas de las plantas.

Un método aproximado para determinar la frecuencia de los riegos, con el fin de anticipar de manera grosera la distribución del agua, puede adaptarse con base en la determinación del consumo de agua de las plantas, según se explicó en párrafos anteriores. Si se conoce el volumen de agua almacenado en la zona de raíces del suelo y se estima el consumo diario de agua de las plantas, el período transcurrido entre uno y otro riego puede estimarse por medio de la siguiente relación:

$$T = \frac{(C.C. - C.H.) Ga \times Dr}{100 \times U_d}$$

- Donde: C.C. = Capacidad de campo del suelo en %
 C.H. = % de humedad mínimo que se quiere dejar en el suelo, mayor que el coeficiente de marchitez.
 Ga = Gravedad específica aparente,
 Dr = Profundidad de la zona de raíces en centímetros.
 U_d = Consumo de agua en centímetros por día, correspondiente al mes que se considera.
 T = Tiempo entre dos aplicaciones consecutivas, en días.

Ejemplo.- Determínese de manera aproximada el tiempo que debe transcurrir entre dos riegos consecutivos para algodón en La Molina, asumiendo un suelo con C.C. = 12%; C.M. = 5% y $G_a = 1.8$, en el mes de Marzo. El contenido de humedad del suelo no debe ser inferior a 7%.

Solución:

El consumo de agua aproximado en el mes de Marzo es de 9.1 centímetros de agua (ejemplo anterior) por mes. El consumo diario aproximado será de:

$$9.1/30 = 0.3 \text{ cm/día}$$

$$T = \frac{(12 - 7) \times 1.8 \times 100}{0.3 \times 100} = 30 \text{ días}$$

Ejemplo.- Asumiendo una eficiencia de aplicación (E_a) de 50%, determínese el volumen de agua que debe aplicarse en cada riego.

Solución:

El volumen de agua necesario, expresado en centímetros de profundidad (D_a) será:

$$D_a = \frac{(12 - 5) \times 1.8 \times 100}{100 \times 0.5} = 25 \text{ cm}$$

Ejemplo.- Asumiendo que se dispone de un gasto de 7.5 L/seg. y que se regaran surcos de algodón de 100 metros de largo espaciados a 1.20 metros. ¿Cuál será el tiempo necesario para el riego, si el gasto necesario en cada surco es de 1.5 L/seg. y el volumen de agua necesario el que se calculó en el ejemplo anterior?

Solución:

El número de surcos que podrán regarse simultáneamente será de $7.5/1.5 = 5$ surcos.

El área total que va a regarse será, entonces, la siguiente:

$$A = \frac{5 \times 100}{10000} = 0.05 \text{ Hectáreas}$$

El tiempo necesario para el riego será:

$$T = 27.8 \frac{0.05 \times 25}{7.5} = 4.6 \text{ Horas}$$

REFERENCIAS

1. ALVIM, PAULO de T. Estudios Preliminares Sobre el Diagnóstico de la Falta de Agua por Medición de la Apertura de los Estomas. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Zona Andina. 1954 (Mimeografiado).
2. BLANNEY, H. F. and CRIDDLE, W. D. A method of Estimating Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological Data. U.S. D.A. Soil Conservation Service. 1947. (Mimeographed).
3. ISRAELSEN, O. W. Irrigation Principles and Practices. John Wiley and Sons, Inc., New York. 1952. 405 P.
4. _____, CRIDDLE, W. D. and OTHERS. Water Application Efficiencies in Irrigation. Utah State Agricultural College. Bulletin 311. 1944. 55 P.
5. ROE, H. B. Moisture Requirements in Agriculture - Farm Irrigation. McGraw Hill Book Co. New York. 1950.
6. THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY. The Measurement of Potential Evapo-Transpiration. Publications in Climatology. Vol. VII. N° 1. 1954.
7. UNITED STATES WEATHER BUREAU. Sunshine Tables. U.S.W.B. Bulletin 805. 1954.
8. VEIHMAYER, F. J. Some Factors Affecting the Irrigation Requirements of Deciduous Orchards. Calif. Agric. Exp. Sta. Hilgardia. Vol. 2 N° 6. 1927.
9. _____ Evaporation from Soils and Transpiration. Trans. American Geoph. Union. (19th Annual Meeting).
10. _____ La Humedad del Suelo y su Aprovechamiento por las Plantas. Departamento de Conservación de Recursos Agrícolas. Ministerio de Agricultura de Chile. 1956. 86 p. (Mimeografiado).
11. ETCHEVERRY, B. A. and HARDING, S.T. Irrigation Practice and Engineering. Volume I. Use of Irrigation Water and Irrigation Practice. New York. McGraw Hill Book Co. Inc. 1933. 256 p.

---.---.---.

MÉTODOS DE RIEGO

El objetivo de todo método de riego es distribuir el agua de riego en los campos de cultivo, de tal manera que el suelo pueda humedecerse uniformemente hasta la profundidad radicular efectiva del vegetal cultivado, en toda la extensión del campo que se riega. Todo método de riego, por otra parte, debe permitir el control adecuado del agua desde las acequias principales hasta el sistema radicular del cultivo, a fin de aplicar solamente el agua necesaria en el momento oportuno.

Existen varios métodos de riego, que satisfacen en forma más o menos adecuada los requisitos anteriores. Estos métodos pueden clasificarse en la forma siguiente:

I. MÉTODOS SUPERFICIALES

A. Inundación

1. Desbordamiento

- a) Zanjas en contorno
- b) Zanjas normales a las curvas de nivel

2. Platabandas o melgas con bordos

3. Secciones grandes de inundación

- a) Rectangulares
- b) En contorno

4. Secciones pequeñas o tazas

B. Surcos

1. Surcos profundos

2. Surcos en contorno

3. Surcos de poca profundidad (corrugación)

II. METODOS SUBTERRANEOS

- A. Zanjas laterales
- B. Tubos subterráneos
- C. Natural (filtraciones de zonas más elevadas).

III. METODOS DE ASPERSION

- A. Aspersión en círculos
 - 1. Aspersores rotatorios
 - 2. Aspersores fijos
- B. Aspersión en rectángulos
 - 1. Tubo aéreo perforado
 - 2. Tubo superficial perforado

La Fig. N° 1 representa el sistema de distribución de aguas de un fundo, en donde se ilustran varios métodos de riego.

La selección del método de riego más adecuado dependerá principalmente de los siguientes factores: La topografía, el suelo, el cultivo, el gasto de agua disponible, el costo inicial y el costo de operación del sistema. Con base en estos factores se discutirá a continuación la adaptabilidad y las limitaciones de los distintos métodos.

Métodos Superficiales

Cualquier método de riego que se emplee, requiere como trabajo preliminar, la preparación de la tierra para el riego. Este trabajo implica la deforestación del área considerada y la nivelación de la misma.

La deforestación implica la remoción de toda la vegetación natural existente, a fin de hacer posibles las prácticas futuras de cultivo. La nivelación de la tierra, por otra par-

te, consiste en el emparejamiento de la misma, a fin de evitar pozos y montículos o pendientes excesivas, para asegurar una distribución uniforme de las aguas de riego. Tanto una como otra operación, son en ocasiones muy costosas, por lo cual requieren un planeamiento adecuado, según se discutirá en capítulos posteriores.

Riego por Desbordamiento.- Este es un método rudimentario de riego que cada día entra más en desuso, a medida que el agricultor se familiariza con los inconvenientes que presenta y a medida que el valor del agua, de la tierra y de la mano de obra se hacen más caros.

El método consiste en elevar el agua hasta el campo por medio de zanjás más o menos equidistantes que arrancan de una acequia de cabecera. Las zanjás pueden hacerse siguiendo el contorno del terreno, en cuyo caso la distancia entre ellas va riará según la configuración topográfica del terreno, o siguiendo la pendiente, en cuyo caso pueden hacerse paralelas. La Fig. N° 2 muestra las características generales del riego por desbordamiento.

Cuando las zanjás se trazan en el sentido de la pendiente, se aumenta la dificultad para controlar y distribuir el agua, ya que ésta tiende a correr a lo largo de dichas zanjás. La velocidad del agua en estas zanjás, puede ser muy alta y puede producir serios problemas de erosión. Además, el agua, en estas condiciones, tiende a fluir hacia las partes bajas del campo, creándose también, problemas de drenaje.

El riego por desbordamiento se adapta a cualquier tipo de suelo y al cultivo de pastos o de granos pequeños, y ofrece menos dificultades para el control del agua, cuando las zanjás se hacen en contorno y cuando la pendiente máxima del terreno es menor que 12%.

La distancia entre las sanjas varía entre 15 y 50 metros, según el suelo y según la pendiente. En suelos muy permeables y con escasa pendiente, se emplea la distancia mínima. Esta distancia será mayor a medida que aumenta la pendiente y disminuye el índice de infiltración del suelo.

Las limitaciones de este método de riego pueden resumirse en la forma siguiente:

- a) Baja eficiencia de aplicación y gasto excesivo de agua.
- b) Poca uniformidad en la distribución del agua.
- c) Costo elevado de operación, porque requiere mucha mano de obra.

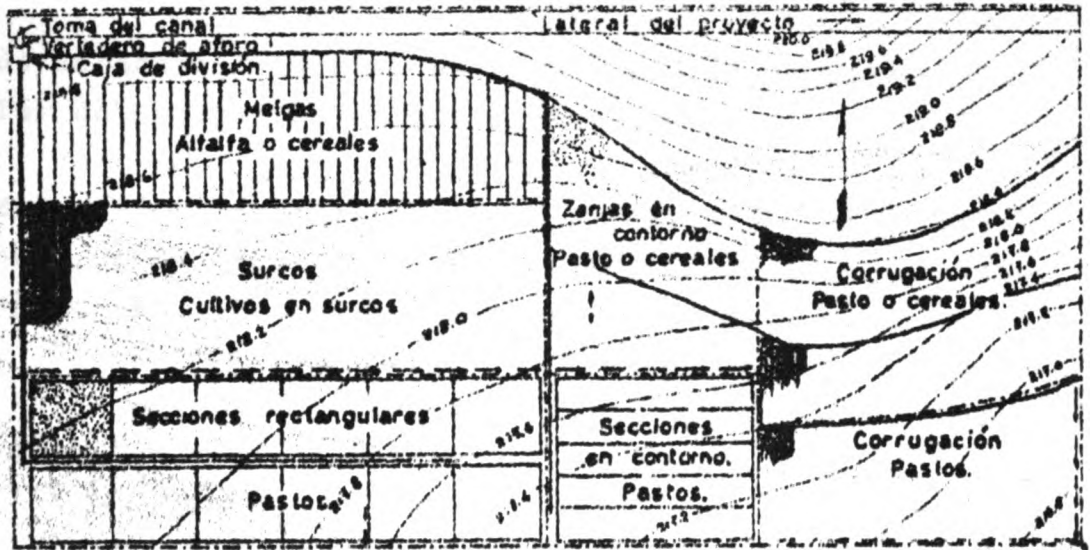
Cuando las sanjas se hacen en el sentido de la pendiente, hay las siguientes limitaciones adicionales:

- a) Peligro de erosión.
- b) Problemas de desagüe en las partes bajas del campo.
- c) Mayor dificultad para el control del agua.

A pesar de estas limitaciones, el método ha contado con las simpatías de muchos agricultores, debido al bajo costo inicial que implica la adopción del sistema y porque no requiere trabajos previos de nivelación. Este método está más difundido en las zonas donde el agua y la mano de obra son abundantes y baratos, y donde la tierra tiene poco valor.

Riego por Melgas con Bordos.— Este método constituye una de las formas más eficientes de aplicar el agua de riego, cuando las condiciones de suelo, cultivo, caudal de agua disponible y topografía, lo hacen posible.

El método consiste en dividir el terreno en fajas rectangulares por medio de bordos o caballones, paralelos y equidistantes. El agua se aplica en la parte superior de estas fajas por medio de cajas de aplicación o de sifones, desde las ace-



- Límite de los campos.
- ===== Acequia de abastecimiento.
- Acequias de abecera.
- Zanja de desagüe.
- ===== Bordos.
- Curvas de nivel antes de la nivelación.

FIG N°1 Sistema de distribución de aguas en un fundo.
Adaptado de Ref. 13.

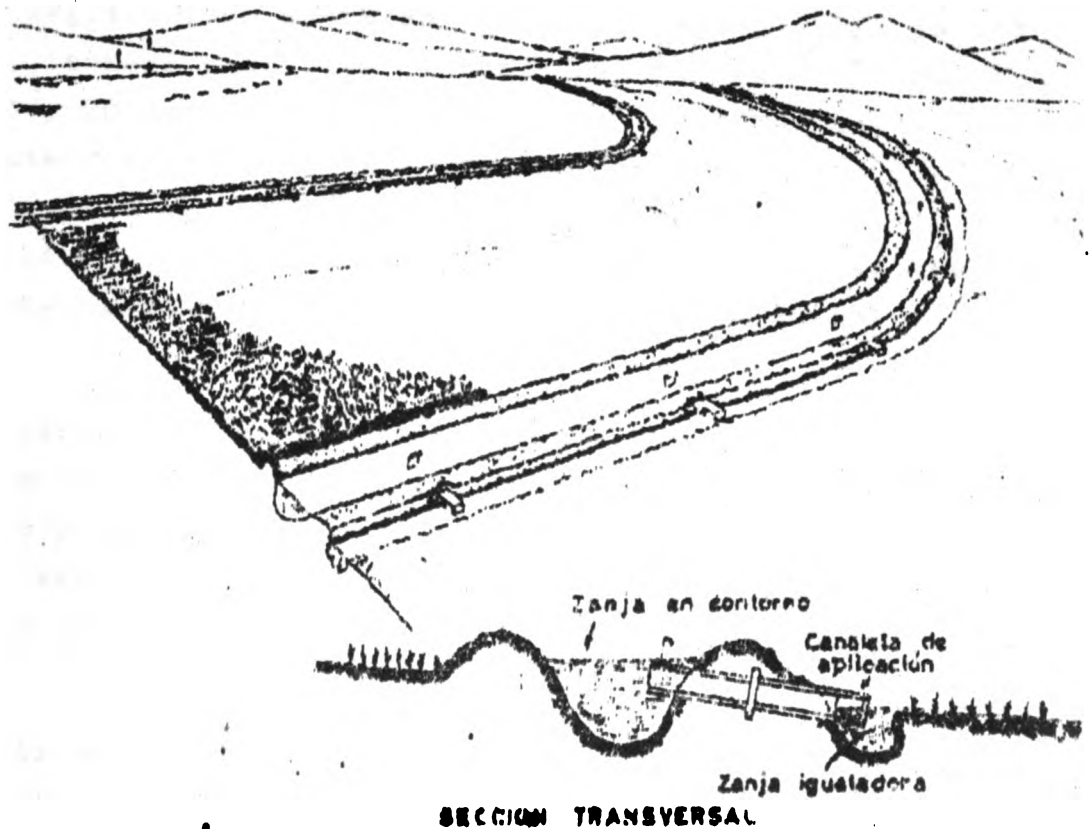


FIG N°2. Riego por desbordamiento con zanjas en contorno.

1

quias de cabecera. La Fig. N° 3 muestra las características generales del riego por melgas o platabandas.

Este método se adapta bien a todos los tipos de suelos irrigables, pero opera mejor en los suelos de textura media, y se emplea más corrientemente en el riego de pastos y de cereales. Es un método altamente eficiente, pero requiere un buen trabajo previo de nivelación. La pendiente longitudinal de las platabandas debe ser uniforme y menor que 1.5%, siendo preferible una pendiente próxima a 0.2%. La pendiente transversal debe ser nula, a fin de asegurar una distribución uniforme del agua, ya que cuando existe algún declive transversal, el agua tiende a encauzarse por el lado más bajo de la platabanda, causando exceso de aplicación en este lado y un riego deficiente en el lado opuesto.

La longitud y el ancho de las melgas varía según la pendiente del terreno y el tipo de suelo, entre 100 y 400 metros y entre 10 y 20 metros, respectivamente. Mientras mayor sea la pendiente y menos pesada la textura, menores serán las dimensiones indicadas. El gasto de agua en cada platabanda varía entre 14 y 280 litros por segundo, siendo mayor en los suelos con menor pendiente y con mayor coeficiente de infiltración.

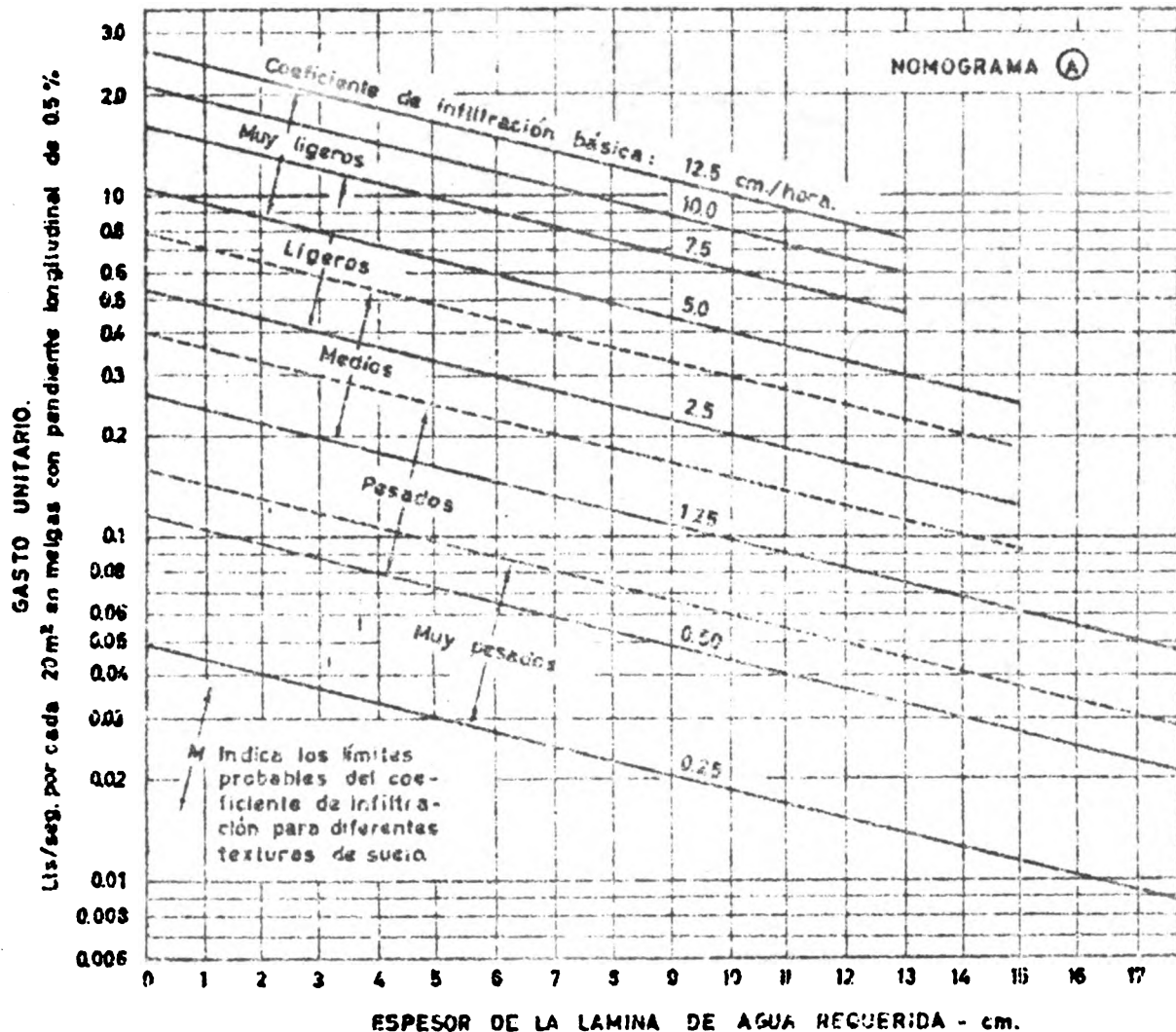
El gráfico de la Fig. N° 4 permite determinar el gasto unitario requerido para el riego por melgas, en función del tipo de suelo y de la pendiente, y la tabla N° 1 permite dimensionar las melgas en función de la textura del suelo, de su pendiente y del volumen de aplicación de agua requerido en cada riego.

Cuando este método se emplea en terrenos bien nivelados, la eficiencia de aplicación es máxima y el gasto de mano de obra mínimo.

Al final de este manual se incluye el ejercicio N° 5 que explica un método de evaluación del método de riegos por melgas o platabandas.

Riego por Secciones Grandes de Inundación.- Este método de riego es similar al método de platabandas descrito anteriormente, diferenciándose de éste en cuanto al sistema de aplicación del agua. En las platabandas el agua avanza en la forma de un manto a lo largo de la faja, en tanto que en las secciones de inundación el agua se aplica en forma rápida, usando para ello un caudal considerable de agua. En esta forma las secciones quedan inundadas por un período de tiempo más o menos largo, según el índice de infiltración del suelo.

Este método se adapta muy bien a los suelos muy permeables, en donde la aplicación lenta del agua causaría pérdidas considerables por percolación, o a los suelos muy pesados que requieren un tiempo considerable para la infiltración del agua. Se emplea en cultivos de pastos y de cereales, pero es más frecuente y casi el único método empleado en el cultivo de arroz.



Nota.- Para pendientes diferentes de 0.5 %, multiplíquese el gasto por el factor de corrección del nomograma B

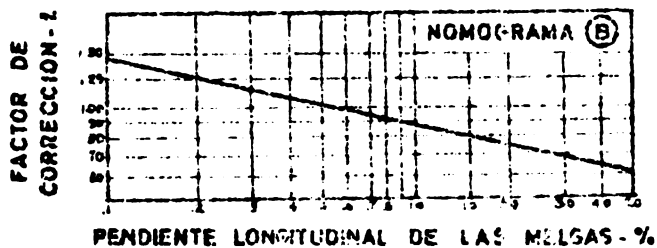
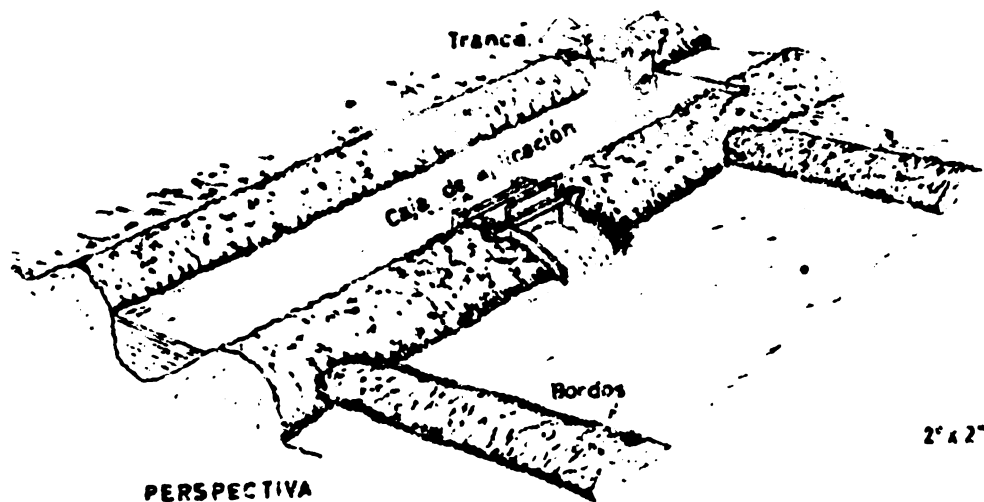


FIG. N° 4. Nomogramas para estimar el gasto unitario en el riego por melgas.

Adaptado de Ref. 1.



PERSPECTIVA



POSICION DE LA CAJA DE APLICACION

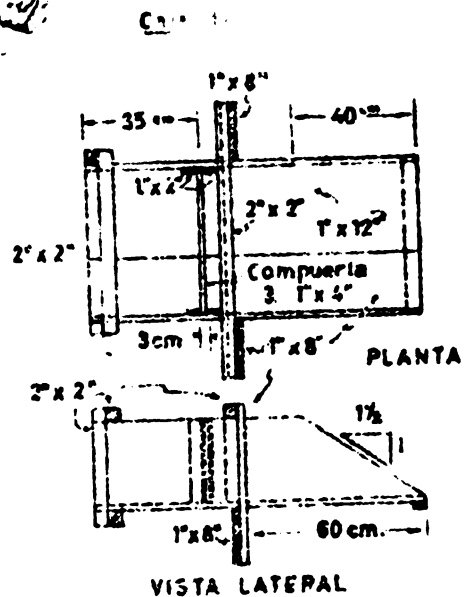


FIG. N° 3. Riego por melgas. (Tomado de Ref. 14.)

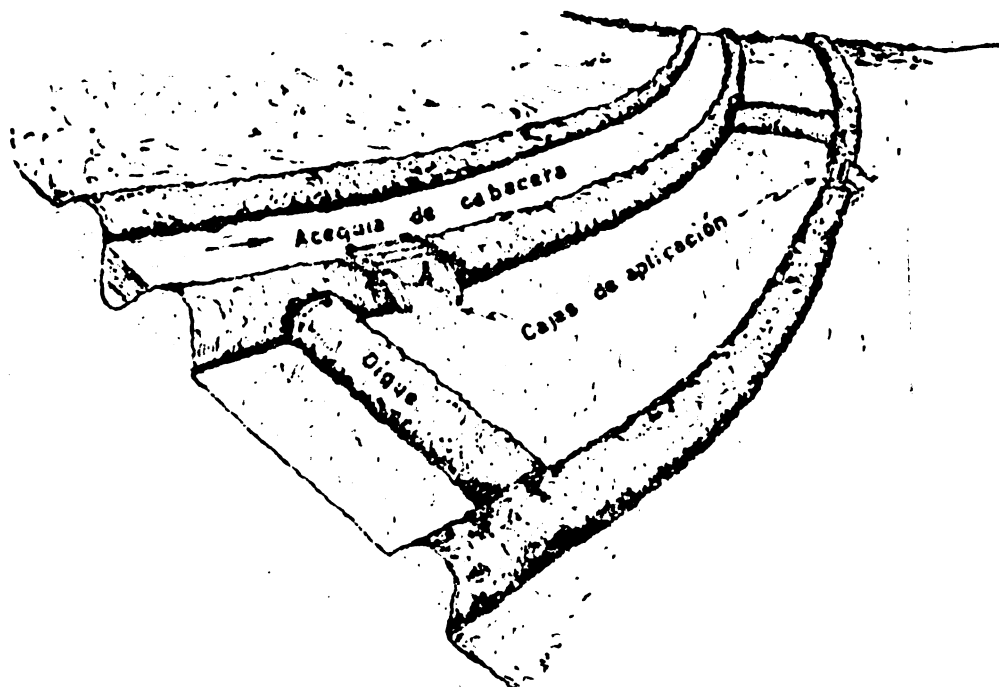


FIG. N° 9. Inundación por secciones grandes en contorno.

Tabla N° 1

Dimensiones recomendables para melgas de riego en función de la textura del suelo, de la pendiente y del volumen de aplicación de agua necesario en cada riego

Textura del suelo	Pendiente del terreno en %	Profundidad de aplicación en cm	Tamaño recomendable para las melgas		Gasto recomendable en L/seg
			Largo (m)	Ancho (m)	
Gruesa	0.25	5	150	15	225
		10	245	15	200
		15	400	15	170
	1.00	5	90	12	35
		10	150	12	70
		15	275	12	70
	2.00	5	60	9	35
		10	90	9	30
		15	185	9	30
Media	0.25	5	245	15	200
		10	400	15	170
		15	400	15	100
	1.00	5	150	12	70
		10	305	12	70
		15	400	12	70
	2.00	5	90	9	30
		10	185	9	30
		15	305	9	30
Fina	0.25	5	400	15	115
		10	400	15	70
		15	400	15	40
	1.00	5	400	12	70
		10	400	12	35
		15	400	12	20
	2.00	5	400	9	30
		10	400	9	30
		15	400	9	20

La pendiente máxima del terreno en donde este método es practicable no pasa del 2% y los mejores resultados se obtienen con pendientes menores de 0.5%. En los arrozales, que permanecen inundados la mayor parte de su ciclo vegetativo, la diferencia de nivel entre dos bordos sucesivos debe ser de unos

4 centímetros, para asegurar un espesor adecuado de la lámina de agua en el área de cada sección. En los arrozales, el área recomendable de cada sección es de unos 2000 a 8000 metros cuadrados.

Las secciones pueden ser de área rectangular, cuando los terrenos tienen una pendiente uniforme, o irregulares, cuando la topografía es irregular y los bordes siguen las curvas de nivel.

Este método requiere un buen trabajo previo de nivelación y grandes caudales de agua, especialmente cuando los suelos tienen un alto coeficiente de infiltración.

La Fig. N° 5 ilustra las características principales de este método de riego.

Riego por Secciones Pequeñas o Tazas.- Este método es esencialmente igual al que se describió anteriormente, diferenciándose de aquél en que las secciones limitadas por los bordes son más pequeñas. El método se usa, principalmente, en cultivos de frutales, haciendo una taza para cada árbol. En los terrenos más planos, cada taza puede contener tres o más árboles. La Fig. N° 6 ilustra este método de riego, que ofrece una alta eficiencia de aplicación, siendo altos su costo inicial y su costo de operación.

Método de Riego por Surcos

Este método es uno de los más universalmente usados en los cultivos que se plantan en surcos y presenta también un uso frecuente en el riego de frutales. Los surcos usualmente se construyen en el sentido de la inclinación del terreno, cuando las pendientes no son excesivas, para evitar el desbordamiento lateral del agua y ejercer un mayor control sobre ésta. Cuando las pendientes son muy pronunciadas, se emplean los surcos en contorno para evitar el peligro de erosión del suelo.

Para planear un sistema de riegos por medio de surcos, deben tenerse en consideración la pendiente del terreno, las

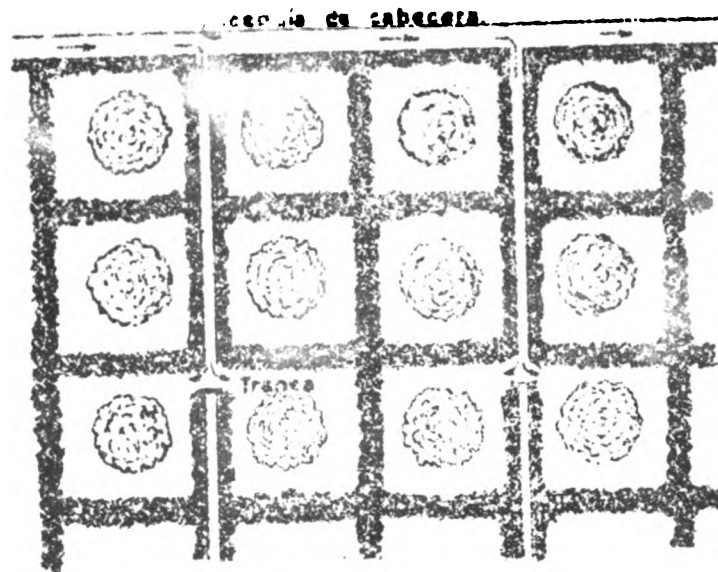
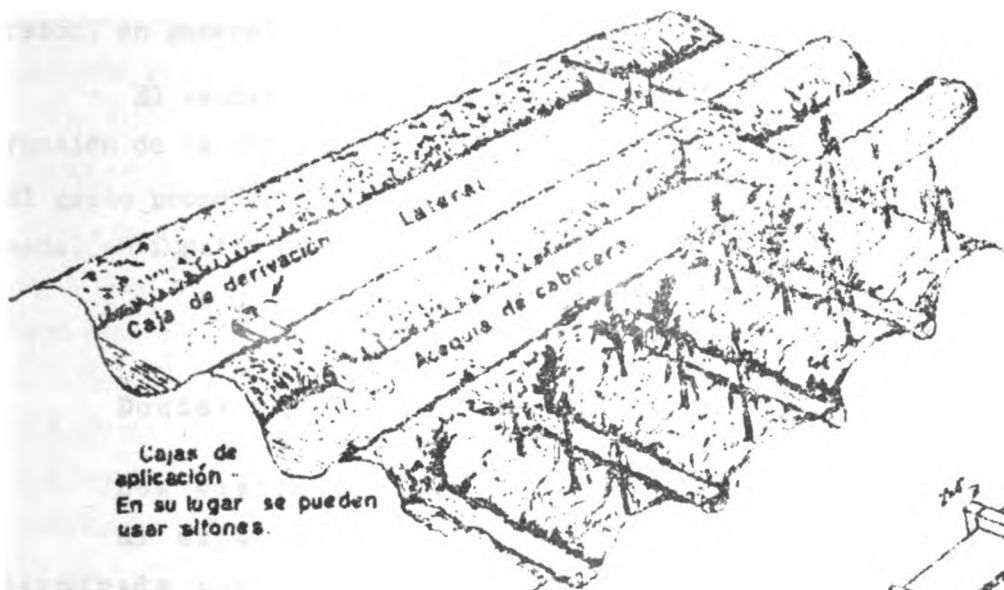
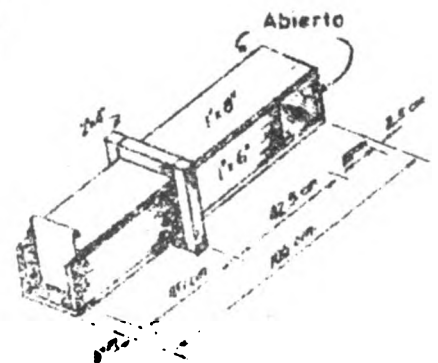


FIG. N° 6. Riego por tazas en frutales.

Tomado de Ref. 12.



Cajas de aplicación - En su lugar se pueden usar silones.



CAJA DE DERIVACION

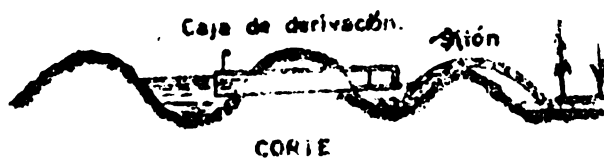


FIG N° 7. Riego por surcos.

Ref. 14.

características físicas del suelo, el caudal de agua disponible y la clase de cosecha que va a cultivarse. Estos son los factores principales que determinan la longitud y el espaciamiento entre los surcos, y el caudal máximo de agua que debe darse a cada uno para no causar erosión del suelo.

Las pendientes en que puede aplicarse el riego por surcos van desde 0 hasta 15%, pero opera más eficientemente en pendientes menores del 1%.

La longitud máxima que debe darse a los surcos de riego depende principalmente del coeficiente de infiltración del suelo y del gasto máximo permisible, que está a su turno subordinado por la pendiente y por el grado de erodabilidad del suelo. Mientras menor sea el grado de infiltración y mayor el caudal de agua permisible, mayor podrá ser la longitud del surco. Por esta razón, en general, los suelos pesados admiten surcos más largos.

El caudal de agua máximo que puede aplicarse en cada surco, está en función de la pendiente del terreno y del grado de erodabilidad del suelo. El gasto promedio máximo para todos los suelos puede estimarse en forma aproximada, en función de la pendiente, por medio de la fórmula siguiente (Ref. 1).

$$Q = \frac{38}{S}$$

Donde: Q = Gasto para cada surco en lts/min.
S = Pendiente del terreno en %.

Los suelos pesados admiten gastos mayores y viceversa.

El espaciamiento entre los surcos está principalmente determinado por la distancia entre las hileras, cuando se trata de cultivos en surcos. Cuando el cultivo es de frutales, el espaciamiento entre los surcos está subordinado por las características de transmisión de agua del suelo. En los suelos arenosos el agua tiene muy escaso movimiento lateral, el cual es mayor en los suelos más pesados. Por esta razón los suelos arcillosos admiten espaciamientos mayores que los suelos ligeros.

La tabla N° 2 da valores promedios para la longitud y el gasto máximos, permisibles en los surcos, en función de la pendiente y de la textura del suelo.

Tabla N° 2

Longitud y caudal máximos recomendables en surcos de riego, según la pendiente y la textura del suelo (1)

Pendiente del surco en %	Caudal máximo permisible en L/min	Longitud de los surcos en metros según textura								
		Gruesa			Media			Fina		
		Espesor de la lámina de agua necesaria en un riego en cm								
		5	10	15	5	10	15	5	10	15
0.25	150	150	220	265	250	350	440	320	460	535
0.50	75	105	145	180	170	245	300	225	310	380
0.75	50	80	115	145	140	190	235	175	250	305
1.00	35	70	100	120	115	165	200	150	230	260
1.50	25	60	80	100	95	130	160	120	175	215
2.00	20	50	70	85	80	110	140	105	145	185
3.00	10	40	55	65	65	90	110	80	120	145
5.00	7	30	40	50	50	70	85	65	90	105

- (1) El ejercicio N° 4 al final de este manual presenta un método práctico para determinar en el campo los valores arriba tabulados.

La Fig. N° 7 presenta las características principales del método de riego por surcos e ilustra el sistema para operar el método. El agua es aplicada a los surcos desde una reguera, o directamente desde la acequia de cabecera, por medio de sifones, montados sobre el banco de la acequia, o por medio de canaletas de aplicación, a través de los mismos, o simplemente rompiendo con una pala las regueras, en la dirección de cada surco. Aún cuando los sifones tienen un costo inicial más alto, son el medio más adecuado para ejercer control sobre el agua, con un costo de operación relativamente bajo. Las canaletas de aplicación requieren mucha mano de obra y la rotura de las regueras, además del consumo de trabajo humano, ofrece muy poco control sobre el agua de riego.

En ocasiones, en lugar de la acequia de cabecera se usa una canoa de madera para conducir el agua de riego. La canoa está provista de orificios laterales con compuertas de regulación en la dirección de cada surco, lo cual resulta un método

muy apropiado para controlar el agua.

Los surcos de poca profundidad y estrechamente espaciados, constituyen el método de corrugación que se emplea principalmente en cultivos de frutales, o como complemento del método de riegos por melgas, cuando el terreno está aún desprovisto de vegetación. El método de riego por corrugación para frutales, se emplea principalmente en áreas bastante planas y sigue, en general, los mismos principios discutidos para el riego por surcos.

Resumen de los Métodos Superficiales

Para facilitar la comparación de los distintos métodos superficiales de riego se incluye la Tabla N° 3, que presenta en forma resumida la adaptabilidad y las limitaciones de los varios métodos discutidos.

Métodos Subterráneos

Estos métodos consisten en aplicar el agua de riego de abajo hacia arriba, por capilaridad y sin humedecer casi la superficie del suelo. Son muy escasas las áreas en donde estos métodos puedan aplicarse con éxito, por cuanto se requieren condiciones especiales en cuanto a la textura y al perfil del suelo, y en cuanto a la posición de la tabla de agua, para hacerlos posibles. Tales condiciones pueden resumirse en la forma siguiente:

1. Suelos con buena permeabilidad, ligeros, que permiten un movimiento rápido del agua capilar.
2. La presencia de un horizonte impermeable a poca profundidad, a fin de evitar las pérdidas por percolación y para asegurar el movimiento lateral del agua.
3. Un sistema efectivo de desagües que evite la inundación eventual de los campos de cultivo.

Tabla N° 3

Adaptabilidad y limitaciones de los métodos superficiales de riego (1)

Método	Adaptación	Limitaciones	Observaciones
Zanjas en contorno	Pendiente: hasta 12% Suelos: todos los suelos irrigables. Cultivos: pastos y cereales pequeños.	Requiere mucha mano de obra. La eficiencia de aplicación es baja. Ofrece peligros de erosión	Requiere poca nivelación del terreno. El costo inicial es bajo.
Melgas	Pendiente: hasta 1.5% mejor 0.2% Suelos: todos los suelos irrigables. Cultivos: pastos y cereales pequeños.	Requiere buena nivelación. Requiere corrosión longitudinal cuando no hay suficiente cobertura.	Idel para riego de cultivos mencionados, cuando la topografía lo permite. Alta eficiencia de aplicación. Diferencia de nivel entre bordes debe ser menor que 6cm.
Secciones de inundación	Pendiente: menores que 1% Suelos: muy ligeros o muy pesados. Cultivos: arroz en los suelos pesados.	Requiere buena nivelación y un alto caudal de agua disponible.	Se usa principalmente en cultivos de arroz. Se recomienda un área para cada sección entre 2,000 y 8,000 m ² .
Tazas	Pendiente: 0.2% Suelos: con coeficientes de infiltración muy altos o excesivamente bajos. Cultivos: frutales	Requiere buen trabajo de nivelación.	Las tazas pueden construirse en terrazas para reducir el movimiento de tierra en terrenos pendientes.
Surcos ordinarios	Pendientes: menores de 1%. Preferibles menores de 0.15% Suelos: todos los suelos irrigables Cultivos: cultivos en surcos, hortalizas y frutales.	Requiere buen trabajo de nivelación, especialmente en cultivos de hortalizas.	La eficiencia de aplicación es relativamente alta en sistemas bien planeados. En cultivos en surcos y frutales el trabajo de nivelación puede ser menos preciso, cuando las pendientes son mayores de 0.4% .

(1) Preparada con base en las Refs. Nos. 8 y 11

Método	Adaptación	Limitaciones	Observaciones
Surcos en contorno	Pendiente: entre 2 y 25%, mejor en pendientes menores que 8% Suelos: todos los suelos irrigables Cultivos: cultivos en surcos y frutas.	Ofrece peligro de erosión en terrenos muy pendientes. No es conveniente en suelos que se cuartejan fácilmente. Dificultad para las labores culturales y de cosecha.	Los surcos deben tener una pendiente entre 0.5 y 1.5%. No requiere mucho trabajo de nivelación.
Corrugación	Pendientes: entre 0.5 y 12%. Suelos: todos los suelos irrigables Cultivos: pastos y cereales.	Requiere mucha mano de obra. Favorece deterioro del equipo de cosecha.	Se adapta principalmente a terrenos pendientes, y cuando se dispone de un escaso caudal de agua.

Resumen de los Métodos Superficiales

Para facilitar la comparación de los distintos métodos superficiales de riego se incluye la tabla N° 3 que presenta en forma resumida la adaptabilidad y las limitaciones de los varios métodos discutidos.

Aún en las más óptimas condiciones, los métodos de riego subterráneos ofrecen el peligro de provocar la acumulación de sales nocivas en la superficie del suelo. Por las razones expuestas, tales métodos son de muy poca aplicación.

Implementos para el Control del Agua en Surcos y Melgas de Riego.

A fin de ejercer un control adecuado del agua durante la práctica del riego, resulta conveniente aplicar el agua a los surcos o las melgas de riego por medio de algún dispositivo que asegure una distribución uniforme del riego.

Los dispositivos más corrientemente usados son los sifones y las canaletas de aplicación, para los surcos y las melgas y las cajas abiertas de aplicación, usadas principalmente en las melgas o en las secciones grandes de inundación.

Los sifones son tubos, de lata, de aluminio o de plástico, contruídos en forma curva para que monten sobre los bancos de las acequias de aplicación o de las regueras. En el riego por surcos se coloca uno o más sifones en cada surco, según el gasto que se necesite en los mismos. La Fig. N° 8 presenta un nomograma para estimar el gasto de los sifones.

Las canaletas de aplicación son tubos de sección cuadrada, contruídos de madera según se ilustra en la Fig. N° 7 y el gasto de las mismas se indica en la Fig. N° 9. Estas canaletas, lo mismo que los sifones se colocan en la cabecera de cada surco y en ocasiones sirviendo a dos o más surcos en forma simultánea.

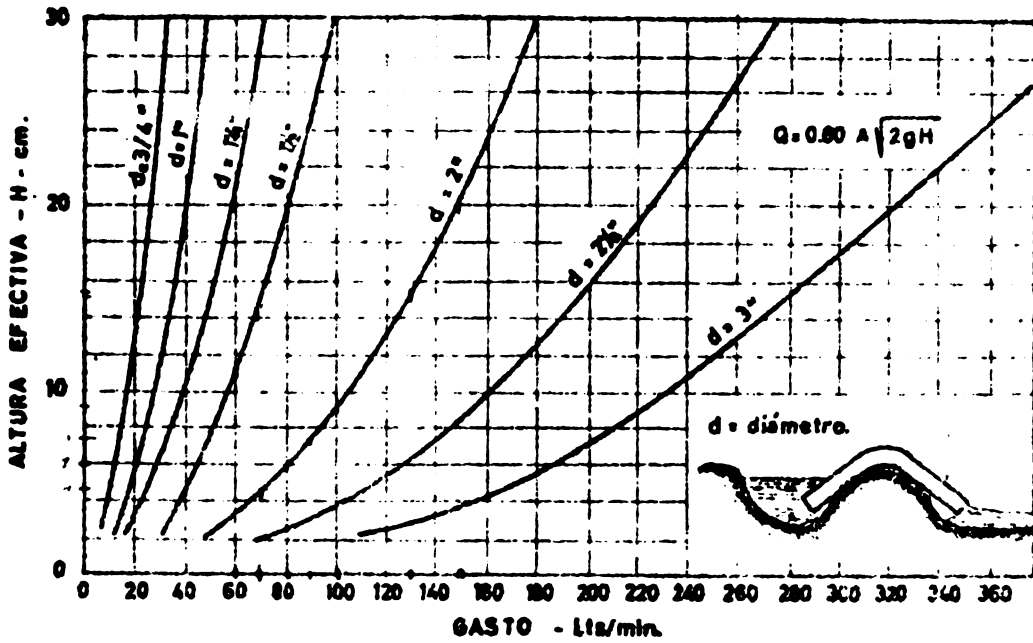


FIG. N° 8. Gasto a través de sifones pequeños.

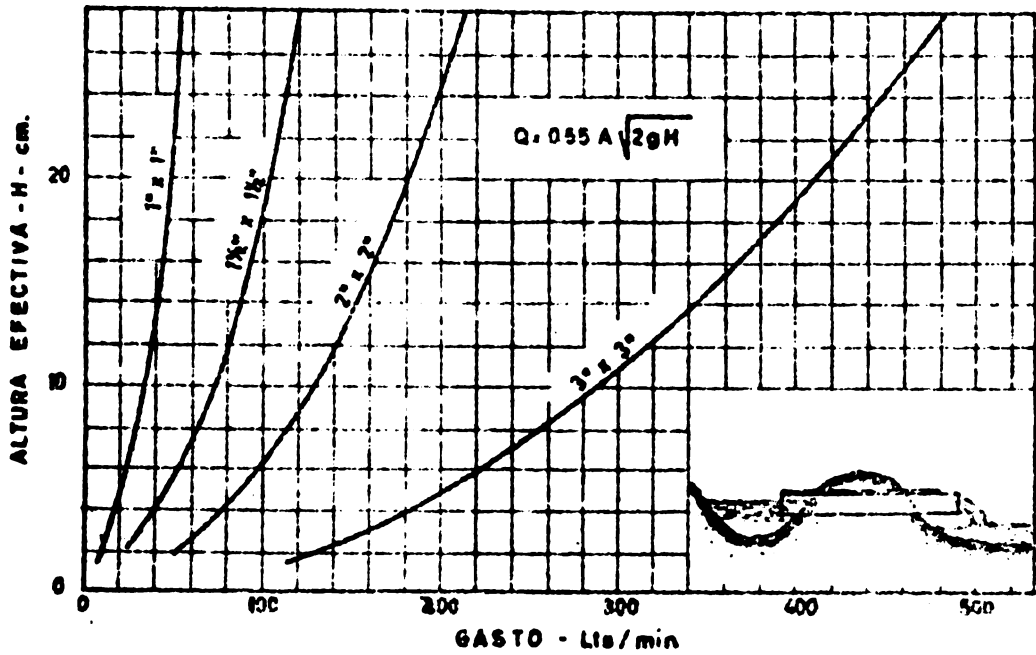


FIG. N° 9. Gasto de agua a través de cañietas de aplicación.

Las cajas abiertas de aplicación se usan para aplicar el agua a las melgas de riego. La construcción de estas cajas se ilustra en la Fig. N° 3. Para el riego por melgas también pueden usarse los sifones o las canaletas de aplicación, en número suficiente para aplicar el gasto deseado.

Las trancas portátiles, de lona o de metal, que se describen en el capítulo sobre Estructuras para la Distribución del Agua en los Fundos, o las trancas permanentes, descritas en el mismo capítulo, son dispositivos útiles en la práctica del riego, para regular la carga sobre los sifones o las canaletas, y asegurar un gasto uniforme en los surcos o las melgas.

Métodos de Riego por Aspersión.- Los métodos de riego por aspersión se discutirán en el capítulo siguiente.

REFERENCES

1. CRIDDLE, W. D. and OTHERS. Methods for Evaluating Irrigation Systems. U.S.D.A. Agr. Handbook N° 82. 1956. 24 p.
2. BROWN, Ll.N. Irrigation Methods to Conserve Soil and Water on Steep Lands. University of California Agr. Ext. Service. Circular 177. 1951. 19 P.
3. BURLE, J. J. and BROWN, J.B. Irrigated Pastures in California Agr. Ext. Service. Circular N° 125. 1949. 59 P.
4. BROWN, Ll.N. Contour Planting and Irrigating on Moderate to Steep Slopes. University of California Agr. Ext. Service. Circular 440. 1954. 23 p.
5. DAVIS L.L. California Rice Production. University of California Agr. Ext. Service. Circular 163. 1950. 55 p.
6. FORTIER, SAMUEL. Orchard Irrigation. U.S. Department of Agriculture. F. B. 1518. 1940. 27 p.
7. _____ Irrigation Practices in Growing Alfalfa. U.S. Department of Agriculture. F.B., 1630. 1940. 27 p.
8. FREVERT, R. K. and others. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor. Edwards Brothers, Inc. 1953.
9. ISRAELSEN, O. W. Irrigation Principles and Practices. New York. John Wiley & Sons Inc. 1952. 405 p.
10. MARR, J. C. The Corrugation Method of Irrigation. U.S. Department of Agriculture. F.B. 1348. 1931. 24 p.
11. _____ Grading Land for Surface Irrigation. California Agricultural Exp. Sta. Circular 438. 1954. 46 p.
12. ROE, H. B. Moisture Requirements in Agriculture, Farm Irrigation. New York, Mc Graw Hill Book Co. Inc. 1950. 413 p.
13. U. S. DEPARTMENT OF INTERIOR. Irrigation Advisers Guide. U.S. Bureau of Reclamation. 1951. 216 p.
14. U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. First Aid for the Irrigator. U.S.D.A.M.P. 624. 1947. 44 p.

FLUJO DEL AGUA EN CANALES

La mayor parte de las aguas de riego o de avenamiento, en los pequeños y en los grandes proyectos, es conducida a su destino final por medio de canales abiertos. Estos canales varían en tamaño desde los grandes conductos principales, con capacidades de 400 o más metros cúbicos por segundo, como el All American Canal de los Estados Unidos hasta los pequeños surcos de riego de las fincas, que conducen 8 o más litros por minuto.

Los principios generales para el diseño de canales de riego y para avenamiento son esencialmente iguales. La diferencia principal entre unos y otros, consiste en su localización, de acuerdo con los objetivos que cada uno debe cumplir. Los canales de riego son siempre construídos en posiciones elevadas, con relación a las áreas que sirvan, en tanto que los de avenamiento siempre se localizan en las depresiones de las zonas que benefician.

Derivación de la Fórmula Básica

Todas las fórmulas usadas en la actualidad para el diseño hidráulico de los canales se han originado en la fórmula fundamental de Chezy, cuya derivación se explica a continuación:

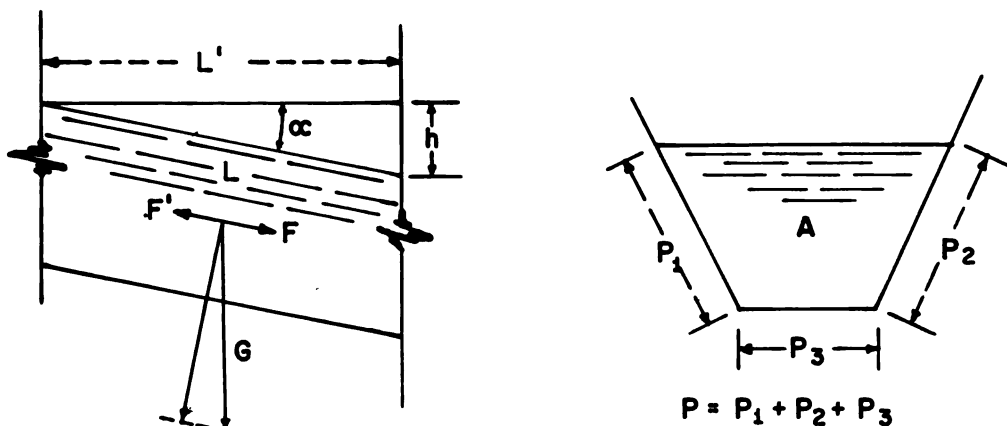


Figura N° 1

La figura 1 (a) representa la sección longitudinal de un canal con la pendiente fuertemente exagerada, y la figura 1 (b) la sección transversal del mismo canal. La fuerza que produce el flujo del agua es F , que es un componente de la fuerza de la gravedad (G), paralela al lecho del canal. Si A es el área del canal, L la longitud de la sección considerada, h la caída en la longitud L , y w el peso específico del líquido.

$$F = AL w \frac{h}{L} = Awh$$

Para que haya equilibrio la fuerza F debe ser compensada con una fuerza (F') de igual magnitud y de dirección opuesta a ella. F' resulta de la fricción del agua con las paredes y el lecho del canal. Esta fuerza es directamente proporcional al área de contacto (PL), al coeficiente de fricción (f) y al cuadrado de la velocidad (V).

$$F' = f PLV^2$$

Estableciendo una igualdad entre F' y F se tiene

$$Awh = fPLV^2$$

$$V^2 = \frac{w}{f} \frac{A}{p} \frac{h}{L}$$

$$\frac{w}{f} = C' = \text{Una constante que depende de las condiciones del canal.}$$

$$\frac{A}{p} = R = \text{Radio hidráulico}$$

$$\frac{h}{L} = S = \text{Pendiente del canal}$$

$$V = C \sqrt{RS} \quad (\text{Fórmula de Chezy}) \quad (1)$$

Experimentalmente se han determinado varias expresiones para C. La expresión de Manning tiene la siguiente forma:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2)$$

La expresión de Kutter, más compleja, es como sigue:

$$C = \frac{23 + \frac{0.00155}{s} \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{r}} \left(23 + \frac{0.00155}{s} \right)} \quad (3)$$

En ambas fórmulas n representa el coeficiente de rugosidad de las paredes del canal.

El valor de V, con la fórmula de Manning, tiene la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

$$Q = A \times V = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

La figura 2 muestra como los valores de C, calculados con las fórmulas de Manning y Kutter, son casi idénticas para valores de R próximos a 1.2 mts. y para pendientes mayores de 0.0002. Estas fórmulas acentúan su discrepancia a medida que los valores de R se alejan de 1.2 mts. y que los valores de S disminuyen de 0.0002.

La precisión de las fórmulas depende de la selección de los valores de n. Por esta razón, y por la gran simplicidad que ofrece, y porque la mayoría de los canales están situados dentro de los límites de similitud antes indicados, la fórmula de Manning ha ganado gran popularidad para el diseño de canales.

La Figura N° 3 presenta un nomograma para la solución aproximada de la fórmula de Manning.

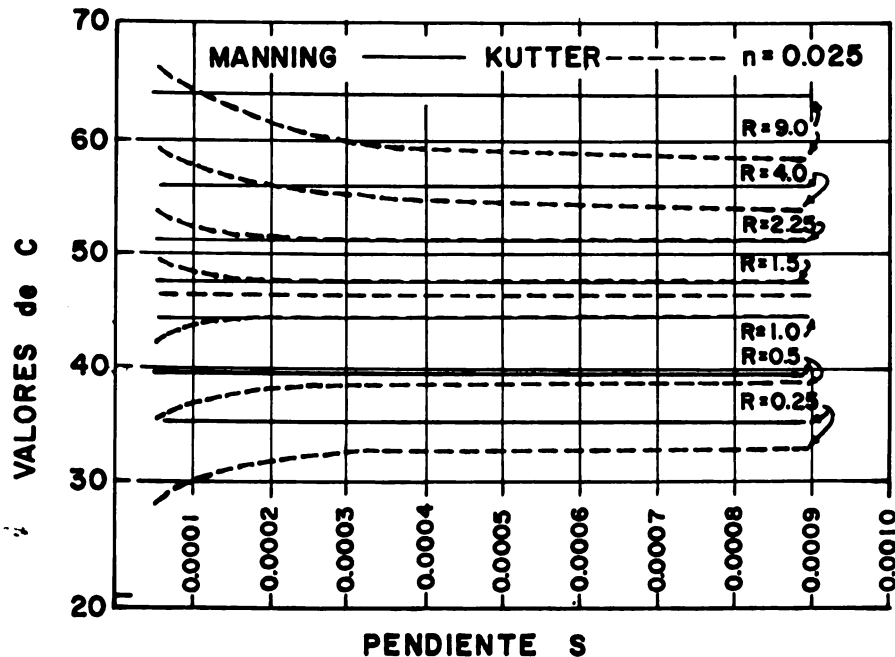


Figura N° 2

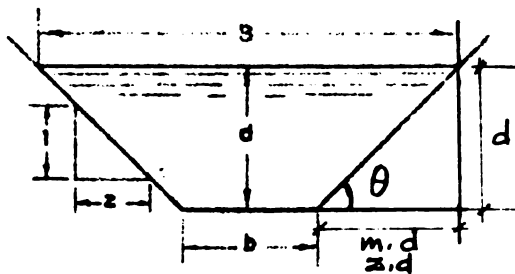
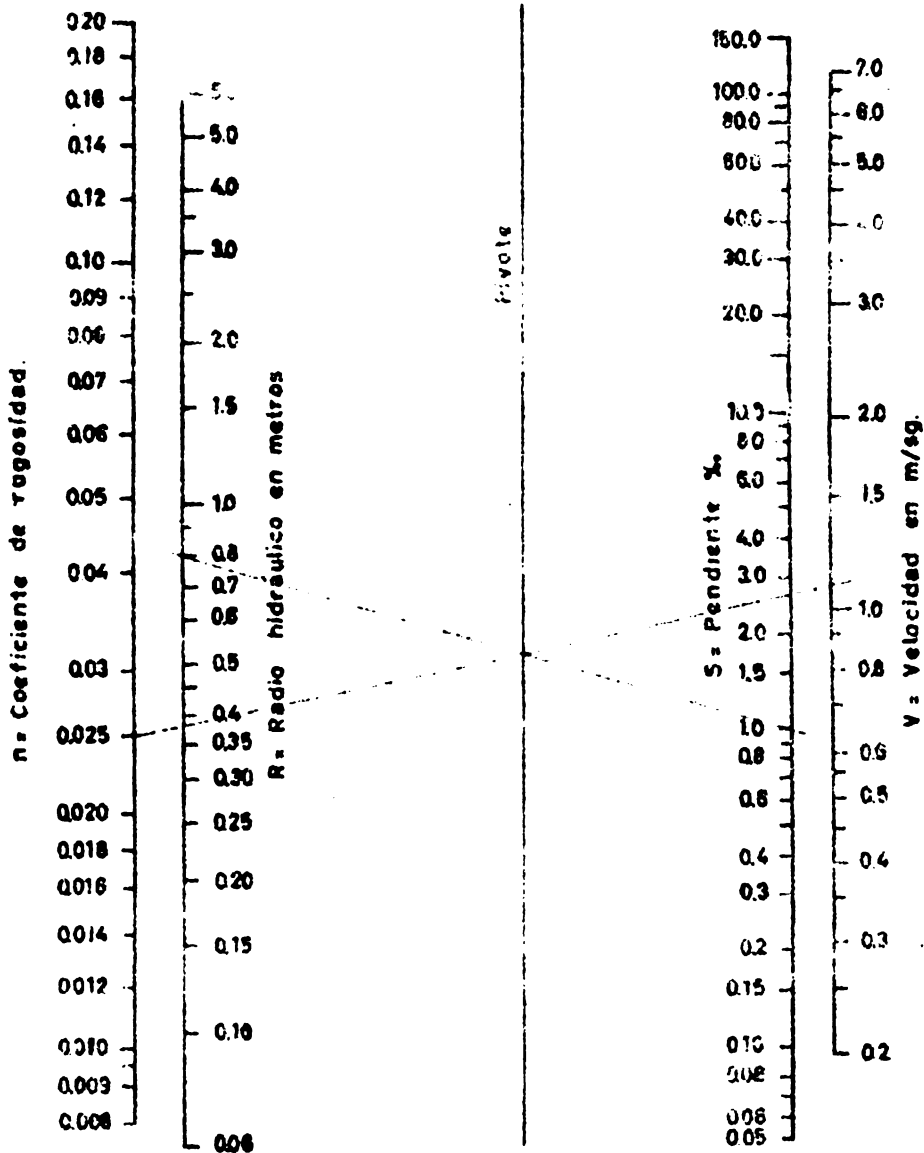
Los Elementos de Diseño.

En el cálculo de canales es necesario considerar ciertas limitaciones que imponen las condiciones físicas y topográficas del terreno sobre los elementos que constituyen las fórmulas antes discutidas. La eficiencia del canal para conducir agua y el volumen de la excavación necesaria para construirlo imponen, por otra parte, limitaciones adicionales.

Valores de "n".- Como se indicó anteriormente "n" es un coeficiente que dependen esencialmente de las condiciones de rugosidad de las paredes y el fondo del canal. La Tabla N° 1 presenta los valores de "n" correspondientes a distintos materiales de revestimiento y a condiciones diferentes de los mismos.

Es muy importante que el valor de "n" sea seleccionado en forma apropiada según el carácter del material que revestirá el canal. Como puede observarse en la fórmula 4 arriba

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$



$$\text{Area} = A = bd + zd^2$$

$$\text{Per. Hum} = P = b + 2d\sqrt{z^2 + 1}$$

$$\text{Radio Hidráulico} = R = \frac{bd + zd^2}{b + 2d\sqrt{z^2 + 1}}$$

$$\text{An. supr.} = B = b + 2dz.$$

Ejemplo: Conocidos: $R = 0.8 \text{ m.}$ $S = 10 \%$ $n = 0.025$
 Buscar: $V \dots \dots = 1.1 \text{ m/sg.}$

FIG N° 3. NOMOGRAMA PARA LA SOLUCION DE LA FORMULA DE MANNING.

la velocidad es inversamente proporcional a "n", lo que implica que una selección alta de este coeficiente, resultaría en el cálculo de una velocidad baja y, por consiguiente, de un área mayor que la necesaria. Lo contrario conduciría al cálculo de un área menor que la requerida.

La Velocidad en los Canales.- Dos factores, principalmente, limitan la velocidad del agua en los canales: la erodabilidad del lecho del canal y la posible sedimentación de los materiales que el agua arrastra. La velocidad máxima permisible es aquella que no erosiona las paredes ni el fondo del canal, y la velocidad mínima aceptable, la que no permite la sedimentación de los materiales que el agua lleva en suspensión.

El Ing. R.G. Kennedy, basado en estudios realizados en la India, estableció el concepto de "velocidad crítica", para la circulación del agua en canales. La velocidad crítica sería aquella que no produce erosión ni sedimentación. Kennedy propuso la siguiente fórmula empírica como expresión de esa velocidad:

$$V_o = C d^{0.64}$$

Donde: C = Coeficiente que depende de la naturaleza física del material.

D = Profundidad o tirante del canal.

El coeficiente C tiene los siguientes valores:

Materiales de textura muy fina (Buckley en Egipto)	0.36
Limo arenoso fino (Kennedy en India)	0.55
Limo grueso (Buckley) hasta	0.7

TABLA N° 1

Valores de "n" para las fórmulas de Manning y de Kutter, según Horton. 2/

S U P E R F I C I E	Condiciones de las paredes		
	Buenas	Regulares	Malas
Tubería de fierro forjado negro comercial	0.013	0.014	0.015
Tubería de fierro forjado galvanizado comercial	0.014	0.015	0.017
Tubería de latón o vidrio	0.010	0.011	0.013
Tubería de acero remachado en espiral	0.015 <u>1/</u>	0.017 <u>1/</u>	
Tubería de barro vitrificado	0.013	0.015	0.017
Tubería común de barro para drenaje	0.012 <u>1/</u>	0.014 <u>1/</u>	0.017
Ladrillo y mortero de cemento	0.013	0.015	0.017
Superficies de cemento pulido	0.011	0.012	0.013
Superficies de mortero de cemento	0.012	0.013 <u>1/</u>	0.015
Tuberías de concreto	0.013	0.015 <u>1/</u>	0.016
Tuberías de duelas de madera	0.011	0.012	0.013
Acueductos: de madera			
Cepillada	0.012 <u>1/</u>	0.013	0.014
Sin cepillar	0.013 <u>1/</u>	0.014	0.015
Canales revestidos de concreto	0.014 <u>1/</u>	0.016 <u>1/</u>	0.018
Superficie de mampostería de piedra con cemento	0.020	0.025	0.030
Acueductos semicirculares metálicos, lisos	0.012	0.013	0.015
Acueductos semicirculares metálicos, corrugados	0.025	0.0275	0.030

TABLA N° 1 (Continuación)

CANALES Y ZANJAS			
En tierra rectos y uniformes	0.020	0.0225	0.025 <u>1/</u>
En roca lisos y uniformes	0.030	0.033 <u>1/</u>	0.035
En roca con salientes sinuosos	0.040	0.045	
Sinuoso y de escurrimiento lento	0.025 <u>1/</u>	0.0275	0.030
Dragados en tierra	0.275 <u>1/</u>	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordes de tierra enhierbados	0.030	0.035 <u>1/</u>	0.040
Plantillas de tierra, taludes ásperos	0.030 <u>1/</u>	0.033 <u>1/</u>	0.035
CORRIENTES NATURALES			
1. Limpios, bordes rectos, llenos, sin grietas ni charcos profundos	0.0275	0.030	0.033
2. Como el 1, pero con algo de hierba y piedra	0.033	0.035	0.040
3. Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpios	0.035	0.040	0.045
4. Igual al 3, de poca profundidad, con pendientes y sección menos eficientes	0.045	0.050	0.055
5. Igual al 3, algo de hierba y piedras	0.040	0.045	0.050
6. Igual al 4, secciones pedregosas	0.050	0.055	0.060
7. Ríos perezosos, cauce enhierbado o con charcos profundos	0.060	0.070	0.080
8. Cauces muy enhierbados	0.100	0.125	0.150

1/ Valores corrientemente usados en la práctica.

2/ Seleccionados de King H.W., Handbook of Hydraulics.

Aparentemente los valores de V_o , obtenidos con la fórmula anterior, representan solamente la velocidad mínima, por encima de la cual no ocurre sedimentación, pero se ha encontrado que velocidades mayores que V_o no producen erosión en los taludes del canal. Por esta razón, algunos ingenieros calculan la velocidad mínima igual a 0.8 de V_o y la máxima como 1.20 de V_o , usando para calcular V_o un coeficiente C uniforme de 0.55. Otros prefieren calcular la velocidad mínima con la fórmula de Kennedy y seleccionar la velocidad máxima de la Tabla N° 2 elaborada por los ingenieros Fortier y Scobey.

Tabla N° 2
Velocidades permitidas en canales 1/

Material excavado del canal	Velocidades permitidas, en metros por segundo, según los materiales que el agua transporta		
	Aguas Claras	Aguas que transportan limo coloidal	Aguas que transportan limos coloidales, arenas, cascajos o fragmentos de rocas
Arena fina (no coloidal)	0.45	0.75	0.45
Material franco arenoso (no coloidal)	0.50	0.75	0.60
Material franco limoso (no coloidal)	0.60	0.90	0.60
Limos aluviales (no coloidales)	0.60	1.10	0.60
Material franco ordinario firme	0.75	1.10	0.70
Cenizas volcánicas	0.75	1.10	0.60
Grava fina	0.75	1.50	1.15
Arcilla firme (coloidal)	1.15	1.50	0.90
Material franco o cascajoso bien proporcionado (no coloidal)	1.15	1.50	1.50
Limos aluviales (coloidales)	1.15	1.50	0.90
Material limoso o cascajoso bien proporcionado	1.20	1.70	1.50
Cascajo grueso	1.20	1.80	1.95
Piedras redondeadas	1.50	1.70	1.95
Esquistos arcillosos y arcilla compacta	1.80	1.80	1.50

1/ Tomada de Davis C.V. Handbook of Applied Hydraulics.

Forma de la Sección Transversal

Generalmente los canales se construyen con una sección trapezoidal, en donde la inclinación de los taludes depende del material cortado por el canal. Dentro de esta forma trapezoidal hay varias alternativas, en cuanto a la relación entre el ancho del fondo del canal y la profundidad del tirante hidráulico. Para la selección del valor de esta relación pueden seguirse varios criterios, según el objeto que debe cumplir el canal. La economía de la excavación; la eficiencia hidráulica de la sección; la elevación del agua con relación a las tierras que deben servirse; las pérdidas de agua por infiltración, todos en relación con la configuración topográfica del terreno, son los factores principales a considerar en la selección de la plantilla y del tirante hidráulico del canal.

Secciones con Máxima Eficiencia Hidráulica. - Estas son las secciones que tienen un perímetro húmedo mínimo, lo que implica menor área de fricción. Esta condición se satisface cuando la relación entre la plantilla del canal (b) y el tirante hidráulico del mismo (d) es igual a dos veces la tangente de la mitad del ángulo de los taludes θ

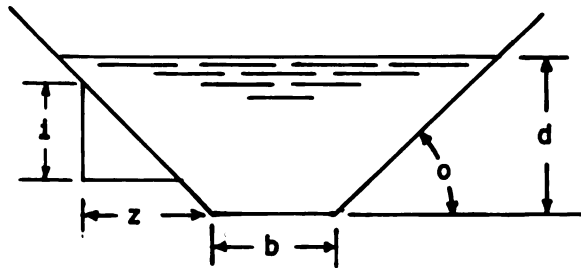


Figura N^o 4

$$\frac{b}{d} = 2 \tan \frac{\theta}{2}$$

El valor del radio hidráulico R, en este caso es

$$R = \frac{d}{2}$$

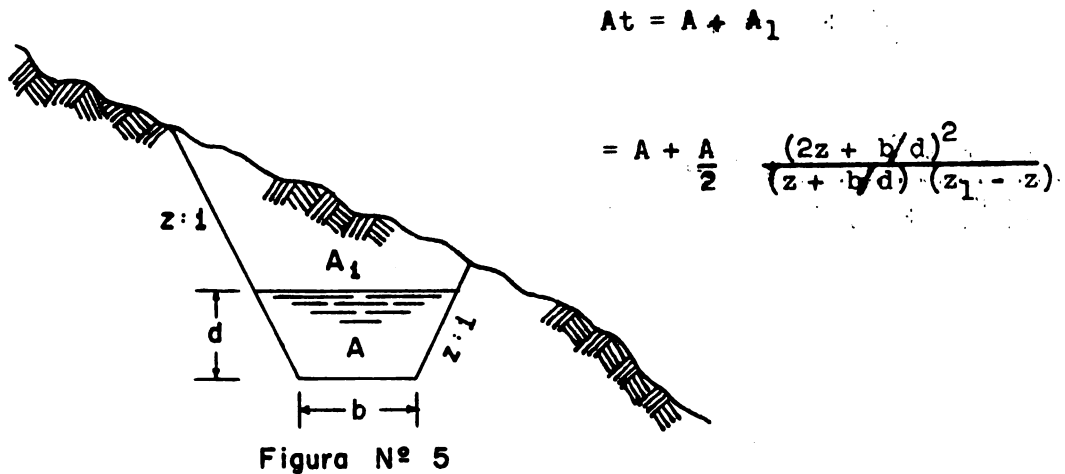
Secciones con Infiltración Mínima.- Se ha estimado que la pérdida de agua por infiltración en los canales, es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del agua. Con este estimativo se ha derivado una expresión que da la relación b/d para una infiltración mínima. Esta relación es como sigue:

$$\frac{b}{d} = 4 \tan. \frac{\theta}{2}$$

o sea, dos veces el valor obtenido para la sección con máxima eficiencia hidráulica.

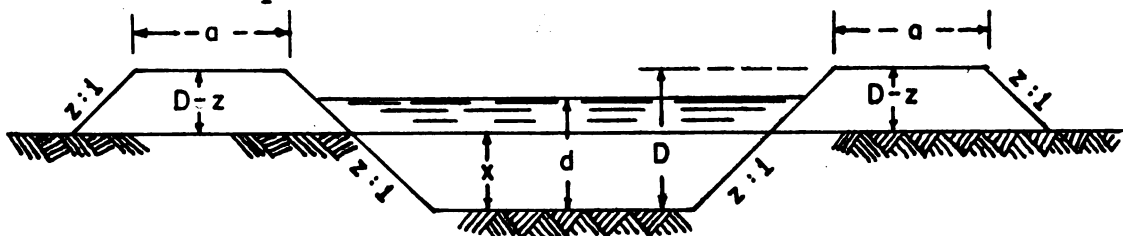
Secciones según el Objetivo del Canal.- Generalmente las secciones de los canales se diseñan dando mayor importancia a los objetivos que el canal deba cumplir y teniendo en cuenta la economía de su construcción. En general, los canales pueden dividirse en tres categorías, según sus objetivos: Canales principales de conducción; canales laterales o sublaterales de distribución; y canales de drenaje.

Los canales de conducción se construyen, generalmente, sobre faldas inclinadas y son los que arrancan del punto de derivación y llevan el agua hasta los laterales. Por razones de seguridad, la sección del prisma de agua de estos canales se construye, generalmente, toda en corte. El área de excavación en canales contruídos a través de pendientes inclinadas, cuando el prisma de agua queda todo en corte, está dada por la siguiente expresión, cuyos símbolos se explican en la Fig. 5.



Algunos cálculos con esta fórmula indicarán que las secciones más convenientes desde el punto de vista económico, esto es, aquellos que requieren menor cantidad de excavación, son las secciones angostas y profundas próximas a la sección de máxima eficiencia hidráulica.

Los canales de distribución, o los canales laterales o sublaterales, generalmente se construyen sobre terreno más o menos plano. Estos canales deben mantener sobre el terreno que sirven una buena proporción del agua que transportan, lo que implica que el prisma de agua debe fluir parte en corte y parte en relleno, Fig. 6. Estas secciones pueden proporcionarse de tal manera que:



el volumen de corte sea igual al volumen de excavación más diez por ciento para compensar contracción o asentamiento de los bancos.

La profundidad del corte (x) en la Fig. 6 para obtener tal compensación, puede determinarse con la siguiente expresión:

$$0.6zx^2 + x (2.2zD + 1.1a + \frac{b}{2}) - 1.1Da - 1.1zD^2 = 0$$

En esta expresión el corte se ha asumido igual a 1.1 veces igual al terraplén.

Estos canales se construyen anchos y poco profundos, o sea, con una alta relación entre la plantilla y el tirante hidráulico, lo que permite conducir una alta proporción del agua por encima del nivel del terreno que sirven. Los canales anchos, por otra parte, experimentan poca fluctuación en el tirante hidráulico cuando varía la descarga. Esta condición es muy deseable en los canales de distribución, ya que las variaciones que puedan ocurrir en la descarga total, durante el período de operación, no afectarán muy apreciablemente las descargas parciales en los diversos puntos de derivación.

Los canales de avenamiento están localizados en las partes más bajas de los terrenos que benefician, o siguen las depresiones naturales que estos terrenos presentan. Usualmente son canales profundos, cuya sección se aproxima a la sección con máxima eficiencia hidráulica. La profundidad de estos canales se determina, principalmente, considerando la profundidad de los canales de avenamiento secundarios, o de los tubos de avenamiento subterráneos que en ellos desaguan.

Otros Factores que Afectan la Forma de la Sección.- Aparte de las consideraciones antes expuestas, hay otros factores, también importantes, que merecen consideración al seleccionar la forma de la sección transversal de un canal.

Cuando los canales deben ser revestidos, resulta más conveniente tener una sección que presente un mínimo perímetro hú

medo. Tal sección sería la de máxima eficiencia hidráulica, discutida anteriormente.

En las secciones profundas, el volumen de excavación es menor que en las secciones más superficiales, pero el costo de la excavación puede resultar mayor en las primeras, especialmente cuando el trabajo se hace a mano.

Las secciones profundas, por otra parte, producen velocidades mayores que las secciones más llanas, por lo cual, cuando la pendiente es grande puede resultar conveniente diseñar secciones poco profundas, a fin de reducir la velocidad hasta los límites de tolerancia que el terreno permita. Con esto puede evitarse o reducirse la construcción de caídas a lo largo del canal. Cuando la pendiente disponible es reducida, una sección profunda permitirá aumentar la velocidad hasta un límite que evite la sedimentación en el canal.

Una regla empírica generalmente usada en los Estados Unidos, establece el valor máximo de la profundidad de los canales en tierra, según la siguiente relación:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{A}$$

En la cual

d = tirante hidráulico en metros,
A = Area de la sección en mts²

Inclinación de los Taludes.— La inclinación de los taludes depende del grado de estabilidad que ofrezca el material sobre el cual se ha de construir el canal. Mientras más inestable sea el material, menor será el ángulo de inclinación de los taludes. Usualmente esta inclinación se expresa por medio de la cotangente del ángulo de inclinación, o sea, la relación entre las distancias horizontal y vertical del talud. La Tabla N° 3 indica los valores de los talu

des recomendables para distintos materiales.

Tabla N° 3

Taludes recomendables para canales, según la naturaleza del material de excavación.

Material	Inclinación de taludes
Roca firme	1/4 : 1
Hard-pan duro. Roca con fisuras	1/2 : 1
Grava cementada. Arcilla y Hard-pan ordinario	3/4 : 1
Arcilla con grava. Suelos francos	1 : 1
Suelos francos con grava	1 1/2 : 1
Suelos franco-arenosos	2 : 1
Suelos muy arenosos	3 : 1

Franco o Bordo Libre.- En la determinación de la sección de los canales, resulta siempre necesario dar un margen de seguridad a éste contra posible desbordamiento o rotura. Esto puede ocurrir por razón de un mayor ingreso de agua al canal, ya sea agua lluvia que entra como escorrentía, o agua de la misma fuente de captación que puede entrar en exceso, debido a la operación impropia de las compuertas reguladoras. La altura del agua en los canales puede aumentar también, por el aumento de coeficiente de rugosidad, debido al crecimiento de malezas o por otras causas. La práctica corriente es dejar un franco o bordo libre igual a un tercio de la profundidad del canal.

Ancho de los Bancos.- El ancho de los bancos de los canales, en su parte superior, depende esencialmente del servicio que tales bancos habrán de prestar. En canales grandes se hacen suficientemente anchos como para permitir el tránsito de vehículos, a fin de facilitar los trabajos de

inspección y de distribución del agua. El ancho en tales casos es hasta de unos cuatro metros. En canales más pequeños el ancho superior de los bancos puede hacerse, aproximadamente, igual al tirante hidráulico del canal.

Reglas útiles para el cálculo de canales.- Generalmente el cálculo de la sección transversal de un canal se hace para tanteo y con el uso de nomogramas como el que ilustra la Fig. N° 3. Para facilitar los cálculos suelen usarse algunas reglas aproximadas, que se indican a continuación:

1. En un canal dado la velocidad (V) varía en proporción directa con la raíz cuadrada de la pendiente (S), o sea que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}$$

2. Para una forma dada de la sección de un canal, la velocidad (V) es directamente proporcional a la raíz cuadrada del radio hidráulico (R), o sea que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

3. Para una sección dada de un canal, el gasto (Q) es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente (S), o sea que:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}$$

4. Para una misma sección el coeficiente de fricción (n) es inversamente proporcional al gasto (Q), o sea que:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

Ejemplo N° 1.- Para un canal cuya plantilla (b) es igual a 1.20 m., y con un tirante hidráulico (d) de 0.50 m., Taludes: de 1:1 y pendiente (S) de 0.002, determínese el gasto correspondiente a los siguientes valores de n : 0.020, 0.025 y 0.030.

Solución: $A = 1.20 \times 0.5 + 1 \times 1.44 = 2.04 \text{ m}^2$

$$P = 0.5 + 2 \times 1.20 \times 1.42 = 3.89 \text{ m.}$$

$$R = \frac{2.04}{3.89} = 0.525 \text{ m.}$$

Entrando al nomograma de la Fig. N° 3, se obtendrán los valores de V que se indican a continuación:

n	V M/seg	M ³ /seg	Q x n
0.020	1.43	2,910	58.2
0.025	1.15	2,345	58.6
0.030	0.95	1,938	58.1

Esto muestra como los valores de Q x n para una sección dada de canal, son constantes, o, lo que es lo mismo, que Q es inversamente proporcional a n.

Ejemplo N° 2.- Para el canal del ejemplo anterior tomando n = 0.025, calcúlense las velocidades y los gastos correspondientes a los siguientes valores de S : 0.001; 0.002 y 0.003.

Solución: Tomando los valores de R calculados anteriormente y entrando al nomograma de la Fig. N° 3, se obtendrán los valores de V que se indican a continuación:

S	\sqrt{S}	$\frac{V}{M/seg}$	$\frac{Q}{M^3/seg}$	$\frac{V}{\sqrt{S}}$	$\frac{Q}{\sqrt{S}}$
0.001	0.0316	0.80	1,653	25.3	52.4
0.002	0.0448	1.15	2,348	25.7	52.4
0.003	0.0548	1.42	2,920	25.9	52.8

Esto muestra como los valores de $\frac{V}{\sqrt{S}}$ y $\frac{Q}{\sqrt{S}}$ son aproximadamente constantes para un canal de forma dada, o, lo que es lo mismo, que tanto V como Q, son directamente proporcionales a \sqrt{S} .

Trazado preliminar

La brigada de trabajo para la realización de este trazado preliminar puede constituirse en la forma siguiente: el ingeniero jefe, provisto de un eclímetro, o de un nivel de mano, y acompañado de un balicero, indica a éste los sitios en que debe clavar las estacas que marcan sobre el terreno la poligonal preliminar. Un segundo ingeniero levantará esta poligonal por medio de tránsito y colocará estacas cada 20 metros a lo largo de la poligonal. Otro ingeniero correrá a continuación la nivelación de la poligonal con nivel de precisión, colocando B. Ms. en sitios adecuados a lo largo de la vía. Por último, un topógrafo levantará con nivel de mano las acciones transversales, con lo cual puede dibujarse el plano de una faja de terreno, que permitirá estudiar el trazado definitivo del canal.

El trazado preliminar puede iniciarse en la extremidad más baja del canal, situado en el punto más alto de las tierras que van a regarse, cuando estas tierras han sido ya definidas, o en el punto de derivación, cuando la localización de éste haya sido fijada. En el último caso, la poligonal se trazará con una pendiente mínima, para asegurar la irrigación de la máxima cantidad de tierras posible.

El procedimiento descrito para la realización del trazado preliminar se aplica a los canales de conducción, en los proyectos grandes. En proyectos más pequeños el levantamiento planimétrico y altimétrico del canal puede realizarse por un solo ingeniero, en etapas sucesivas o en forma simultánea, por medio de la plancheta, cuando las condiciones del terreno lo permitan.

El trazado preliminar de la red de canales de distribución y de avenamiento en un proyecto de riego, se hace sobre un levantamiento topográfico del área considerada. Este levantamiento usualmente se hace por medio de un sistema de triangulación, que constituye el esqueleto de apoyo para el levantamiento.

Trazado Definitivo y Localización.

El trazado preliminar produce un plano, sobre el cual se hacen las modificaciones que fuesen necesarias a la trayectoria del canal principal, o se hace la localización de la red de canales de distribución y de avenamiento. El trazado definitivo se hace sobre el terreno, con base en la localización realizada en el plano, haciendo cualquier modificación que aconsejen las condiciones locales.

El trazado del canal se hace localizando sobre el terreno la poligonal definitiva por medio de estacas colocadas cada 20 metros, a lo largo de la línea media del canal. Los cambios de dirección de la poligonal se establecen por medio de deflexiones, a la derecha o a la izquierda, menores de 180° . Estos cambios de dirección se realizan por medio de curvas circulares, cuyo radio mínimo se indica a continuación.

La Fig. N° 8 ofrece un plano ejecutado para la localización de un canal.

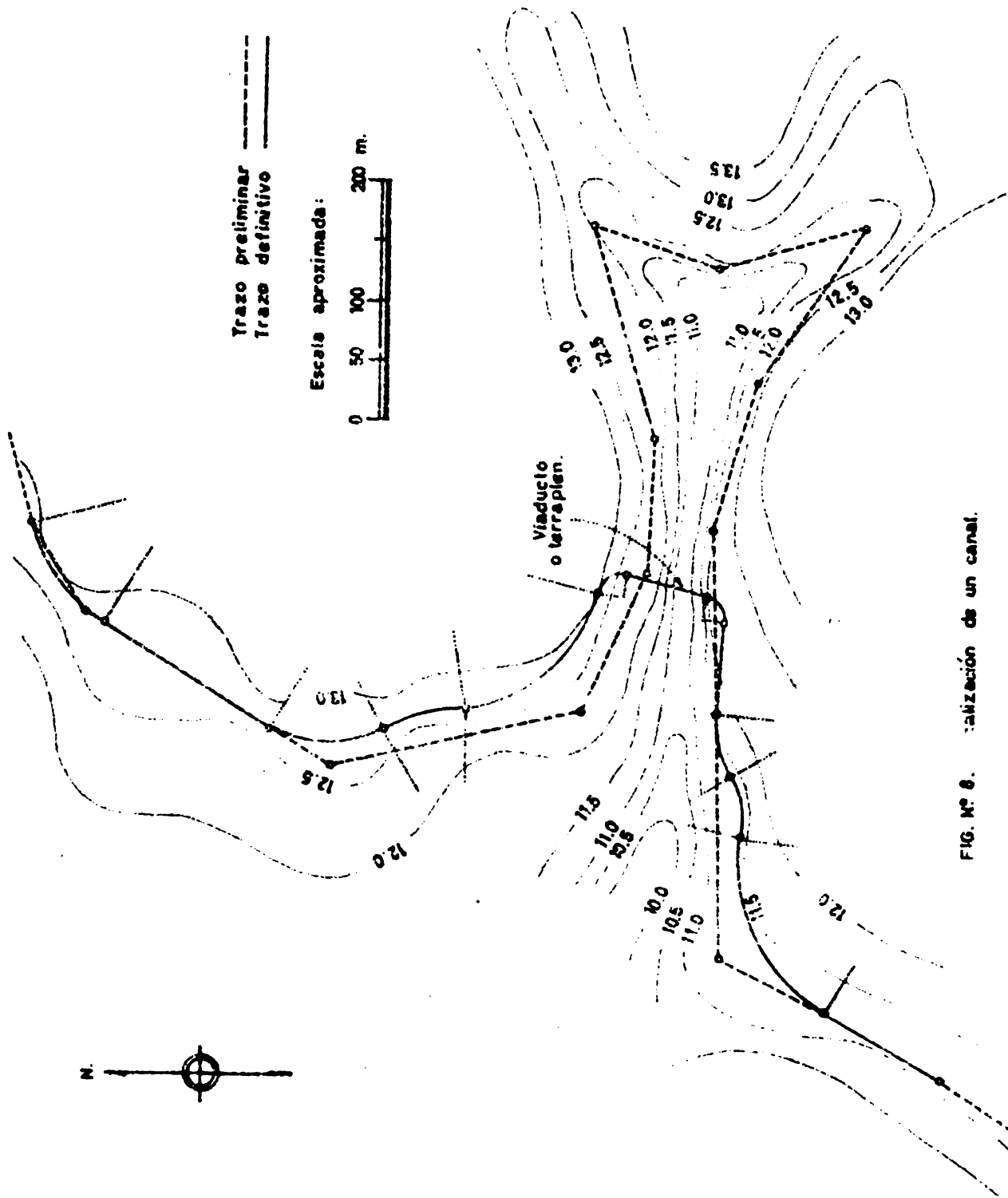


FIG. Nº 8. Realización de un canal.

Trazado y Localización de Canales

Aún cuando existen varios métodos para el trazado y localización de canales, según las características especiales que ofrezca la topografía y el grado de cobertura vegetal del terreno, aquí sólo se describirá un método general, que puede modificarse en ocasiones para adaptarlo a las condiciones especiales del trabajo que se estudia.

En general, el trazado de canales, implica tres etapas diferentes: reconocimiento general, trazado preliminar y trazo definitivo.

Reconocimiento General.— El reconocimiento general es, en realidad, un estudio de la región para determinar las posibles trayectorias del canal. Mapas o planos o aerofotografías existentes, facilitan esta labor. El estudio del terreno se realiza con un equipo sencillo, usualmente compuesto de brújula, eclímetro, barómetro aneróide y cinta de 20 metros. Las trayectorias posibles deben estudiarse considerando la pendiente probable del canal, los puntos inicial y final del mismo y la economía del proyecto. Un reconocimiento de esta naturaleza debe indicar la ruta general que seguirá el trazado preliminar.

En los proyectos grandes este reconocimiento exige considerable experiencia, pero en los proyectos pequeños tal estudio puede resultar muy simplificado.

Trazado Preliminar.— Conocida la trayectoria general que habrá de seguir el canal, se realiza un trazado preliminar de la vía.

Tabla N° 4

Descarga de agua del canal en Mts ³ /seg.	Radios mínimos recomendables en Mts
20	100
15	80
10	60
5	20
1	10
0.5	5

Trazo de curvas circulares. - Las curvas circulares son las más corrientemente usadas en el trazo de canales. Los elementos que constituyen una curva circular se muestran en la Fig. N° 7 y se definen en la forma siguiente:

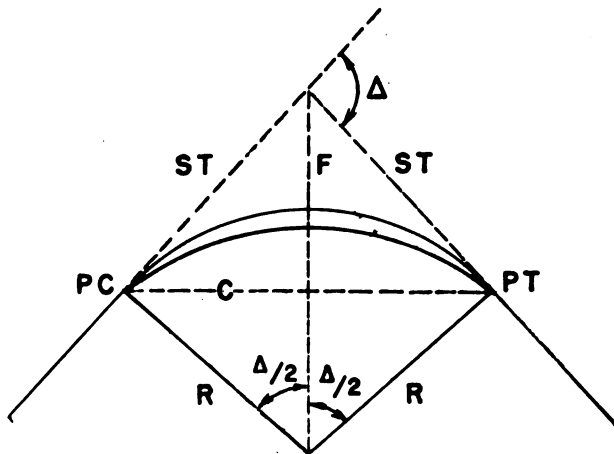


Figura N° 7

C = Cuerda larga. Es la cuerda que subtiende la curva comprendida entre el PC y el PT.

Δ = Ángulo de deflexión. Es el ángulo exterior formado por la prolongación de las dos rectas que se unen.

G = Grado. Es el ángulo central que subtiende una cuerda de 20 metros.

LC = Longitud de la curva. Es la longitud de la curva medida sobre cuerdas de 20 metros.

PC = Principio de la curva.

PI = Punto de inflexión.

PT = Principio de tangente

R = Radio de la curva

ST = Subtangente. Distancia que hay entre el PC y el PI, y entre éste y el PT.

Las relaciones entre estos elementos que son de uso más frecuente en el campo, se indican a continuación:

$$ST = R \tan \frac{\Delta}{2}$$

$$R = \frac{10}{\text{Sen} \frac{G}{2}}$$

$$= \frac{20}{\Delta}$$

Cálculo del Material de Excavación

El volumen (V) de excavación en canales puede estimarse en forma aproximada, multiplicando la longitud L de un tramo relativamente corto por la semisuma de las áreas extremas (A_1 y A_2) de dicho tramo o:

$$V = L \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right)$$

Si A_1, A_2, A_3, \dots y A_n representan las áreas de una serie de secciones consecutivas situadas a una distancia uniforme (L) entre sí, el volumen de excavación (V) para todo el tramo comprendido entre A_1 y A_n será:

$$V = L \left(\frac{A_1}{2} + A_2 + A_3 + \dots + \frac{A_n}{2} \right)$$

Algunos ejemplos sobre cálculo y localización de canales

A continuación se ofrecen algunos ejemplos relacionados con el cálculo de la sección de los canales, áreas de excavación y trazado de curvas:

Ejemplo N° 3.- Determínese la pendiente máxima de un canal y el área de la sección correspondiente, conociendo los siguientes elementos:

Velocidad máxima permisible = 0.75 m/sg.

Taludes: 1:1

$Q = 500$ lts/seg

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{A}$$

$n = 0.025$

Solución:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0.5}{0.75} = 0.715 \text{ m}^2$$

$$d = \frac{\sqrt{0.715}}{2} = 0.423 \text{ m}$$

$$A = bd + zd^2$$

$$b = \frac{A - zd^2}{d} = \frac{0.715 - 0.178}{0.423} = 1.27 \text{ m}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0.715}{2.47} = 0.29 \text{ m}$$

$$S = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} = \frac{0.562 \times 0.000625}{0.192} = 0.00183$$

$$S = 1.8 \text{ ‰}$$

Este ejercicio puede resolverse también, usando el nomograma de la Fig. N° 3, en donde, conociendo los valores de $n = 0.025$; $v = 0.75$ m/sg y $R = 0.29$ m., se puede localizar el valor de $S = 1.8 \text{ ‰}$.

Ejemplo N° 4.- Determinése la sección de un canal para las siguientes condiciones:

$$Q = 400 \text{ lts/seg.}$$

$$s = 0.002$$

$$n = 0.025$$

Taludes : 1:1

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{A}$$

Solución:

$$Q = \frac{a}{n} R^{2/3} s^{1/2}$$

$$A = 4d^2$$

$$4d^2 = bd + zd^2$$

$$b = \frac{4d^2 - zd^2}{d} = 3d$$

$$P = b + 2d \sqrt{z^2 + 1} = 3d + 2.82d = 5.82d$$

$$R = \frac{4d^2}{5.82d} = 0.688 d$$

$$0.4 = \frac{4d^2}{0.025} \times (0.688 d)^{2/3} \times 0.002^{1/2}$$

$$0.4 = 5.57 d^{8/3}$$

$$d = \left(\frac{0.4}{5.57}\right)^{3/8} = (0.0718)^{3/8} = 0.415 \text{ m}$$

$$b = 3d = 3 \times 0.415 = 1.245 \text{ m}$$

Ejemplo N° 5.- Determinése la profundidad de corte en el canal del ejemplo N° 1, de tal manera que el corte que

de balanceado con el terraplón de los bancos, asumiendo que el canal está construido sobre terreno plano, que el ancho de los bancos es igual a 1 metro y que el franco es de 0.18 m.

Solución: Obsérvese la Fig. N° 6, que da el significado de los símbolos usados a continuación:

$$0.6 \, x^2 + x \left(2.2 \, xD + 1.1 \, a + \frac{b}{2} \right) - 1.1Da - 1.1xD^2 = 0$$

$$0.6x^2 + 2.955 \, x - 1.06 = 0$$

$$\text{Ecuación de 2º grado: } x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$x = \frac{-2.955 \pm \sqrt{8.7 + 2.54}}{1.2} =$$

$$x = 0.337 \, \text{m.}$$

En este caso la altura de los bancos sobre el nivel del terreno $(D-x) = 0.26$, y la altura del agua sobre el nivel del terreno $(d-x)$ sería de 0.14 m.

Ejemplo N° 6.- Calcúlese el área de excavación de un canal construido todo en corte sobre una ladera, teniendo la siguiente información:

Inclinación de la ladera:	4:1
Inclinación de los taludes:	1:1
Área de la sección :	0.7 m ²
Plantilla (b) :	0.7 m.
Tirante (d) :	1.0 m.

Solución: Obsérvese la Fig. N° 5, donde se definen los símbolos que se usarán a continuación:

$$A_t = A + \frac{A}{2} \left(\frac{2z + b/d}{z + b/d} \right)^2 (z, -z)$$

$$A_t = 0.7 + 0.35 \frac{(2 + 0.7)^2}{1.7 \times 3} = 1.222 \text{ m}^2$$

Ejemplo N° 7.- Calcúlese la longitud de las subtangentes, la longitud de la curva y establézcase el cadenamiento y el valor de las deflexiones parciales para la curva de un canal, que tiene las siguientes características:

$$\Delta = 20^\circ 20'$$

$$R = 100 \text{ m}$$

$$PI = 2 + 134.82$$

Solución: Para la definición de los símbolos que se usarán a continuación obsérvese la Fig. N° 7.

1°. Longitud de las subtangentes (ST) y grado (G) de la curva:

$$ST = R \frac{\sin \frac{\Delta}{2}}{\sin \frac{G}{2}} = 100 \frac{\sin 10^\circ 10'}{\sin 5^\circ 50'} = 17.93 \text{ m.}$$

$$R = \frac{10}{\sin \frac{G}{2}} ; \quad \sin \frac{G}{2} = \frac{10}{100} = 0.10$$

$$\frac{G}{2} = 5^\circ 50' \quad G = 11^\circ 40'$$

2°. Longitud de la curva:

$$LC = \frac{20}{G} \Delta = \frac{20 \times 20.333}{11.666} = 34.86 \text{ m.}$$

3°. Cálculo del cadenamiento:

Cadenamiento del PI	=	2 + 134.82
ST	=	- 17.93
Cadenamiento del PC	=	2 + 116.89
LC	=	<u>34.86</u>
Cadenamiento del PT	=	2 + 151.75

4°. Cálculo de las deflexiones parciales:

$$= \frac{1/2 G}{20} = 0^\circ - 17.5'$$

5°. La primera cadena completa después del PC se medirá a partir de la estación 2 + 120. La distancia entre el PC y el punto inicial de la primera cadena completa será:

$$\begin{array}{r} 2 + 120.00 \\ - 2 + 116.89 \\ \hline \end{array}$$

3.11 m.

6°. La deflexión correspondiente al punto inicial de la primera cadena completa será de:

$$3.11 \times 0^\circ 17.5' = 0^\circ - 54'$$

7°. La última cadena completa antes de llegar al PT estará situada a 11.75 m. del PT:

$$\begin{array}{r} 2 + 151.75 \\ - 2 + 140.00 \\ \hline \end{array}$$

11.75

8°. La última deflexión para cerrar el trazado en el PT será de:

$$11.75 \times 0^\circ - 17.5' = 3^\circ 26'$$

9°. La deflexión correspondiente a cada cuerda de 20 m. será igual a la mitad del grado de la curva:

$$5^{\circ} 50'$$

10°. Para facilitar el trabajo de localización en el campo, resulta conveniente presentar los datos en la cartera de campo, de la manera siguiente:

	Estación	Deflexión
	2 + 100.00	---
PC	2 + 116.89	0° 00'
	120.00	0° 54'
	140.00	6° 44'
PT	2 + 151.75	10° 06'

El trabajo de campo se realiza midiendo la longitud de la subtangente (ST) desde el PI para localizar el punto de cambio (PC). Luego, con el aparato centrado en el PC y con el vernier en cero, se da una vista hacia el PI, y posteriormente se da la primera deflexión de 0° 54', mientras el cadenero coloca la primera estaca de la curva en la estación 2 + 120. Posteriormente se dará una deflexión de 6° 44' para que el cadenero coloque la estaca de la estación 2 + 140.00, midiendo una cuerda de 20 m. desde la estación 2 + 120.00. El PT se colocará dando una deflexión de 10°-06' y midiendo una cuerda de 11.75 m. desde la estación 2 + 140.00. El PT así localizado debe coincidir con el punto previamente fijado, midiendo la ST desde el PI.

Canales pequeños en el fundo

Aún cuando el diseño de los canales pequeños sigue las mismas leyes que los canales mayores, para facilitar la selección rápida de las secciones en canales de poca capacidad, se insertan a continuación las tablas 5 y 6 que dan los valores de V

y Q para distintas condiciones de s , d y b , y para dos inclinaciones de taludes diferentes.

Las secciones indicadas corresponden a la forma más frecuente de los canales construidos en los fundos, donde la forma y profundidad del canal está, usualmente, limitada por la clase de equipo con que se construye.

T.BLA N°5

CAPACIDAD DE CANALES PEQUEÑOS CONSTRUIDOS EN TIERRA

TALUDES: 1 : 1

n = 0.030

Profundidad del agua (d)	Pendiente en centímetros per 100 Metros							
	5		10		20		30	
	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q
	m/s	m ³ /h.	m/s	m ³ /hr	m/s	m ³ /hr	m/s	m ³ /hr
<u>Ancho del fondo: b = 20 cmts.</u>								
10	.116	12.5	.165	17.8	.232	25.3	.284	34.0
15	.143	27.0	.202	38.2	.286	54.1	.350	66.1
20	.165	47.5	.234	67.4	.331	95.3	.405	116.6
25	.186	75.3	.264	107.0	.373	153.2	.456	187.4
30	.204	110.2	.288	155.6	.407	220.0	.498	269.0
<u>Ancho del fondo: b = 30 cmts.</u>								
10	.125	18.0	.177	25.5	.250	36.0	.307	44.2
15	.153	37.2	.216	52.5	.306	74.4	.374	90.0
20	.177	63.7	.250	90.0	.353	127.2	.432	156.0
25	.196	97.0	.280	138.7	.395	195.5	.484	244.3
30	.217	140.6	.307	199.0	.434	281.0	.531	344.0
<u>Ancho del fondo: b = 50 cmts.</u>								
10	.135	29.2	.191	41.2	.270	58.4	.330	71.3
15	.166	58.3	.236	82.9	.332	116.7	.407	143.2
20	.192	96.7	.272	137.0	.383	193.0	.469	236.3
25	.214	144.5	.304	205.5	.429	290.0	.525	355.0
30	.236	204.0	.334	290.0	.472	409.0	.578	500.0

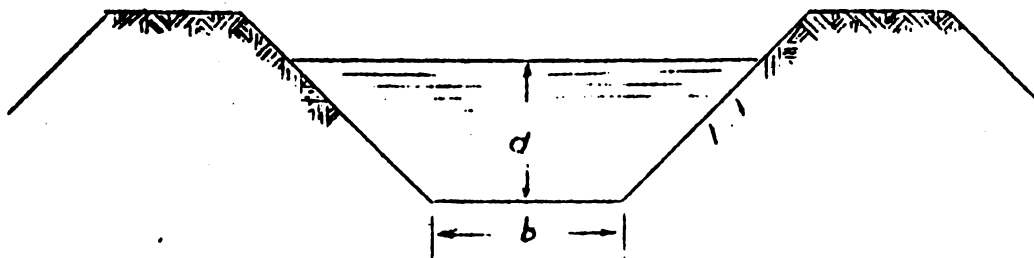


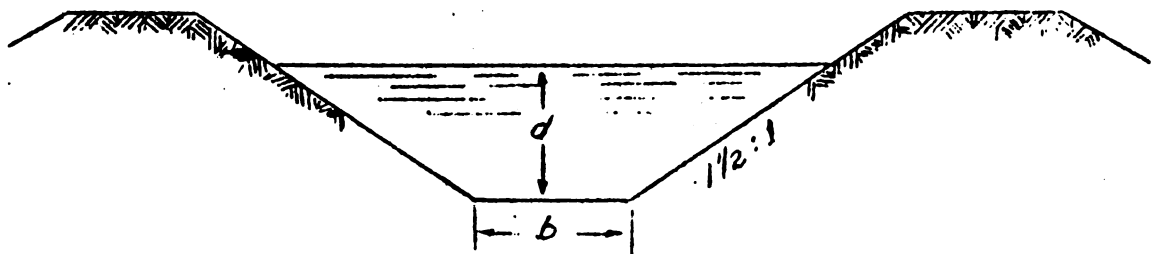
TABLA N° 6

CAPACIDAD DE CANALES PEQUEÑOS CONSTRUÍDOS EN TIERRA.

TALUDES: 1,1/2 : 1

n = 0.030

Profundidad del agua (d)	Pendiente en centímetros por 100 metros							
	5		10		20		30	
	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q
	m/s	m ³ /hr	m/s	m ³ /hr	m/s	m ³ /hr	m/s	m ³ /hr
<u>Ancho del fondo : b = 20 cmts.</u>								
10	.116	14.6	.165	20.8	.232	29.2	.284	35.8
15	.145	33.4	.206	47.5	.291	67.0	.356	82.0
20	.168	60.5	.239	86.0	.337	122.2	.412	148.4
25	.191	99.0	.270	140.0	.382	198.0	.467	242.0
<u>Ancho del fondo: b = 30 cmts.</u>								
10	.125	21.2	.176	28.5	.249	40.3	.305	49.4
15	.154	43.9	.218	62.1	.308	87.8	.378	107.5
20	.178	77.0	.252	109.0	.356	154.0	.436	188.3
25	.200	121.8	.284	172.8	.400	243.0	.491	290.0
<u>Ancho del fondo: b = 50 cmts.</u>								
10	.133	31.1	.188	44.0	.265	62.0	.325	76.0
15	.165	64.7	.233	91.3	.330	129.0	.403	158.0
20	.192	111.0	.272	157.0	.383	221.0	.469	270.0
25	.216	171.0	.306	242.0	.432	341.0	.529	418.0
30	.238	244.0	.336	345.0	.475	487.0	.582	597.0



BIBLIOGRAFIA

1. ADDISON, H. A Treatise on Applied Hydraulics. London. Chapman & Hall Limited. 1948. 614 p.
2. DAVIS, C. V. Handbook of Applied Hydraulics. New York, McGraw Hill Book Co., Inc. 1952. 1272 p.
3. ETCHEVERRY, B.A. Irrigation Practice and Engineering. Vol. II. Conveyance of Water. New York. McGraw Hill Book Co. Inc. 1915 - 364 p.
4. FREVERT, R. K. and OTHERS. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor. Edwards Brothers Inc. 1953.
5. KING, H. W., Handbook of Hydraulics. New York, McGraw Hill Book Co., Inc. 1939. 617 p.
6. PICKELS, G. W. Drainage and Flood-Control Engineering. New York. McGraw Hill Book Co. Inc. 1941. 476 p.
7. TRUEBA SAMUEL Hidráulica. México. Editora de Libros Técnicos "Avance". 1947. 430 p.
8. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. Irrigation Advisers' Guide. Washington 1951. 216 p.

.....

Dic. 1956
EB/ann
IA-25

RIEGO POR ASPERSION

El riego por aspersión está adquiriendo cada vez mayor importancia y aceptación debido al alto grado de uniformidad que puede obtenerse en la aplicación del agua: a la alta eficiencia de aplicación del agua; a la alta eficiencia que puede lograrse y a la eliminación del peligro de erosionar los suelos que es posible con este sistema. Estas ventajas del riego por aspersión pueden lograrse solamente, sin embargo, por medio de un diseño adecuado del sistema, que se ejecute de acuerdo con las condiciones de suelo y de clima de la localidad que se estudie y en función de los cultivos y de las características laborales que prevalezcan en dicha localidad.

La implantación del riego por aspersión implica siempre una alta inversión inicial, pero el monto de esta inversión puede reducirse considerablemente por medio de un diseño eficiente, y usando métodos adecuados de operación.

Aún cuando los métodos superficiales de riego resultan, generalmente, menos costosos, existen condiciones especiales de suelo y de topografía que imposibilitan o dificultan la aplicación de estos métodos y en donde el riego por aspersión ofrece ventajas definitivas. Tales condiciones pueden resumirse en la forma siguiente:

1. Suelos con un alto coeficiente de infiltración. Dentro de esta denominación entran los suelos arenosos y algunos suelos orgánicos, en los que resulta difícil obtener una buena distribución del agua por medio de los métodos superficiales de riego.
2. Suelos poco profundos. Todos aquellos suelos de escasa profundidad que están limitados por roca o por un manto de arcilla impermeable (clay-pan) o por una napa de agua próximos a la superficie, impiden la realización de un trabajo adecuado de nivelación, lo cual traería a la su-

perficie materiales indeseables o crearía problemas de drenaje. En tales circunstancias, resultará usualmente difícil obtener buena uniformidad de aplicación con los métodos superficiales.

3. Terrenos muy pendientes o con una topografía muy accidentada, en los cuales resultaría muy costoso un buen trabajo de nivelación, o donde los métodos superficiales son poco eficientes y ofrecen el peligro de erosionar los suelos.
4. Disponibilidad limitada de agua. Cuando una escasez de agua está asociada con la presencia de suelos muy permeables, el riego por medio de métodos superficiales, se hace extremadamente difícil y muy deficiente.

El costo inicial y el costo de operación de un equipo de riego por aspersión disminuye a medida que se aumenta el número de horas de operación del sistema, debido a que el gasto de agua requerido es inversamente proporcional al número de horas de operación del equipo. Un sistema que opere solamente 8 horas diarias requerirá un gasto 3 veces mayor que otro equipo que opere las 24 horas del día. El primer sistema necesitará, así, un equipo de bombeo más grande y tuberías de mayor diámetro, y los gastos fijos de depreciación e intereses serán considerablemente mayores. Por esta razón, los sistemas de riego por aspersión se diseñan para que operen de manera continua.

Composición del Sistema

El método de riego por aspersión más ampliamente difundido es el que usa rociadores de tipo rotatorio, según se describen más adelante. La discusión que sigue, se concretará casi exclusivamente a sistemas provistos de estos rociadores.

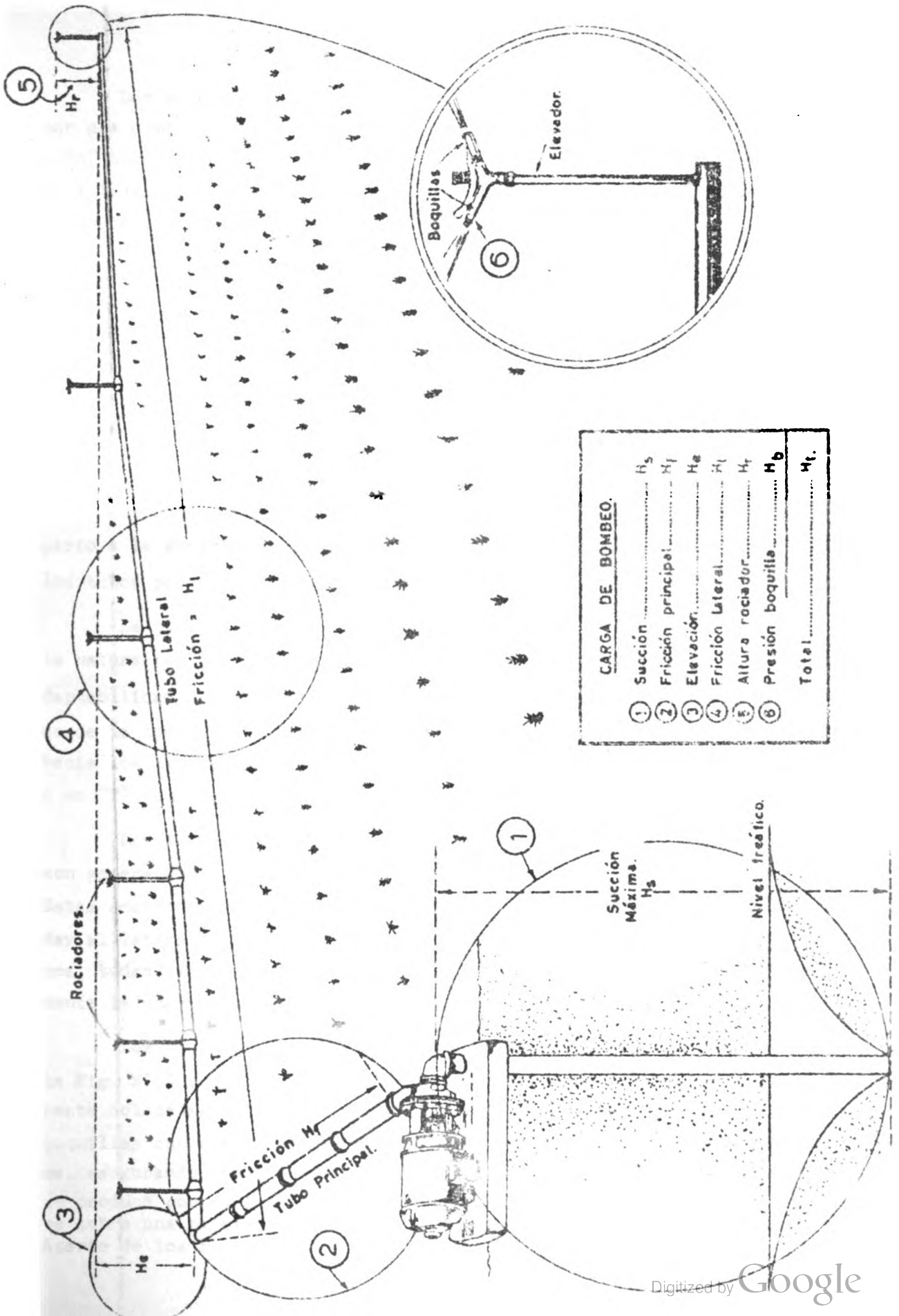


FIG. No 1. Elementos de un Sistema de Riego por Aspersión. Ref. 4.

Los sistemas de riego por aspersión están, generalmente, constituidos por una bomba que imprime presión al agua, una tubería principal de conducción, tubos laterales de distribución y rociadores de aplicación. La Fig. N° 1 ilustra un sistema semi-portátil de aspersión, en donde pueden apreciarse los distintos elementos componentes del sistema.

Los sistemas de riego por aspersión pueden ser permanentes, semi-portátiles o portátiles. En los primeros toda la instalación está definitivamente localizada en los campos de cultivos; en los segundos la bomba y en ocasiones la tubería principal son fijas y las laterales son transportables, en tanto que en los últimos tanto la bomba como el resto del equipo es móvil. Los dos últimos son los más corrientemente usados por su menor costo inicial.

La bomba debe seleccionarse de tal manera que descargue el gasto necesario a la presión que impongan la topografía, las pérdidas por fricción en los tubos principal y laterales y la presión requerida en los rociadores.

La tubería principal puede ser de localización fija o portátil, según la naturaleza del sistema, pero las tuberías portátiles permiten una mayor adaptabilidad y tienen un menor costo inicial. Esta tubería conduce el agua desde la bomba hasta los laterales. El agua es tomada de la línea principal hacia los laterales por medio de válvulas o por medio de aditamentos en "I" o en "T", que se colocan en los puntos de derivación.

Los laterales se fabrican en secciones de 20 ó 30 pies de longitud y son generalmente, contruidos de aluminio o de lámina de fierro galvanizado. Estas secciones se conectan entre sí por medio de uniones especiales, para dar al lateral la longitud deseada. La Fig. N° 2 muestra tres tipos de uniones, todas las cuales poseen una empaquetadura de caucho que sella completamente la unión, por razón de la misma presión del agua.

Los rociadores del tipo rotatorio están contruidos como se ilustra en la Fig. N° 3 y, generalmente, van provistos de dos boquillas de tamaño diferente colocadas en forma opuesta y a un ángulo diferente también. Una de las boquillas cubre el área más distante del rociador y la otra el área más próxima, asegurando mejor uniformidad de aplicación. La rotación de los rociadores se produce por el impacto que el chorro de agua de una de las boquillas produce sobre una paleta que se mantiene en posición por la acción de un resorte. Aparte de los rociadores de tipo "standard", mencionados anteriormente, se cons-

truyen también rociadores* especiales como los de ángulo reducido, muy propios para huertas de frutales, y los de grado de rotación ajustable, para las extremidades y las esquinas de los campos.

Los rociadores van, generalmente, conectados a los laterales por medio de un tubo elevador que sirve para quitarle turbulencia al agua y asegurar una operación más eficiente de los rociadores. La longitud mínima de los tubos elevadores varía según el gasto de los rociadores, como se recomienda en la tabla siguiente:

Tabla N° 1

Gasto del rociador en lts/min	Longitud del tubo elevador en m
15	0.15
50	0.25
100	0.35
200	0.50
400	1.00

Grado de Distribución del Agua

La distribución del agua de los rociadores, en los sistemas de riego por aspersión, se produce según se ilustra en la Fig. N° 4, en donde puede observarse que la aplicación de agua de cada rociador es menor en las áreas más distantes del rociador. En la Figura N° 5 se observa el efecto del viento sobre la distribución del agua. Por razón de los dos factores arriba ilustrados, y debido a la forma circular del área de aplicación

* En ocasiones se requieren elevadores más largos, a fin de aplicar el agua por encima del follaje de los árboles y evitar el impacto del agua sobre las flores y las frutas, o para asegurar una mejor distribución del agua, como ocurre en el riego de frutales, de banano y de café. Cuando el café se cultiva bajo sombra los rociadores deben quedar a una altura intermedia entre el arbusto de café y el árbol de sombrero.

de cada rociador, la distancia máxima entre los rociadores se calcula, generalmente, igual a 0.60 del diámetro húmedo de los rociadores, para vientos menores de 10 Kilómetros por hora. Esta distancia debe reducirse a medida que aumenta la velocidad del viento, según la tabla siguiente:

Tabla N° 2

Velocidad del viento en Km/hora	Espaciamiento entre rociadores en % del diámetro húmedo
Hasta 0	65
Hasta 6	60
Hasta 8	50
Mayor que 8	30 a 20

Cuando la distancia entre laterales es 60% del diámetro húmedo y la distancia entre rociadores de 40%, se produce una distribución como la que se ilustra en la Fig. N° 6.

Diseño de un Sistema de Riego por Aspersión

Antes de iniciar el diseño de un sistema de riego por aspersión, será necesario realizar un estudio general del fundo que se considera, con el fin de valorar en forma adecuada las condiciones existentes y diseñar el sistema con base en dichas condiciones específicas. En términos generales, la información necesaria está constituida por los siguientes elementos:

1. El suelo.- La profundidad y las características físicas del suelo que tengan relación con su capacidad de retención de agua y su grado de infiltración. El grado de aplicación de los rociadores en ningún caso debe sobrepasar al coeficiente de infiltración del suelo, para evitar el escurrimiento de agua superficial. Por otra parte, la periodicidad de los riegos y el tiempo total de aplicación estarán limitados por la capacidad de retención del suelo.

2. La topografía.- La pendiente general y la altura y localización de las partes más bajas y más altas del campo. Estos elementos permitirán estimar la distribución de las presiones en todo el sistema de distribución y calcular la carga total de bombeo requerida para asegurar máxima uniformidad de aplicación.
3. El agua.- Para diseñar el sistema será necesario localizar la fuente de abastecimiento de agua. Por otra parte, antes de diseñar el sistema será conveniente establecer la calidad de las aguas para los efectos del riego. El sistema de distribución y la longitud del tubo principal estarán condicionados por la localización de la fuente de abastecimiento.
4. Los factores meteorológicos.- La dirección y la velocidad de los vientos son factores importantes para determinar la dirección de los laterales y la distancia entre los rociadores, según se indicó anteriormente. La temperatura y la humedad relativa, por otra parte, afectan la eficiencia del riego, o sea, la relación entre el agua utilizada por las plantas y el agua aplicada por los rociadores. La eficiencia de riego puede estimarse según la tabla siguiente:

Tabla N° 3

Condición existente	Eficiencia de riego en %
Climas secos calientes	60
" moderados	70
" húmedos fríos	80

5. El cultivo.- Las cosechas que van a cultivarse deben determinarse previamente, a fin de determinar los requisitos de agua del sistema y para conocer la profundidad del suelo que debe humedecerse en cada riego. Los capítulos correspondientes a "Requisitos de Agua de las Plantas" y "Propiedades Físicas de los Suelos", respectivamente, ofrecen una interpretación adecuada de estos factores.

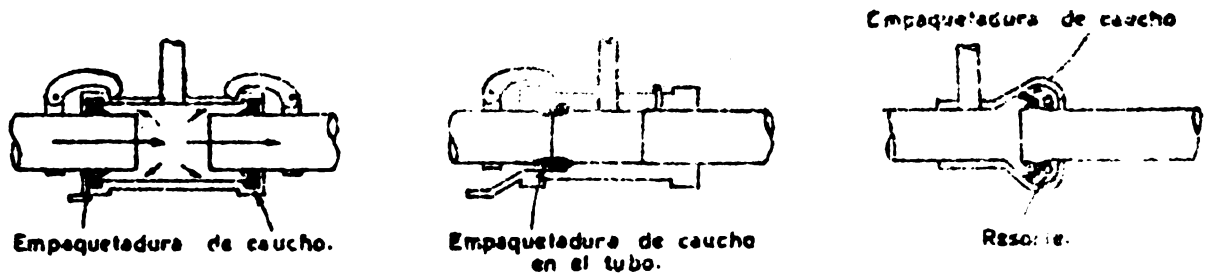
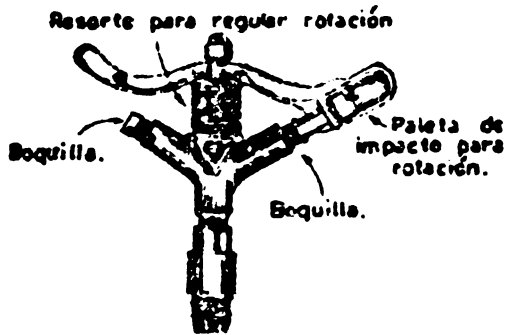
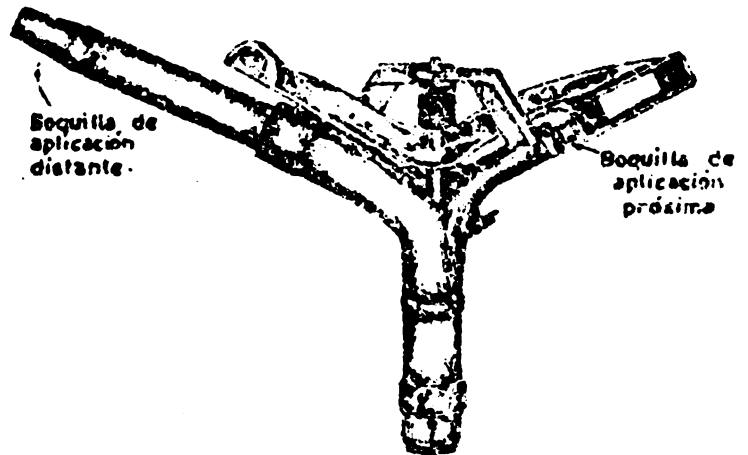


FIG. N° 2. Tipos de uniones para los laterales.

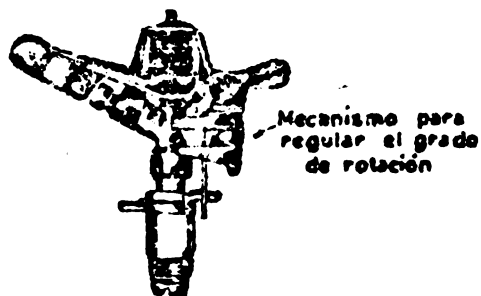
Ref 2.



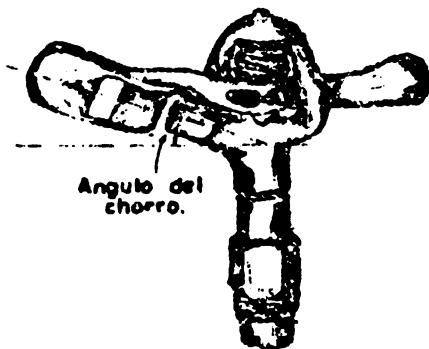
a) Standard.



b) Tipo gigante.



c) De grado de rotación regulable.



d) Con ángulo reducido para aspersión por debajo del follaje.

FIG. N° 3. Tipos de rociadores.

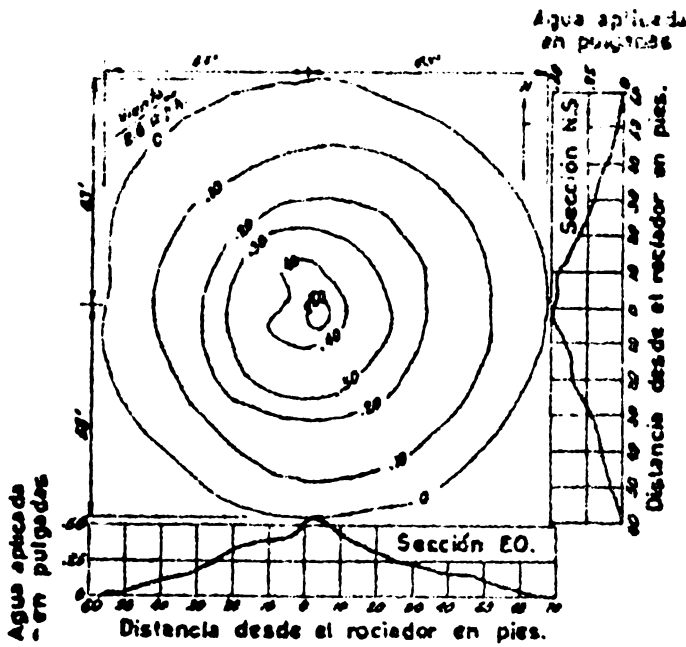


FIG. Nº 4. Distribución de agua de un rociador.
 Boquillas: $\frac{1}{4}$ " x $\frac{3}{16}$ " Presión: 40 lbs/pulg.²
 Gasto: 19.3 gal/min. Ref. 1

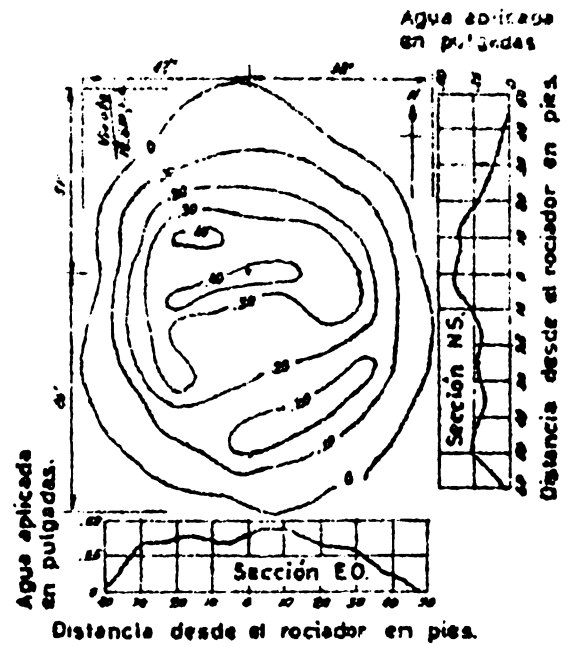


FIG. Nº 5. Distribución de agua de un rociador.
 Boquillas: $\frac{3}{16}$ " x $\frac{3}{16}$ " Presión: 30 lbs/pulg.²
 Gasto: 19.6 gal/min. Ref. 1

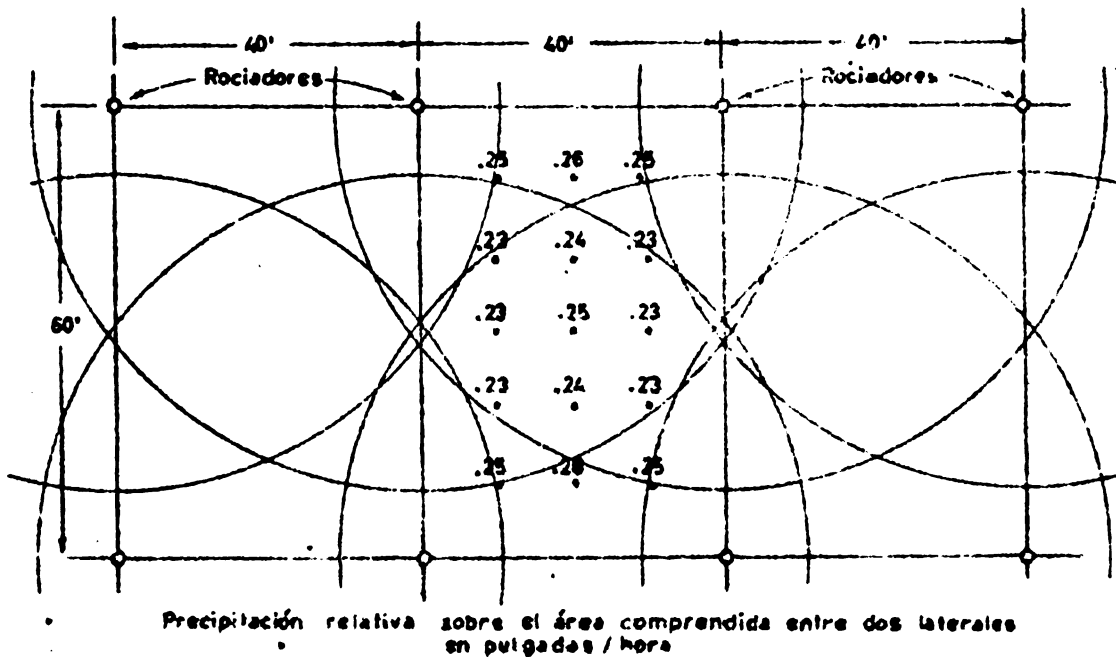
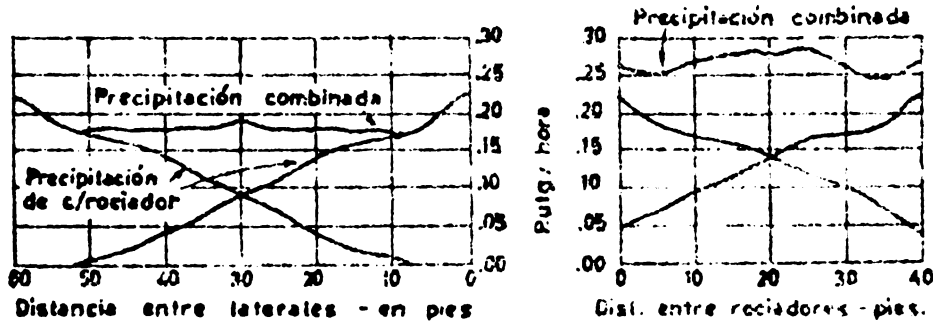


FIG. Nº 6. Distribución ideal del agua en un Sistema de Rociadores.
 Boquillas: $\frac{3}{16}$ " x $\frac{3}{16}$ " Presión: 40 lbs/pulg.²
 Gasto: 8.10 gal/min. Viento: 0.0 m.p.h.

6. **Energía disponible.**- Para seleccionar la unidad motora convendrá establecer si en el fundo que se estudia hay o no energía eléctrica disponible, o si resultará necesario el uso de un motor de combustión interna. El voltaje y los ciclos de la corriente disponible, así como el costo del Kilowatio-hora y la localización de las líneas o el costo del combustible, serán datos necesarios para seleccionar el motor y estimar el costo de operación del sistema.
7. **Sistema de trabajo.**- La modalidad del trabajo agrícola en la localidad que se estudia, así como el costo de la mano de obra, permitirán realizar un diseño que se adapte a estas condiciones, y valorar los costos probables de operación del sistema. En general, los sistemas de riego por aspersión se diseñan para que operen en forma continua con movimiento de los laterales cada 5, 7, 11 ó 23 horas, según se ilustrará más adelante.

Localización de la Línea Principal y de los Laterales.- La posición

que puede darse a la línea principal y a los laterales en un sistema de riego por aspersión, es prácticamente ilimitada. La localización del sistema de distribución debe permitir una eficiencia máxima de riego con un costo mínimo de operación. Algunas reglas generales permiten llegar a una solución adecuada con un mínimo de trabajo (Ref. 5).

1. El número de rociadores debe ser tal que el total del campo se ejecute en el número de días requerido, con un grado de aplicación inferior al coeficiente de infiltración efectiva del terreno.
2. El número total de posiciones de cada lateral debe ser inferior al producto entre el número de posiciones diarias por el número de días empleados para el riego total del campo.
3. Las líneas principales deben colocarse en el sentido de la máxima pendiente.

4. Los laterales deben colocarse en sentido normal a la máxima pendiente para que adopten una posición próxima a la horizontal.
5. Los cambios de tamaño en la tubería que sean necesarios para controlar la presión, deben hacerse en el tubo principal.
6. Cuando el sistema consta de varios laterales el diámetro de éstos debe ser uniforme, a fin de que puedan intercambiarse.
7. Siempre que sea posible, la bomba debe localizarse en el centro del campo.
8. El movimiento de los laterales debe planearse en forma rotatoria para evitar el transporte de los mismos a largas distancias.
9. Cuando existan en el terreno áreas irregulares de difícil acceso, puede considerarse la conveniencia de usar una bomba auxiliar para regar esas áreas.

Aparte de estas reglas generales es conveniente considerar que la fabricación de las tuberías en longitudes "standard" de 20 y 30 pies imponen espaciamientos entre rociadores y laterales que sean múltiplos de estas cifras. Por otra parte, el tamaño de los rociadores es también, hasta cierto punto, limitado y, en consecuencia, el sistema debe adaptarse a la disponibilidad de éstos. Los sistemas de aspersión más frecuentes presentan un espaciamiento, entre rociadores, de 40 pies y una distancia entre posiciones de los laterales de 50 pies (Ref. 2).

Las Figs. Nos. 7, 8 y 9 ofrecen algunas sugerencias en cuanto a la distribución general de varios sistemas de riego por aspersión.

Capacidad de los Rociadores

La capacidad de los rociadores, o sea, el gasto de cada rociador, es una función del espaciamiento entre éste y el grado

de aplicación requerido. En el sistema métrico la capacidad de cada rociador está dada por la siguiente relación:

$$Q = \frac{E_1 \times E_2 \times I}{6}$$

Donde: Q = Gasto en lts./min.

E₁ = Espaciamiento entre rociadores en m.

E₂ = Espaciamiento entre laterales en m.

I = Grado de aplicación en cm/Hora.

En el sistema inglés:

$$Q = \frac{E_1 \times E_2 \times I}{96.3}$$

Donde: Q = Gasto en gals/min.

E₁ = Espaciamiento entre rociadores en pies.

E₂ = Espaciamiento entre laterales en pies.

I = Grado de aplicación en pulgs/Hora.

El gráfico de la Fig. N° 10 presenta la solución gráfica de esta fórmula para los espaciamentos más corrientemente usados en la práctica.

Los valores de E₁ y E₂ son las distancias reales entre los rociadores, las cuales se establecen en función del diámetro húmedo de los mismos y según el porcentaje de superposición necesario para obtener una aplicación uniforme, como se explicó anteriormente.

El gasto teórico de los rociadores puede obtenerse por medio de las fórmulas siguientes (Ref. 1).

En el sistema métrico:

$$Q = 0.625 \times D^2 \times P^{1/2}$$

Donde: Q = Gasto en lts./min.

D = Diámetro de la boquilla en mm.

P = Presión en la boquilla en Kgm/cm²

En el sistema inglés:

$$Q = 28.4 D^2 \times P^{1/2}$$

Donde: Q = Gasto en gals/min.

D = Diámetro de la boquilla en pulgadas.

P = Presión en la boquilla en lbs/
pulg²

Tanto el diámetro húmedo de los rociadores, como la capacidad de los mismos vienen dados por los catálogos de los fabricantes, en donde puede seleccionarse el tiempo que mejor se acomode a los requisitos del problema que se estudie. La tabla N° 4 ilustra la forma en que los fabricantes presentan la información correspondiente a los rociadores que producen.

Capacidad del Sistema

La suma de los gastos individuales de todos los rociadores que operan simultáneamente constituye la capacidad total del sistema y representa el gasto que la bomba debe descargar.

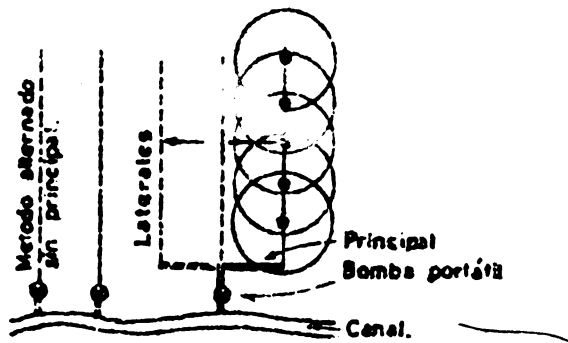


FIG. N° 7. Sistema completamente portátil.

Ref. 2

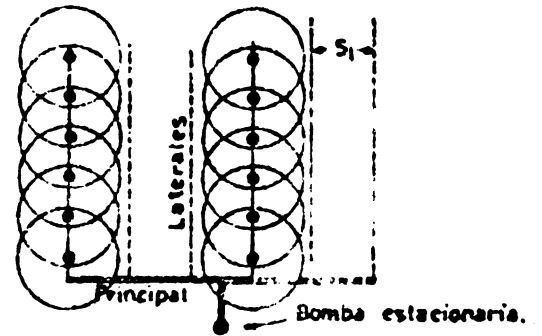


FIG. N° 8. Sistema semiportátil, con bomba estacionaria y tubos principal y laterales móviles.

Ref. 2.

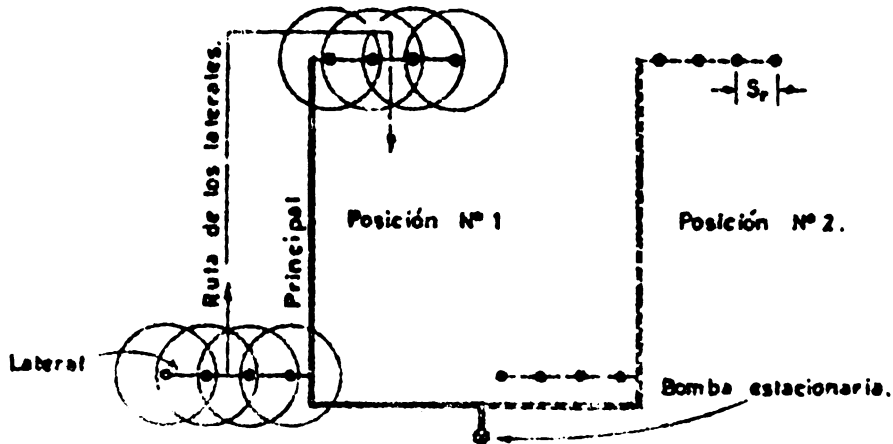


FIG. N° 9. Sistema semiportátil, con bomba estacionaria; principal estacionario o móvil y laterales móviles.

Ref. 2.

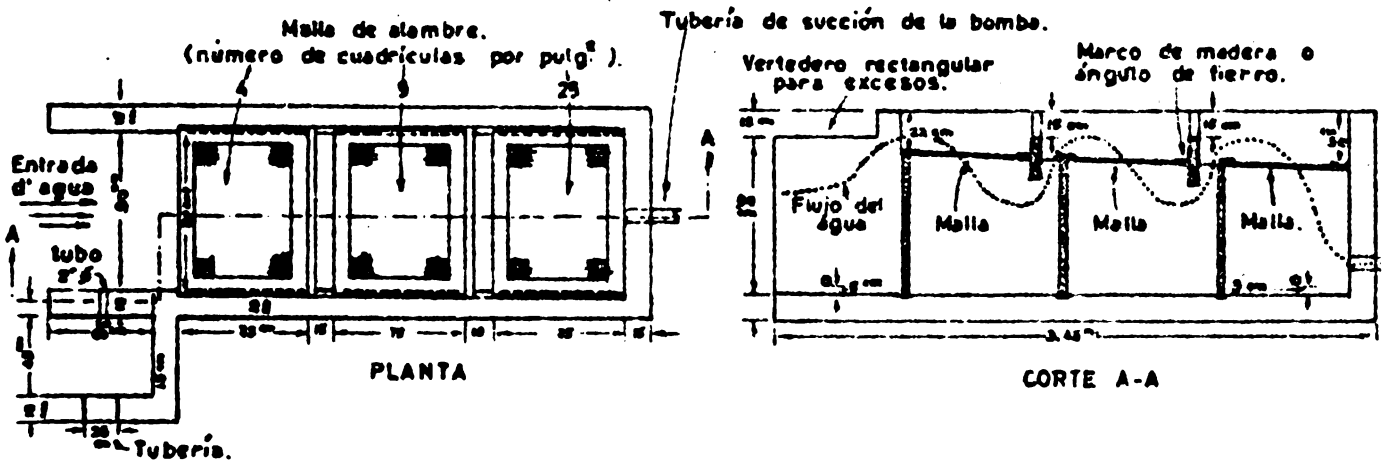


FIG. N° 10. Alberca para la sedimentación y limpieza del agua.

Ref. 7.

FIG. N° 10.- RELACION ENTRE GRADO DE PRECIPITACION Y GASTO DE LOS ROCIADORES

$$P_r = \frac{Q \times 96.3}{E_1 \times E_2}$$

P_r = Precipitación en pulgadas por hora.
 Q = Gasto en gal/min.
 E_1 = Espaciamiento entre laterales.
 E_2 = Espaciamiento entre rociadores.

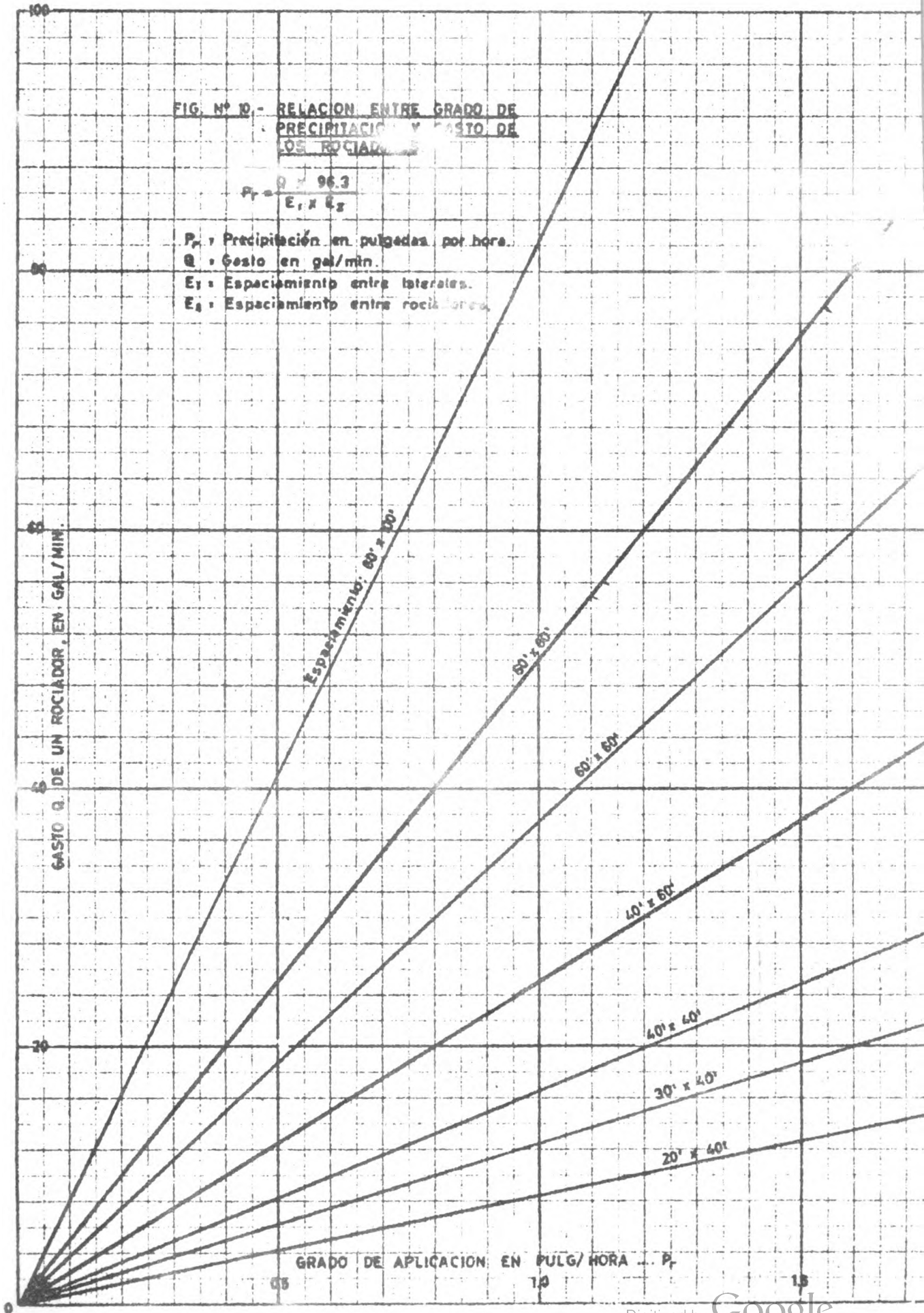


FIG. N° 10. - RELACION ENTRE GRADO DE PRECIPITACION Y GASTO DE LOS ROCIADORES

$$P_r = \frac{Q \cdot 96.3}{E_1 \cdot E_2}$$

- P_r : Precipitación en pulgadas por hora.
- Q : Gasto en gal/min.
- E_1 : Espaciamiento entre laterales.
- E_2 : Espaciamiento entre rociadores.

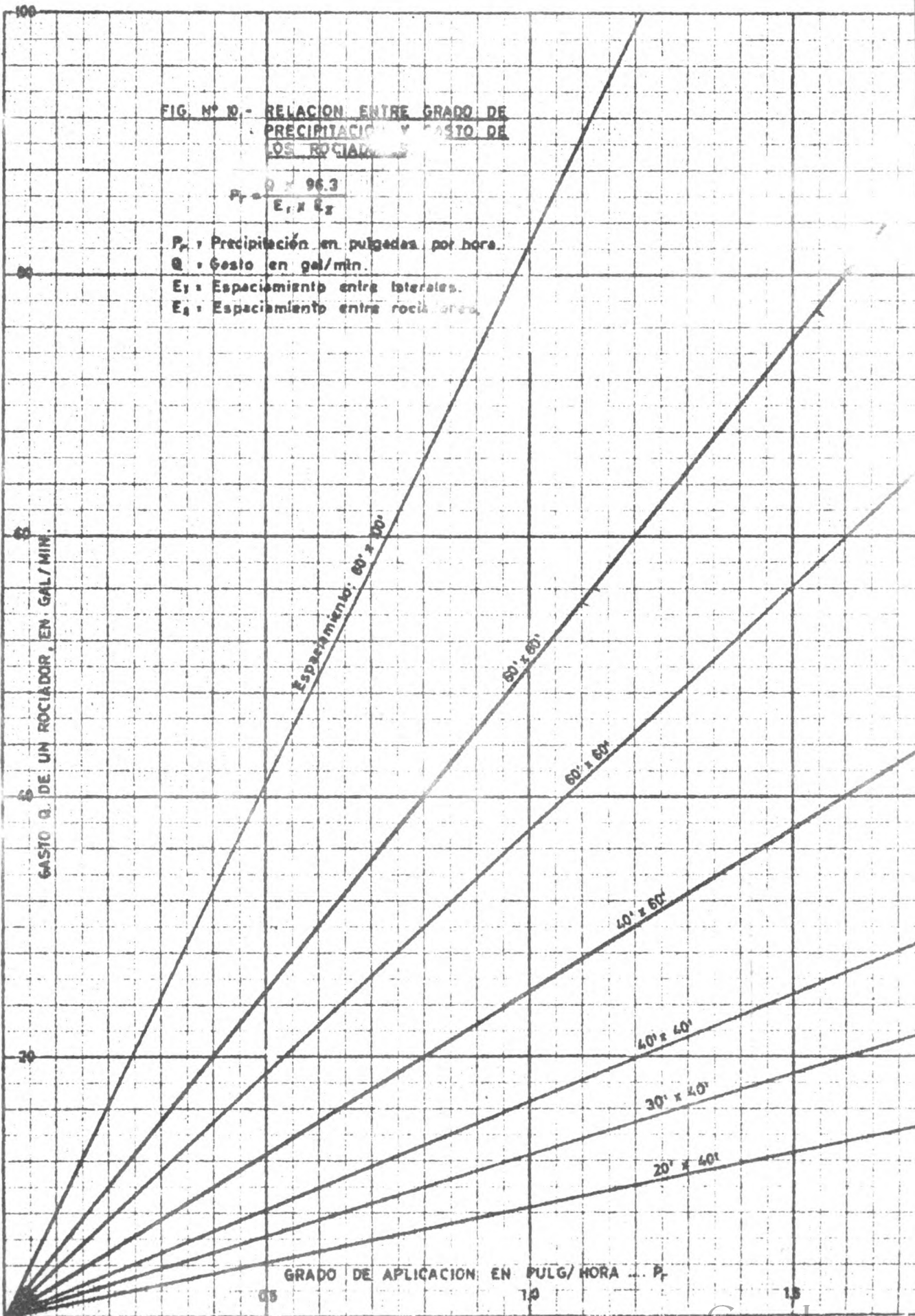


Tabla N° 4

TABLAS PARA SELECCION DE ASPERSORES *Aspersores con una Boquilla

Presión Lbs/pulg ²	Boquilla 5/32"		Boquilla 11/64"		Boquilla 3/16"		Boquilla 13/64"		Boquilla 7/32"	
	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.
25	82	3,52	83	4,24	85	5,00	86	5,89	88	6,83
30	85	3,85	88	4,64	91	5,50	94	6,51	96	7,58
35	87	4,16	90	5,02	94	5,97	97	7,08	100	8,26
40	88	4,45	92	5,37	96	6,41	99	7,60	102	8,87
45	89	4,72	93	5,70	98	6,81	101	8,07	104	9,41
50	90	4,98	95	6,01	100	7,18	103	8,49	106	9,88
55	91	5,22	96	6,30	101	7,51	104	8,87	107	10,3
60	92	5,44	97	6,56	102	7,82	105	9,20	108	10,6

Aspersores con dos Boquillas

Presión Lbs/pul ²	Boquilla 5/32"x 3/32"		Boquilla 11/64"x3/32"		Boquilla 3/16"x 3/32"		Boquilla 3/16"x7/64"		Boquilla 3/16"x1/8"	
	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.	Diám. en pies	Gasto g.p.m.
25	82	4,74	83	5,45	85	6,31	85	6,80	85	7,12
30	85	5,19	88	6,00	91	6,98	91	7,50	91	7,85
35	87	5,63	90	6,50	94	7,57	94	8,10	94	8,52
40	88	6,05	92	6,98	96	8,10	96	8,60	96	9,16
45	89	6,45	93	7,45	98	8,62	98	9,10	98	9,80
50	90	6,83	95	7,87	100	9,10	100	9,60	100	10,40
55	91	7,18	96	8,30	101	9,56	101	10,10	101	10,90
60	92	7,52	97	8,67	102	10,0	102	10,60	102	11,50

* Tomada de Ref. 3

La capacidad del sistema puede expresarse también en función del área que va a regarse (A); del espesor de la lámina de agua que se aplicará en cada riego (D); y del tiempo total de operación (T).

$$Q_t = \frac{D \times A}{T}$$

En el sistema inglés:

$$Q_t = 453 \frac{A \times D}{N \times H}$$

Donde: Q_t = Capacidad total en gals/min.

A = Area en acres.

D = Espesor de la lámina de agua en pulgs.

N = Número de días de operación

H = " " horas de operación diaria.

En el sistema métrico:

$$Q_t = 1568 \frac{A \times D}{N \times H}$$

Donde: Q_t = Gasto en lts./min.

A = Area en Hectáreas.

D = Espesor de la lámina de agua en cm.

N = Número de días de operación.

H = Número de horas de operación diaria.

Grado y Volumen de Aplicación

Como se indicó anteriormente, el grado de aplicación, en ningún caso debe sobrepasar al coeficiente de infiltración efectiva del terreno que va a regarse, a fin de evitar el escurrimiento superficial del agua. Por otra parte, el grado de aplicación debe mantenerse por encima de unos 0.5

centímetros por hora, especialmente en los climas cálidos y secos con el fin de reducir las pérdidas por evaporación.

El volumen de aplicación de agua, en cada riego, está determinado por la capacidad de retención del suelo en la zona ocupada por las raíces efectivas del cultivo que se considera, según se explicó en el capítulo correspondiente a las propiedades físicas de los suelos.

Tamaño del Tubo Principal

El tamaño del tubo principal se determina con base en el gasto total de agua que haya de conducir en sus diversos tramos. El tubo principal debe tener un diámetro tal que asegure un costo mínimo de operación. Cuando el tubo es demasiado grande, las pérdidas por fricción son bajas y, en consecuencia, el tamaño de la bomba y del motor son inferiores, lo mismo que el costo de bombeo. Los tubos grandes son, sin embargo, más costosos, lo cual hace más altos los costos fijos de depreciación e intereses. Los tubos de diámetro menor producen un efecto contrario sobre los costos.

El diseño del principal se hace por medio de alguna de las fórmulas para el flujo de agua en tuberías, según se discutió en el capítulo correspondiente. La Fig. N° 11 ofrece un nomograma, en el sistema inglés de unidades, que permite la solución gráfica de varias de las fórmulas mencionadas.

Con el fin de mantener un balance hidráulico en todo el sistema, se hace necesario, en ocasiones, variar el diámetro de la tubería principal, como se explica en el ejemplo que finaliza este capítulo.

Tamaño de los Laterales

El tamaño de los laterales debe ser uniforme, para que las distintas secciones puedan intercambiarse, lo que facilita la operación del sistema y reduce las pérdidas de tiempo durante la instalación y transporte de los mismos.

Para asegurar una distribución uniforme del agua, será necesario mantener baja la variación de la presión a lo largo de los laterales. En la práctica, el tamaño de los laterales se selecciona de manera tal que la diferencia de presión entre el comienzo y el final de la línea no sea mayor que 20% de la presión de operación de los rociadores.

La Fig. N° 12 ofrece un nomograma para determinar las pérdidas por fricción en los laterales, según el espaciamiento de los rociadores a lo largo de la línea y según el gasto de cada rociador.

Para determinar la presión requerida en el tubo principal, a fin de asegurar una presión promedio adecuada de operación a lo largo del lateral, se tendrá en cuenta que la gradiente hidráulica a lo largo del lateral tiene una forma parabólica, debido a la reducción progresiva del gasto. La Fig. N° 13 ilustra cómo ocurren estas pérdidas por fricción. En ella P_m representa la presión requerida en el tubo principal; P_o , la presión al final del lateral; P_a , la presión promedio del lateral que corresponde a la presión de operación de los rociadores, la cual ocurre a $1/4$ de la longitud del lateral, L , medida desde el tubo principal; y B_f , las pérdidas por fricción.

CLASE DE TUBERIA.	K Scobey.	C Hazen Williams	n Manning
De acero-soldada en espiral-nueva.	0.32	140	0.009
De aluminio - nueva.	0.32	140	0.009
De "..." nueva.	0.32	140	0.009
De acero-soldada en espiral - 15 años.	0.40*	120	0.012
De acero remachada - 10 años.	0.44*	110	0.014
De duelas de madera - nuevas.	0.40	120	0.012
De duelas de madera - 15 años.	0.44*	110	0.014
De aluminio - portátiles - con uniones.	0.40*	120	0.012
De acero galvanizado - portátiles con uniones.	0.42*	115	0.013

* Valores recomendados para el diseño en las líneas principales de Sistemas de Riego por Aspersión.

EJEMPLO: Datos: Diámetro de la tubería : 8" Gasto: 450 gal/min.
 Buscar: Pérdidas por fricción para: $K_s = 0.32$.

Solución: Unase ① con ② y proyéctese hasta ③.
 Léase: pérdida de carga 4' por 1000'.

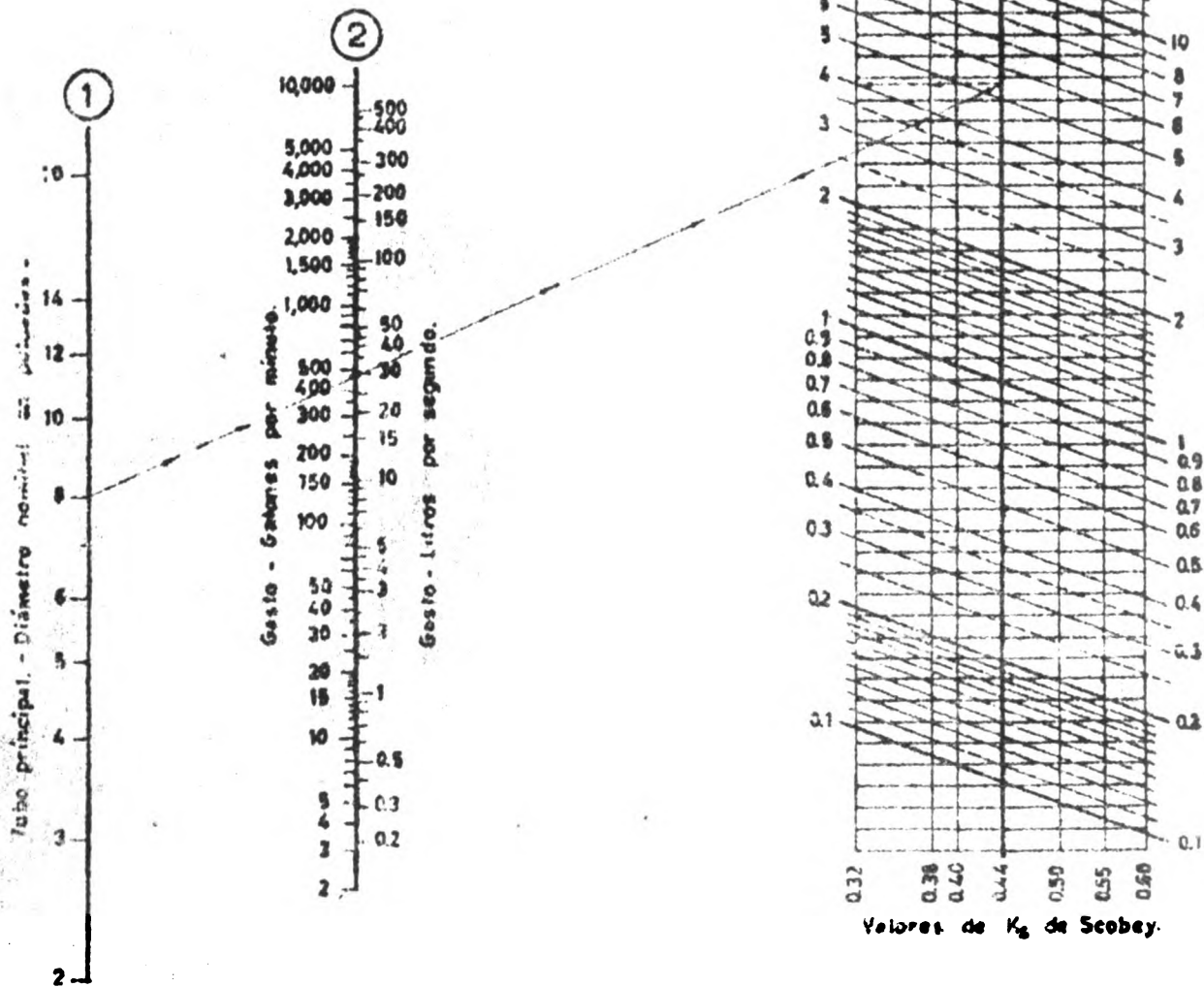
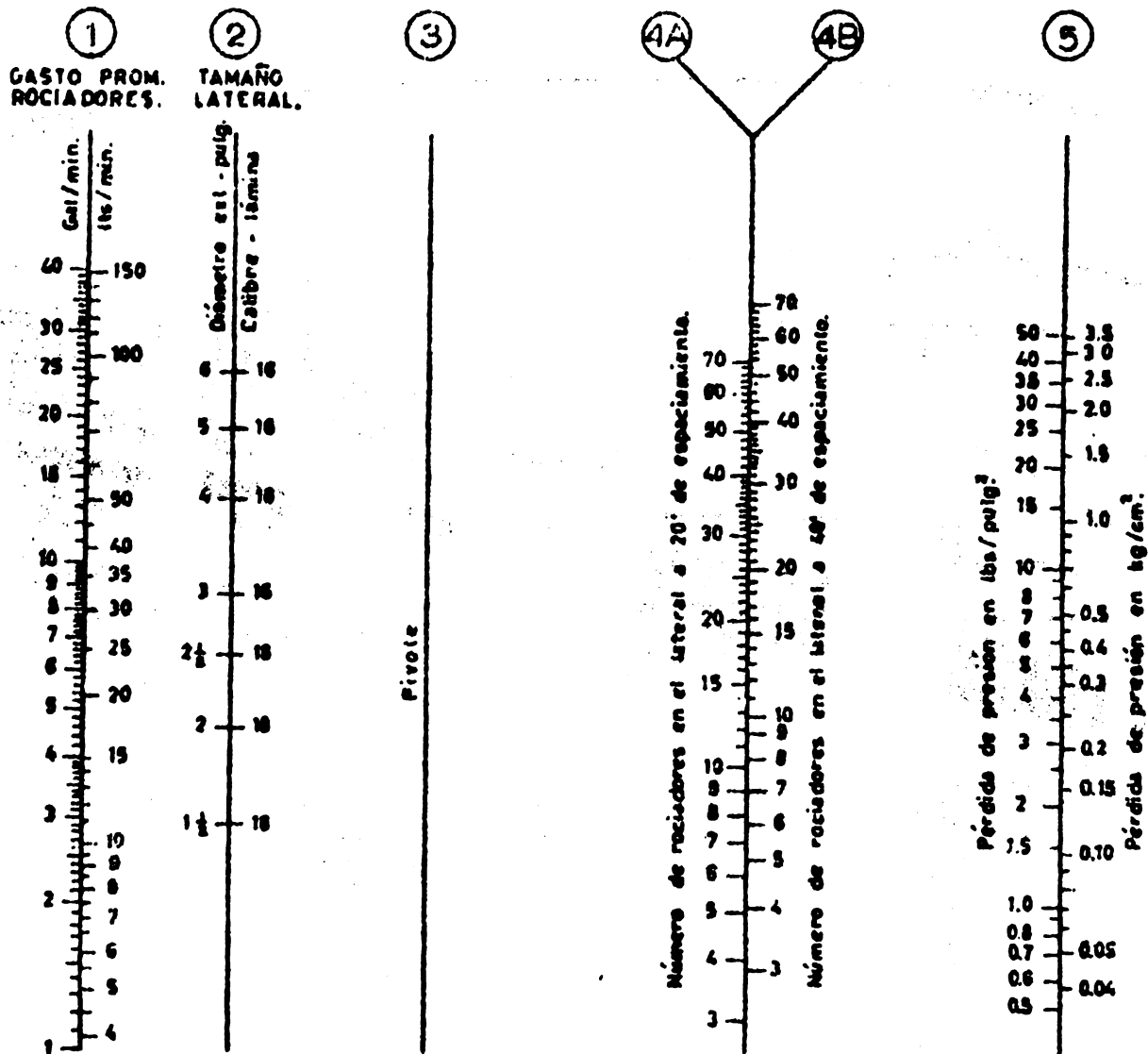


FIG. N° 11. NOMOGAMA PARA DETERMINAR LAS PERDIDAS POR FRICCIÓN EN LOS TUBOS PRINCIPALES.



PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE LOS LATERALES QUE PROPORCIONA UNA VARIACION EN EL GASTO DE LOS ROCIADORES MUYA O MENOR QUE 10% DEL GASTO PROMEDIO.

Dato: a) Gasto promedio de los rociadores de un lateral.
 b) Presión promedio requerida, y
 c) Número de rociadores en el lateral.

- Solución:**
- 1) Calcúlese el 80% de la presión promedio (b) y localícese este valor en la escala ⑤.
 - 2) Localícese el número de rociadores del lateral en la escala ④A ó ④B según el espaciamento entre rociadores. Trácese una recta entre los puntos localizados en ② y ④, y prolongúese hasta la escala ③.
 - 3) Trácese una recta entre el punto localizado en ③ y el gasto promedio de cada rociador en la escala ①.
 - 4) Léase en la escala ② el tamaño del lateral requerido.

• Cuando el espaciamento entre rociadores es diferente de 20 ó 40 pies, úsese el siguiente procedimiento:

- a) Calcúlese el 80% de la presión promedio de operación.
- b) Multiplíquese el valor obtenido por $\frac{20}{\text{Espaciamento}}$ y úsese el valor así obtenido para determinar el punto de la escala ⑤.
- c) Sígase el procedimiento antes descrito usando la escala ④A. Si se desea analizar un lateral de diámetro anómalo, para determinar la pérdida de presión, úsese la escala 4A y multiplíquese el valor obtenido en la escala ⑤ por $\frac{20}{\text{Espaciamento}}$.

FIG. N° 129. NOMOGRAMA PARA DETERMINAR LAS PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBOS LATERALES.

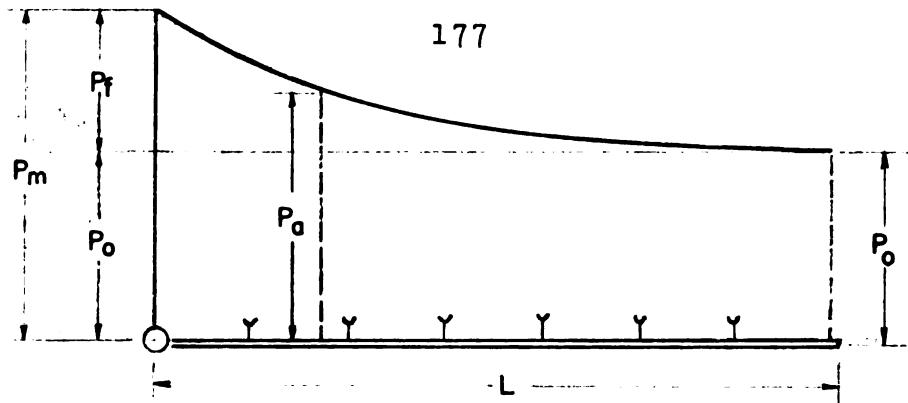
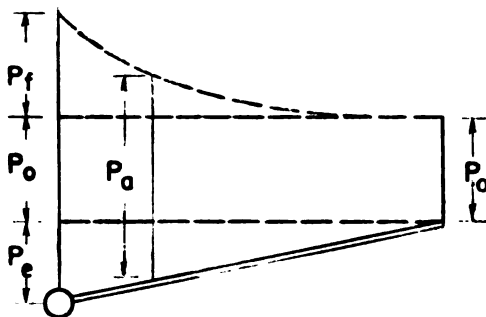


Figura N° 13

El valor de P_m para un lateral en terreno plano, como el que ilustra la Fig. N° 14, se obtendrá, así, en la forma siguiente:

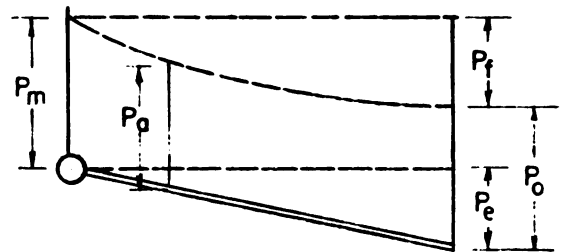
$$P_m = P_a + \frac{3}{4} P_f$$

Cuando el terreno es inclinado, como se ilustra en las Figs. Nos. 15 y 16, el valor de P_m se calculará teniendo en cuenta la ganancia o pérdida de carga debida a la inclinación del terreno, según se ilustra en dichas figuras.



$$P_m = P_a + \frac{3}{4} (P_f + P_e)$$

Figura N° 14



$$P_m = P_a + \frac{3}{4} (P_f - P_e)$$

Figura N° 15

Selección de la Bomba y del Motor

La selección de la bomba se realiza en función del gasto total de agua requerido y de la carga total de bombeo necesaria. Esta carga de bombeo está constituida por la profundidad del nivel del agua en la fuente de abastecimiento (H_s), las pérdidas por fricción en la tubería principal (H_f), la diferencia de elevación entre la bomba y el punto más alto de descarga (H_e), la pérdida por fricción en los laterales (H_l), la altura de los rociadores (H_r), y la presión requerida en las boquillas (H_b). La carga total de bombeo (H_t), es la suma de todos estos valores, como se indica a continuación y se ilustra en la Fig. N° 1.

$$H_t = H_s + H_f + H_e + H_l + H_r + H_b$$

Tanto la bomba como el motor se seleccionarán como se explica en el capítulo correspondiente a Bombas para Riego y Desagües, de este manual.

Cuando la fuente de abastecimiento de agua es un cauce superficial que arrastra mucho limo u otros materiales que pueden deteriorar la bomba y las boquillas, o materiales flotantes, como semillas de malezas que puedan infestar los campos de cultivo, resultará conveniente instalar antes de la bomba una alberca de sedimentación con tamices separadores, como la que se ilustra en la Fig. N° 16.

Usos Accesorios del Equipo de Aspersión

Los equipos aspersores, además de aplicar el agua de riego, se usan a veces para el cumplimiento de algunas funciones accesorias en el fundo, tales como la aplicación de fertilizantes nitrogenados líquidos, el control de las heladas, el control de incendios en los fundos, etc. Aún cuando tales funciones no justifican por sí solas la adquisición de un equipo de riego por aspersión, ellas constituyen, en algunos casos, ventajas apreciables que pueden aprovecharse cuando se posee el equipo.

Ejemplo del diseño de un sistema de riego por aspersión:

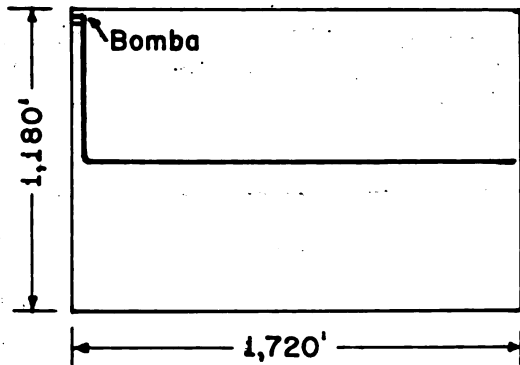


Figura N° 17

1. Cantidad de agua para llenar el suelo hasta su capacidad de campo = 3,75"
2. Consumo de agua en época de máximo uso = 0,15"/día.
3. Localización fuente de abastecimiento: como se indica en la Fig. N° 17.
4. Área: como se indica en la Fig. N° 17.
5. Topografía plana.

Solución:

1. Cantidad de agua que debemos aplicar = $D_a = 3,75''$
 Si la eficiencia de aplicación = 70%
 $D_a = 3,75/0,7 = 5,35''$
2. Frecuencia del riego.
 Si el consumo de agua en el período de máximo uso = 0,15"/día
 Frecuencia de riego = $3,75/0,15 = 25$ días.
 Regaremos cada 20 días para no permitir que el suelo llegue al coeficiente de marchitez.
3. Espaciamiento entre rociadores y posiciones de los laterales.
 Lo más frecuente es $E_r = 40'$ y $E_l = 60'$
4. Distribución del sistema: localización principal; localización laterales; espaciamiento de laterales.
 (a) La colocación del principal en un costado del campo haría que los laterales fueran demasiado largos.
 Decidimos colocarlo en el centro.
 (b) Para un $E_l = 60'$, el número de posiciones de los laterales será de $1720 \times 2/60 = 56$ posiciones, 28 a cada lado del principal.
5. Número de laterales requeridos.

Tabla para Análisis

No. de Orden	Número de laterales	No. de posiciones de cada lateral en 24 horas	No. Hrs/día en cada posición de c/lateral	No. de días requeridos para cubrir el campo	Grado de aplicación en pulgs/hora
1	2 asum.	2 asum.	11	14	0,486
2	1 "	3 "	7	18 3/4	0,765
3	3 "	1 "	23	18 3/4	0,233

En el caso N° 1 el número de días requeridos para cubrir el campo es sólo de 14, que es inferior a 20, lo que implicaría una mayor descarga de agua en la bomba y, en consecuencia, mayor costo inicial y mayor costo de operación.

En el caso N° 2 el grado de aplicación es muy alto y no puede lograrse con los rociadores que distribuyen el agua dentro de un espaciamento como el asumido, de 40 x 60. (Ver Fig. N° 10 y Tabla N° 4).

En el caso N° 3 el grado de aplicación está dentro de los límites admitidos y se puede lograr con rociadores del tipo escogido (40 x 60). Además, el número de días requeridos para cubrir el campo es muy próximo a la frecuencia de riego necesaria. Además, el número de horas de operación por día es bastante alto (23) lo cual implica operación continua, que se traduce en baja descarga total y, por consiguiente, en bajo costo inicial y bajo costo de operación.

Pregunta:

¿Qué sucedería si pusiéramos 1 lateral en 4 posiciones por día?
 " " " " 4 " " 1 " " "
 " " " " 2 " " 4 " " "
 " " " " 4 " " 2 " " "

N° de Orden	N° de Laterales	N° de posiciones de cada lateral en 24 horas	N° de hrs. en q/posición	N° de días para cubrir el campo	Grado de aplicación en pulgs/hr.
4	1	4	5	14	1,07
5	4	1	23	14	0,233
6	2	4	5	7	1,07
7	4	2	11	7	0,486

Usaremos el N° 3, esto es: 3 laterales con una posición por día para cada lateral, lo cual implicará 23 horas diarias de trabajo del sistema y 19 (18 3/4) días de trabajo, y un grado de aplicación de 0,233 pulgadas por hora.

6. Descarga requerida en cada rociador:

$$Q = \frac{I \times E_r \times E_1}{96,3} \quad (\text{Ver Fig. N° 10})$$

$$Q = \frac{0,233 \times 40 \times 60}{96,3} = 5,75 \text{ GPM}$$

7. Selección de los rociadores en el catálogo.
(Ver tabla N° 4).

(1) Presión lbs/	Tamaño Boquilla	Gasto/rociador GPM	Diámetro Húmedo (pies)
35	5/32" x 3/32"	5,63	87
$35 + \frac{0,08 \times 5}{0,42} = 36$	"	<u>5,75</u>	<u>87</u>
40	"	6,05	88
(2) 25	11/64 " 3/32"	5,45	85
$25 + \frac{5 \times 0,30}{0,55} = \underline{27,7}$	"	<u>5,75</u>	0,55 88.25
30	"	6,00	91

El rociador N° (1) requiere más precisión, por lo cual usaremos el número (2), o sea, uno con boquillas de $11/64" \times 3/32"$ que descargará 5,75 GPM a una presión de 27,7 lbs/pulg² con un diámetro húmedo de 88,25 pies.

$$\text{Distancia entre rociadores} = 88.25 \times \frac{40}{100} = 35 \approx 40 \text{ pies}$$

$$\text{Distancia entre laterales} = 88.25 \times \frac{60}{100} = 54 \approx 60 \text{ pies}$$

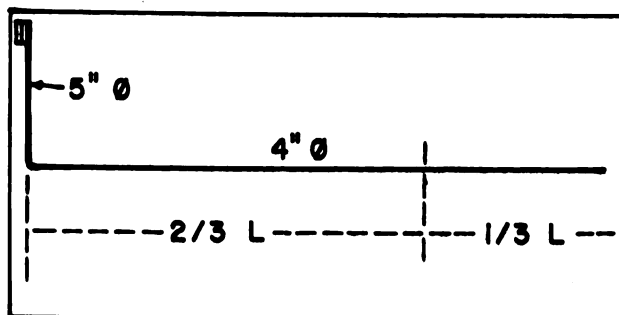
8. Capacidad total del sistema

Como los laterales tienen una longitud de 600 pies y el espaciamiento entre rociadores es de 40', el número de rociadores por lateral será de $600/40 = 15$, y como se tienen 3 laterales operando simultáneamente, se necesitarán $3 \times 15 = 45$ rociadores.

La descarga total requerida será $45 \times 5,75 = 258 \text{ GPM}$

9. Selección y ajuste de tubería principal

Primera posición:

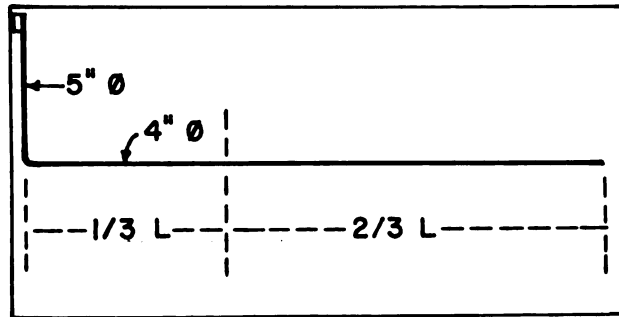


Se asume tamaño de tubería = 5 pulg. en los primeros 600 mts. (258 GPM) y 4" en el resto 1137': (172 GPM)

Hf (Fig. N° 12)

Hf en primeros 600' de 5" (258 GPM) = 0,6 lbs./□"/100	
600/100 x 0,6 =	3,6 lbs/□"
Hf en 1137' de 4" (172 GPM) = 0,95 lbs/□"/100'	
1137/100 x 0,95	10,8 lbs/□"
	<hr/>
Hf total	14,4 lbs/□"

Segunda posición:



En este caso 258 GPM fluirán en una distancia de 600' en tubería de 5" y luego 570' en tubería de 4". A partir de este punto fluirán sólo 86 GPM una distancia de 1137 pies en tubería de 4".

Hf (Fig. N° 12)

Hf en primeros 600' (258 GPM) Tubo de 5" = 0,6 lbs/□"/100'	
600 x 100 x 0,6 =	3,6 lbs/□"
Hf en siguientes 570' (258 GPM) tubo de 4"	
= 2,0 lbs/□"/100' 570/100 x 2 = 11,4	

Hf en siguientes 1137' (86 GPM) tubo de

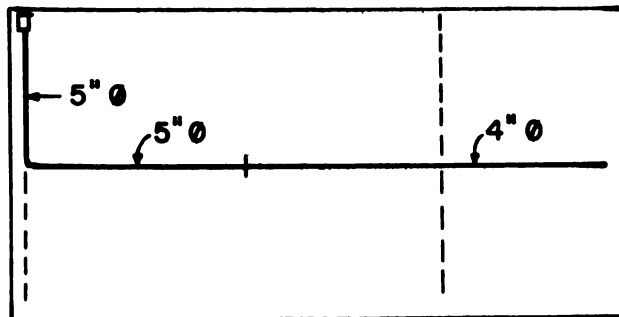
$$4" = 0,17 \text{ lbs/}\square\text{"/100' } 1137/100 \times 0,17 = 1,9$$

$$\text{Hf total} \quad \underline{\quad\quad\quad} \quad 16,9 \text{ lbs/}\square\text{'}$$

Las pérdidas por fricción calculadas representan las con diciones extremas con los tamaños de tubería seleccionados. Cualquier otra posición de los laterales ocasionará pérdidas por fricción que caerán dentro de los dos extremos establecidos. La diferencia que aparece en las pérdidas entre una y otra con dición no es objetable, pero las pérdidas en cualquier caso pa recen altas.

Se repetirá el análisis colocando tubería de 5" también en el primer 1/3 de la longitud que sucede al codo, colocado en el centro del campo a la izquierda.

Primera posición:



Hf en primeros 600 pies (258 GPM) tubo de 5"

$$= 0,6 \text{ lbs/}\square\text{"/100' } 600/100 \times 0,6 = 3,6 \text{ lbs/}\square\text{'}$$

Hf en siguientes 540 pies (172 GPM) tubo de

$$5" = 0,3 \text{ lbs/}\square\text{"/100' } 540/100 \times 0,3 = 1,6$$

Hf en siguientes 540 pies (172 GPM) tubo de

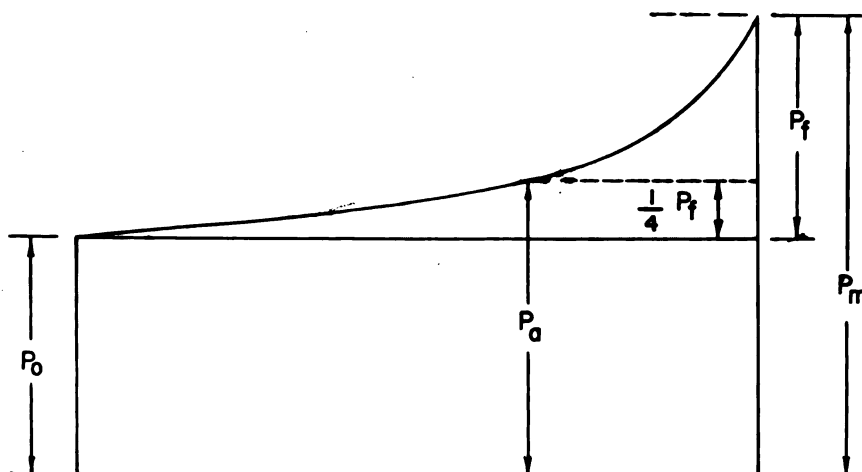
$$4" = 0,95 \text{ lbs/}\square\text{"/100' } 540/100 \times$$

Hf total

$$0,95 = \frac{5,4}{10,6} \text{ lbs/}\square\text{'}$$

Esta selección resulta mejor porque las pérdidas por fricción en la tubería principal son casi iguales para cualquier posición de los laterales. Por otra parte, la pérdida por fricción es menor que en el primer caso, lo que significa menor potencia y menor consumo de energía.

10. Selección de los laterales



La presión promedio de operación de los laterales es de 27,7 lbs/□"

La capacidad de cada rociador = 5,75 GPM

El número de rociadores en cada lateral = 15

Asúmase lateral de 3" ϕ

En Fig. N° 13, $h_f = 3$ lbs/□"

$P_o = P_a - H_f/4 = 27,7 - 3/4 = 26,95$ lbs/□"

$P_m = P_o + H_f = 26,95 + 3 = 29,95$ lbs/□"

P_o = Presión al final de la línea

P_a = Presión de operación de los rociadores (Promedio)

P_f = Pérdidas por fricción

P_m = Presión necesaria al comienzo de la línea

11. Carga total en la bomba (H_t):

a) Presión requerida en los rociadores más distantes de la línea principal	26,95 lbs/□"
b) Pérdidas por fricción en los laterales	3,00 "
c) Pérdidas por fricción en línea principal	10,60 "
d) Elevación del terreno sobre el nivel del agua 25'/2.31	10,80 "
e) Elevación de los rociadores sobre la superficie del suelo 2'/2.31	0,87 "
	<hr/>
Carga total	52,22 lbs/□"

Expresada en pies Hr = $52,22 \times 2,31 = 121$

12. Potencia requerida en el eje de la bomba, asumiendo una eficiencia de ésta de 70%.

$$HP_e = \frac{121 \times 258 \times 8,3}{33000 \times 0,7} = 11,3$$

Potencia necesaria en un motor eléctrico, asumiendo eficiencia de 85%.

$$HP_m = 11,3/0,85 = 13,3 \text{ HP}$$

Si se usara un motor Diesel debe evitarse la sobrecarga de éste, por lo cual se usaría un motor de:

$$11,3/0,70 = 16,1 \text{ HP}$$

R E F E R E N C I A S

- 1) CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation By Sprinkling. University of California. Bulletin 670. 1942. 124 P.
- 2) FREVERT, R. K. and OTHERS. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor, Edwards Brothers, Inc. 1953.
- 3) GRAY, A. S. Sprinkler Irrigation Handbook. Rain Bird Sprinkler Mfg. Corp. 1952. 40 P.
- 4) ROE, H. B. Moisture Requirements in Agriculture. Farm Irrigation. New York. McGraw Hill Book Co. Inc. 1950. 413 p.
- 5) U.S.D.A. Planning Sprinkler Irrigation Systems. Chapter VI. Part 1. Regional Engineering Handbook Pacific Region. 1949. (Mimeographed).
- 6) U. S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Sprinkler Irrigation U. S. D. I. Bureau of Reclamation. 1949. 61 P.
- 7) U. S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Irrigation Advisers Guide. U. S. Bureau of Reclamation. 1951. 216 P.

FLUJO DEL AGUA EN TUBERIAS

La circulación del agua en tuberías, es menos frecuente que la circulación del agua en canales en las obras de riego o de avenamiento, sin embargo, en casi toda obra de riego, es frecuente encontrar condiciones en donde resultará más conveniente que el agua circule a presión.

Fórmulas básicas

Cuando el agua o cualquier otro líquido fluye por una tubería, se producen pérdidas de energía o de carga, por razón de las siguientes causas:

1. Por fricción.
2. Por entrada.
3. Por salida.
4. Por ensanchamiento repentino.
5. Por contracción repentina.
6. Por obstrucciones del flujo (válvulas, etc.)
7. Por cambios de dirección.

Las pérdidas más importantes son, usualmente, aquellas debidas a fricción. Cuando las tuberías son muy largas, las pérdidas por fricción son de gran magnitud en relación con las otras, las cuales pueden llegar a ser sólo una pequeña fracción del total. En tales circunstancias, el cálculo de la tubería puede realizarse con base en las pérdidas por fricción solamente, despreciando las pérdidas de origen diferente.

Pérdidas por fricción. - Las pérdidas por fricción en tuberías pueden estimarse con base en la fórmula de Darcy, que tiene la forma siguiente:

$$H_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$

Donde: H_f = pérdidas de carga por fricción
 f = Coeficiente de fricción
 L = Longitud de la tubería
 d = Diámetro de la tubería
 V = Velocidad del agua
 g = Aceleración de la gravedad.

En ella puede observarse que las pérdidas por fricción son directamente proporcionales a la longitud del tubo y al cuadrado de la velocidad, e inversamente proporcionales al diámetro del tubo.

La tabla N° 1 da los valores de "f" para tuberías de fierro y de concreto.

Tabla N° 1 (1)

Valores de "f" para fierro y concreto
 en la fórmula de Darcy

Diámetro en pulgadas	Tubería de hierro nueva				Tubería de concreto			
	Velocidad en metros por segundo							
	0.50	1.50	3.00	6.00	0.50	1.50	3.00	6.00
1	0.040	0.035	0.034	0.030	0.055	0.047	0.043	0.039
3	0.030	0.027	0.025	0.023	0.042	0.035	0.033	0.030
6	0.025	0.023	0.021	0.019	0.035	0.030	0.027	0.025
10	0.022	0.020	0.019	0.017	0.031	0.026	0.024	0.022
15	0.020	0.018	0.017	0.015	0.027	0.024	0.022	0.020
24	0.018	0.016	0.015	0.013	0.024	0.021	0.019	0.018
36	0.016	0.014	0.014	0.012	0.022	0.019	0.017	0.016
48	0.015	0.013	0.013	0.011	0.020	0.018	0.016	0.015
72	0.013	0.012	0.011	0.010	0.019	0.016	0.015	0.013

(1) Tomada de Ref. 6

Si en la fórmula anterior el valor de H_f se expresa en metros de pérdida de carga por cada metro de longitud del tubo, el valor de L será 1 y la fórmula para la velocidad (V) del agua en tuberías puede expresarse en la forma siguiente:

$$V = \sqrt{\frac{2g}{f} d s} = C \sqrt{d s}$$

Donde: S = Pérdida de carga en m/m

Como el radio hidráulico R en las tuberías de sección circular es igual a $d/4$, la fórmula anterior también se puede escribir en la forma siguiente:

$$V = C_1 \sqrt{RS} \quad (\text{Fórmula de Chezy})$$

Con base en las fórmulas básicas anteriores, se han desarrollado varias fórmulas experimentales, en las que se ha establecido un valor variable para C_1 , como la fórmula de Manning, o se han modificado ligeramente los exponentes de d y s , como en las fórmulas de Scobey y de Hazen-Williams.

FORMULA DE MANNING.

En la fórmula de Manning, que ya fué discutida en el capítulo relativo al flujo de agua en canales, el valor de C_1 varía en función del coeficiente de rugosidad (n) de las paredes de la tubería, y del radio hidráulico (R) de la misma. C_1 tiene, así, la siguiente expresión:

$$C_1 = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

Reemplazando este valor en la fórmula de Chezy, la expresión para la velocidad toma la forma siguiente:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$V = \frac{0.397}{n} d^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{0.312}{n} d^{8/3} S^{1/2}$$

$$S = \frac{10.28 Q^2 n^2}{d^{16/3}}$$

Donde: V = Velocidad en m/seg.
 R = Radio hidráulico en m.
 d = Diámetro en m.
 S = Pendiente en m/m.
 Q = Gasto en m³/seg.
 n = Coeficiente de rugosidad.

La figura N° 3 del capítulo sobre circulación de agua en canales, ofrece un nomograma para la solución de la fórmula de Manning, y los valores de n se encuentran en la tabla N° 1 de dicho capítulo.

FORMULAS DE SCOBEEY.

Para tuberías de tablonés:

$$V = 1.02 d^{0.65} h^{0.555}$$

$$Q = 0.80 d^{2.65} h^{0.555}$$

Para tuberías de concreto:

$$Q = 2.3782 C_s d^{2.625} h^{0.5}$$

La figura N° 1 ofrece un nomograma para la solución gráfica de esta fórmula, e indica los valores de C_s para distintas clases de tuberías de concreto.

FORMULAS DE HAZEN-WILLIAMS.

Las fórmulas generales de Hazen-Williams tienen las siguientes expresiones:

$$V = K_2 d^{0.63} h^{0.54}$$

$$Q = K_3 d^{2.63} h^{0.54}$$

$$H_f = K_4 \frac{LV^{1.852}}{d^{1.167}}$$

Los valores de K_2 , K_3 y K_4 , en estas fórmulas, varían según la naturaleza del material de las tuberías, como se indican a continuación:

Tuberías muy lisas, por ejemplo, tuberías de hierro fundido nuevas y en buen estado, así como también tuberías de concreto bien alineadas.

$$K_2 = 1.105$$

$$K_3 = 0.868$$

$$K_4 = 0.000831$$

Tuberías nuevas de acero remachadas en espiral, y cuando la dirección de flujo es en el sentido del traslape. También tuberías de hierro fundido:

$$K_2 = 0.935$$

$$K_3 = 0.734$$

$$K_4 = 0.001132$$

Tuberías de acero remachado en espiral, cuando la dirección de flujo es contra el traslape. Tuberías de hierro fundido viejas. Tuberías de hierro forjado.

$$K_2 = 0.850$$

$$K_3 = 0.668$$

$$K_4 = 0.001351$$

Tuberías de madera lisas y en buen estado. Tuberías de concreto precolado. Tuberías de hierro forjado lisas y bien alineadas:

$$K_2 = 1.020$$

$$K_3 = 0.801$$

$$K_4 = 0.000963$$

En las fórmulas de Manning, s representa las pérdidas por fricción en metros de carga por metro de longitud de tubo, en tanto que en las fórmulas de Scobey y de Hazen-Williams h representa las pérdidas por fricción en metros por cada mil metros de tubería.

La figura N° 11 del capítulo sobre riego por aspersión, ofrece un nomograma para la solución de las fórmulas de Manning, de Scobey y de Hazen-Williams, en el sistema inglés de medidas.

Pérdidas por entrada.— Las pérdidas de carga por entrada ocurren por razón de la contracción del filete líquido al entrar a la tubería. Estas pérdidas son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del agua en el tubo y se puede expresar en la forma siguiente:

$$h_e = K_e \frac{v^2}{2g}$$

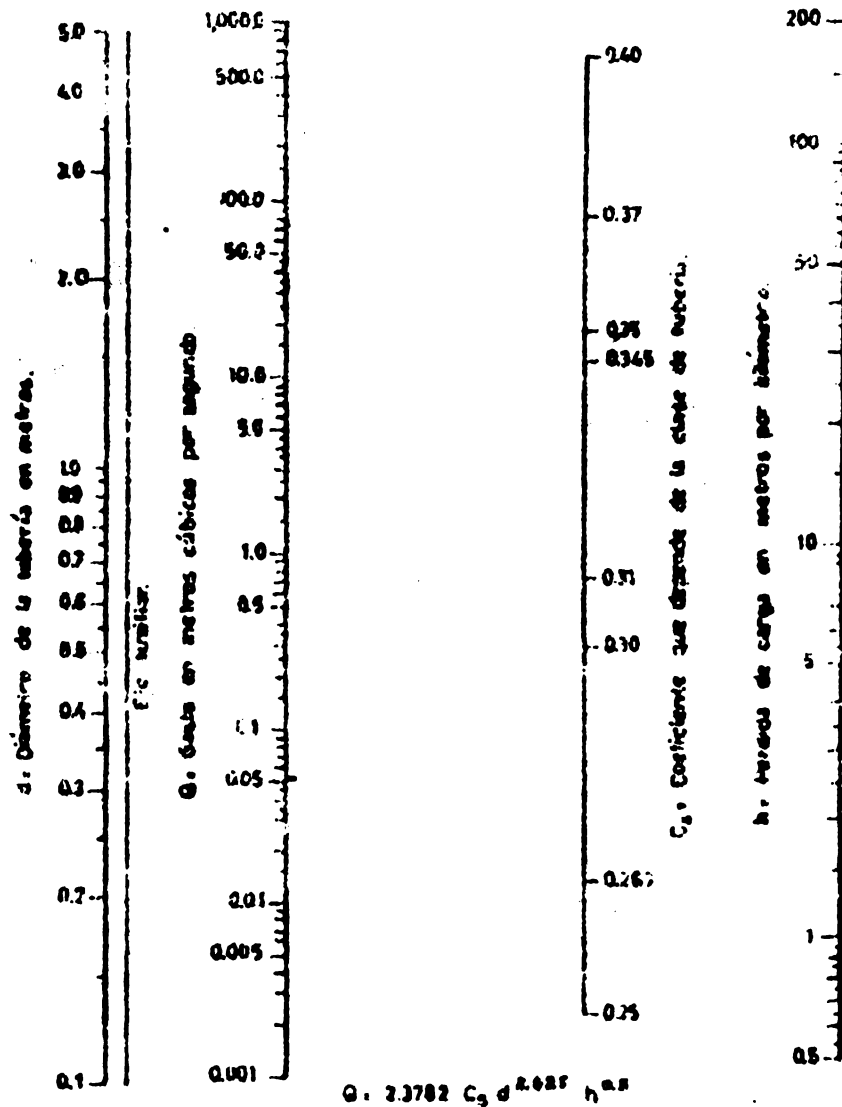
Donde: K_e es un coeficiente que varía según el grado de abocinamiento de la entrada.

Los valores de K_e pueden obtenerse de la tabla siguiente:

Tabla N° 2 (1)

<u>Forma de la entrada</u>	<u>K_e</u>
Tubo entrante	0.78
Aristas en ángulo recto	0.50
Aristas ligeramente redondeadas.....	0.23
Aristas abocinadas	0.04

(1) Tomado de Ref. 1.



COEFICIENTES C_2 PARA LA FORMULA DE SCOBEEY QUE DA LA PERDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN EN TUBERIAS DE CONCRETO.

- $C_2 = 0.267$ Para tuberías de concreto con juntas de mortero mal terminadas.
- $C_2 = 0.310$ Para tuberías de concreto hechas por el procedimiento de "revellura seca" ("dry mix"); para tuberías de concreto monolíticas o tubos revestidos sobre superficies irregulares; también para superficies que quedan cuando se emplea el procedimiento de colado con platos de cemento (concrete gun process).
- $C_2 = 0.315$ Para tuberías de diámetros pequeños de tramos cortos, hechas con el procedimiento de "revellura húmeda" ("wet mix"); para tramos largos hechos con "revellura seca"; para tuberías monolíticas hechas en formas de acero.
- $C_2 = 0.370$ Para tuberías reforzadas interiormente; para grandes tuberías de hierro revestidas con cemento; para tuberías monolíticas desde los puntos rugosos y todas las superficies expuestas son muy resistentes. Este coeficiente comprende trabajos de la mejor calidad tanto en mano de obra como en materiales.

FIG. N° 1. NOMOGRAMA PARA LA SOLUCION DE LA FORMULA DE SCOBEEY.

Pérdidas por salida.— Las pérdidas por salida ocurren, generalmente, en las transiciones de salida, de los sifones y el valor de las mismas ha sido determinado experimentalmente en función de la diferencia de velocidad entre el final y el comienzo de la transición. Su valor puede estimarse, aproximadamente, por medio de la fórmula siguiente:

$$h_s = 0.2 \frac{V_i^2 - V_f^2}{2g} \quad (\text{Ref. 2})$$

Igualmente, la pérdida de carga a la entrada de los sifones ha sido determinada experimentalmente, y puede calcularse en forma aproximada por medio de la fórmula siguiente:

$$h_s = 0.1 \frac{V_f^2 - V_i^2}{2g} \quad (\text{Ref. 2})$$

En estas fórmulas los símbolos *i* y *f* se refieren a las velocidades inicial y final del agua en la transición que corresponde.

Pérdidas por ensanchamiento brusco.— Las pérdidas por ensanchamiento brusco de los tubos ocurren por razón de la turbulencia que se desarrolla como consecuencia del cambio de velocidad del agua. Estas pérdidas pueden calcularse por medio de la fórmula siguiente:

$$h_n = K_n \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ref. 3})$$

$$\text{Donde: } K_n = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$$

V = Velocidad del agua en la tubería menor.

*A*₂ y *A*₁ = Áreas seccionales de las tuberías de menor y mayor diámetro, respectivamente.

Pérdidas por ensanchamiento gradual.- Estas pérdidas son menores que las producidas por un ensanche repentino y se reducen a medida que decrece la relación entre la diferencia de los diámetros y la longitud de la transición.

$$h_g = K_g \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ref. 3})$$

$$\text{Donde: } K_g = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \quad \text{Sen } \theta$$

A_2 y A_1 = Areas seccionales de las tuberías de menor y mayor diámetro, respectivamente.

θ = Angulo central de la ampliación.

V = Velocidad en el tubo de menor diámetro.

Pérdidas por contracción repentina.- Las pérdidas de carga por contracción repentina, pueden estimarse por medio de la fórmula siguiente:

$$h_r = K_r \frac{V^2}{2g}$$

Donde: V = Velocidad del agua en el tubo de menor diámetro.

El valor de K_r puede estimarse en función de la relación entre el área menor (A_2) y el área mayor (A_1) de los tubos, por medio de la tabla siguiente:

Tabla N° 3 (1)

$\frac{A_2}{A_1} =$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Kr =	0.47	0.43	0.39	0.34	0.30	0.26	0.21	0.16	0.08

(1) Tomado de Ref. 3.

A medida que la relación entre los diámetros decrece, de crecen también las pérdidas de carga.

Pérdidas por obstrucciones.- Estas pérdidas son debidas a la turbulencia que se produce cuando dentro de la tubería se presentan obstáculos, tales como las válvulas y otros adimentos para tuberías.

Estas pérdidas pueden estimarse por medio de una fórmula como la siguiente:

$$h_e = K_o \frac{v^2}{2g}$$

Donde el valor de K_o varía según el tipo de válvula o de aditamento que se considere, según se presenta en la tabla N° 4.

Tabla N° 4 (2)

Tabla para determinar los valores de K_o

<u>Condición</u>	<u>K_o</u>
Codos de 90° con radio amplio	0.25
" " 60° " " "	0.20
" " 30° " " "	0.15
" " 90° repentinos	1.50
" " 60° "	1.20
" " 30° "	0.90
"T", flujo recto	0.1
"T2, " en ángulo recto	1.5
Válvulas de compuerta (abiertas).....	0.00 - 0.01
" " " (mitad abiertas) ..	0.2
" " globo (abiertas).....	3.0 - 15.0
" " ángulo (abiertas)	5.0

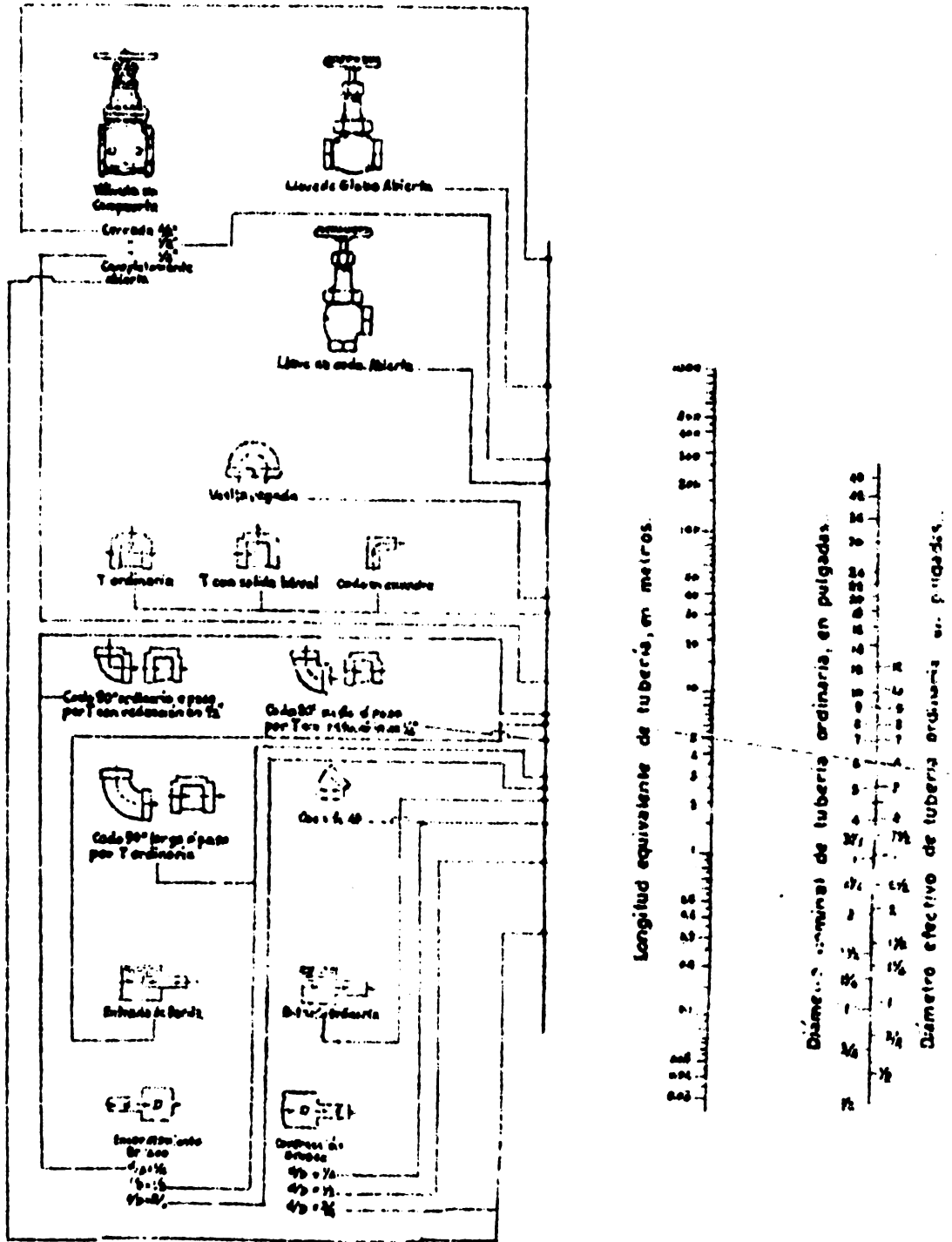
(2) Tomado de Ref. 5.

Algunas veces, sin embargo, se usa estimar la longitud del tubo que produce una pérdida de carga equivalente de fricción y sumar esta longitud al largo total de la tubería que se considera, para valorar así en forma global las pérdidas por fricción a lo largo de dicha tubería. El diagrama de la Fig. N° 2 permite hacer esta reducción para los aditamentos más frecuentes en las tuberías.

Pérdidas por cambio de dirección.— Estas pérdidas se estiman en forma aproximada por medio de la fórmula siguiente:

$$h_d = K_d \frac{v^2}{2g}$$

Donde K_d es un coeficiente que varía según el grado de la curva de la tubería y la relación entre el radio de la curva y el diámetro de la tubería. Los valores de K_d pueden obtenerse de la Fig. N° 3.



Ejemplo: La línea punteada muestra que la fricción en un codo ordinario de 6" es equivalente aproximadamente a la de 5 metros de tubería ordinaria del mismo diámetro.

Nota. Para enchuchamientos y reducciones bruscos úsese el diámetro mayor d. en la escala de los diámetros de los tubos.

FIG N° 2. GRAFICO PARA DETERMINAR LAS PERDIDAS DE CARGA PRODUCIDAS POR VALVULAS Y ACCESORIOS.

Ref: Crane Co. Catalog.

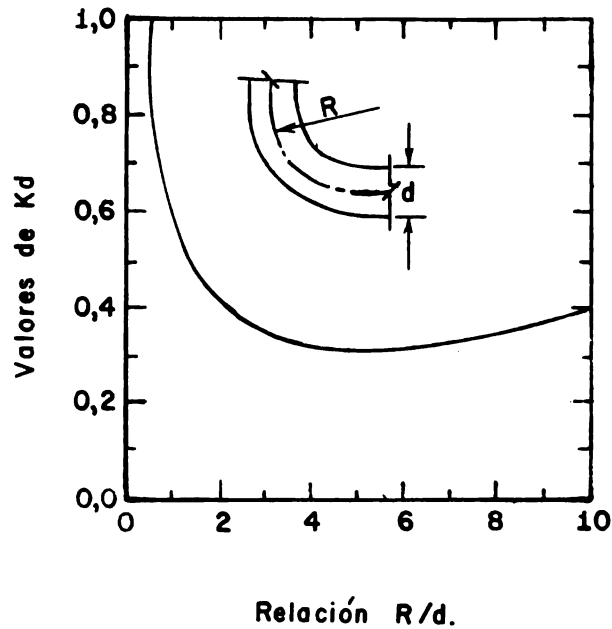


Fig. N° 3 - Valores de los coeficientes K_d en la fórmula

$$h_d = K_d \frac{v^2}{2g} \quad \text{Tomado de Ref. 4.}$$

Gradiente hidráulico y gradiente de energía.

Si en un punto (A) en una tubería horizontal de sección unifroem se insertara un piezómetro, como se ilustra en la Fig. N° 4, el agua subirá en dicho piezómetro hasta una altura (h), que estará en relación directa con la presión del agua en dicho punto. La altura del agua en el piezómetro estará dada por la siguiente relación :

$$h = \frac{P}{w}$$

Donde: h = Altura del agua en el piezómetro.

P = Presión en la tubería.

w = Peso específico del agua.

A medida que el agua fluye, se pierde carga debido a la fricción, y el valor de h se reduce, según se indica en la Fig. N° 4. Las pérdidas de altura que se observan en el piezómetro son debidas a la pérdida de energía de presión, ya que, siendo la tubería horizontal y de sección uniforme, no ocurrirán variaciones ni en la energía de posición ni en la energía de velocidad. La línea que une los niveles del agua en los piezómetros se denomina gradiente hidráulico.

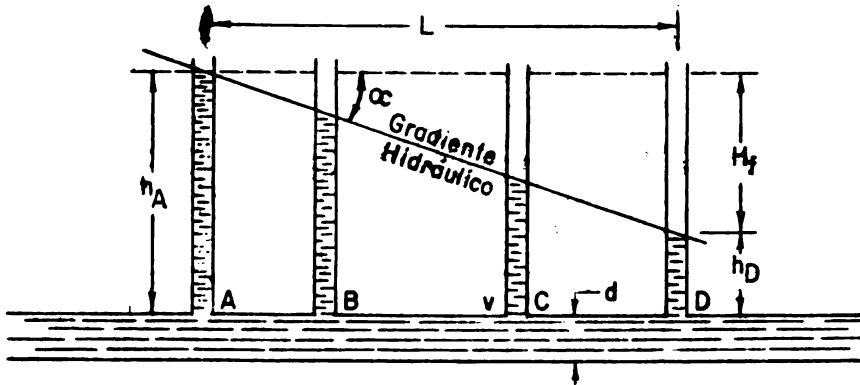


Figura N° 4

La energía total o carga total del agua en un punto cualquiera de la tubería, es la suma de la energía de presión y la energía de velocidad. La línea que une los puntos representativos de la energía total a lo largo de la tubería, representa la gradiente de energía.

La Fig. N° 5 ilustra la manera de obtener estas dos gradientes.

Determinación del diámetro más económico de una tubería. - En la selección de una tubería para una planta de bombeo, por ejemplo, pue

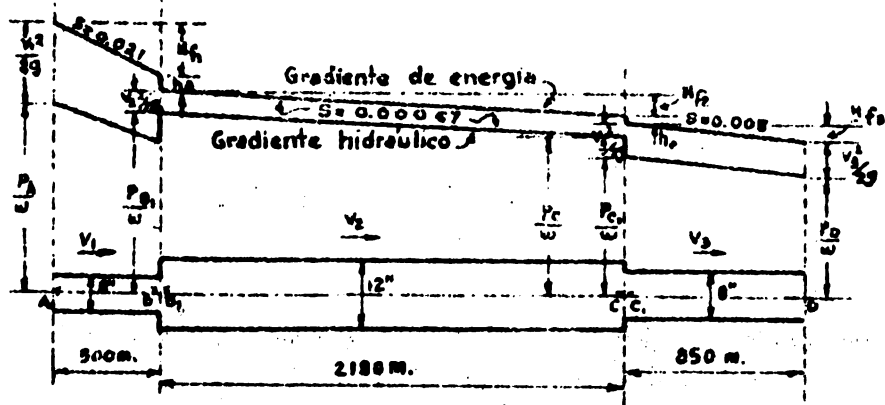


FIG N° 5 Gradientes hidráulicos y de energía. Tomado de Ref. 6

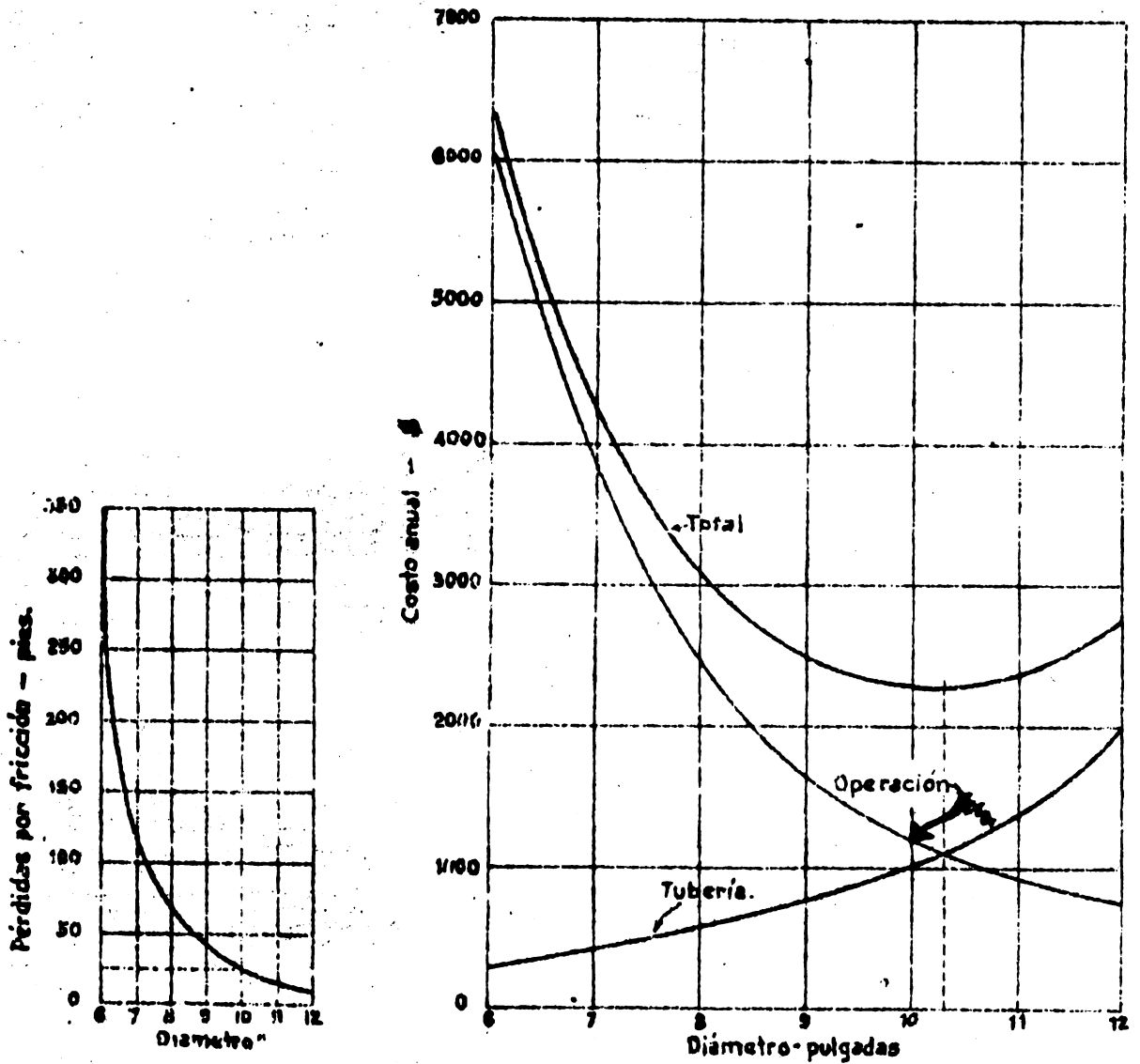


FIG. N° 6. Determinación del diámetro más económico en tuberías -

de presentarse el problema de escoger el diámetro más económico para la tubería de descarga. Si la tubería es de diámetro muy grande, la energía requerida para el bombeo será relativamente baja, lo que implica una inversión baja en la bomba y del motor y un costo menor de operación, pero un costo mayor de la tubería. Si la tubería es muy pequeña, ésta tendrá un costo bajo, pero la carga total de bombeo será mayor y, por consiguiente, será necesario un equipo de mayor capacidad y mayores costos de operación.

Para establecer el diámetro de tubería más económico será necesario hacer un balance entre los costos anuales de operación del sistema y con tuberías de diámetros diferentes. La figura N° 6 ilustra cómo hacer la comparación de estos valores. En las curvas correspondientes puede observarse que el diámetro más económico para ese ejemplo, sería de 10 pulgadas y la pérdida por fricción con esta tubería sería de unos 8 metros.

Ejemplos.

Se ofrecen a continuación dos ejemplos que ilustran el uso de las fórmulas anteriores para el cálculo de tuberías.

Ejemplo N° 1.- Calcúlense las pérdidas por fricción que ocurren en una tubería de fierro, para un gasto de 10 L/seg., cuando el diámetro del tubo es de 6 pulgadas y la longitud de 600 metros.

Solución:

A) Usando la fórmula de Darcy:

$$H_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.010 \times 4}{3.14 \times (0.1524)^2} = 0.55 \text{ m/seg.}$$

$$f \text{ (Tabla 1)} = 0.025$$

$$H_f = 0.025 \frac{600}{0.1524} \times \frac{0.302}{19.62} = 1.52 \text{ m.}$$

B) Usando la fórmula de Manning ($n = 0.013$):

$$s = \frac{10.28 Q^2 n^2}{d^{16/3}}$$

$$Q^2 = 0.0001$$

$$n^2 = 0.000169$$

$$d^{16/3} = 4.36 \times 10^{-5}$$

$$s = \frac{10.28 \times 1 \times 10^{-4} \times 1.69 \times 10^{-4}}{4.36 \times 10^{-5}} = 2.355 \times 10^{-3}$$

$$= 0.002355 \text{ m/m.}$$

$$H_f = 600 \times 0.002355 = 1.41 \text{ mts.}$$

C) Usando Nomograma para solución fórmula Manning
(Fig. 11, capítulo sobre Riego por Aspersión):

$$\begin{aligned}n &= 0.013 \\Q &= 10 \text{ L/seg.} = 158.5 \text{ gals/min.} \\d &= 6 \text{ pulgadas} \\h_f &= 2.5 \text{ pies/1000 pies} \\H_f &= 2.5 \times 600/1000 = 1.50 \text{ m.}\end{aligned}$$

Ejemplo N° 2.-Calcúlese el diámetro de una tubería de concreto que debe conducir un gasto de 20 L/seg. cuando la carga estática disponible es de 1 m. La longitud de la tubería es de 100 mts.

Solución:

1) Usando la fórmula de Manning:

$$S = \frac{1}{100} = 0.01$$

$$n = 0.014$$

$$Q = 20 \text{ lts/seg.} = 0.020 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$d = \left(\frac{Qn}{0.312 S^{1/2}} \right)^{3/8}$$

$$d = \left(\frac{0.020 \times 0.014}{0.312 \times 0.01^{1/2}} \right)^{3/8} = 0.00898^{3/8} = 0.172 \text{ m}$$

2) Usando nomograma de la Fig. N° 1, que resuelve la fórmula de Scobey, con $h = 10 \text{ }^\circ/\text{oo}$; $Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y $C_s = 0.34$, el valor de d resulta igual a 0.16 m.

3) Usando la fórmula de Darcy.

$$H_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$

$$L = 100 \text{ m.}$$

$$H_f = 1.0 \text{ m.}$$

$$v = \text{¿?}$$

$$d = \text{¿?}$$

$$f = \text{¿?}$$

a) Asumimos $d = 6'' = 0.152 \text{ m.}$

$$A = 0.786 \times (0.152)^2 = 0.0182 \text{ m}^2.$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.020}{0.0182} = 1.1 \text{ m/seg.}$$

En la tabla N° 1 $f = 0.032$

$$d = f \frac{L}{H_f} \frac{v^2}{2g}$$

$$d = 0.032 \frac{100}{1} \frac{(1.1)^2}{19.6} = 0.197 \text{ m.}$$

$$0.197 > 0.152$$

b) Asumimos $d = 0.17 \text{ m.}$

$$A = 0.786 \times (0.17)^2 = 0.0227 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.020}{0.0227} = 0.883 \text{ m/seg.}$$

En la Tabla N° 1 $f = 0.033$

$$d = 0.033 \frac{100}{1} \frac{(0.883)^2}{19.6} = 0.131 \text{ m.}$$

$$0.131 < 0.17$$

c) Asumimos $d = 0.16$

$$A = 0.786 \times (0.16)^2 = 0.02 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.02}{0.02} = 1.0 \text{ m/seg.}$$

En la Tabla N° 1 $f = 0.032$

$$d = 0.032 \frac{100}{1} \frac{(1.0)^2}{19.6} = 0.163$$

$$0.163 \approx 0.16$$

El diámetro de la tubería debe ser de 0.16 m. Si se ha de usar tubería de tamaño comercial, será preferible usar un diámetro de 8" = 0.23 m.

R E F E R E N C I A S

- 1) ADDISON, H. A Treatise on Applied Hydraulics. London, Chapman 6 Hall Ltd., 1948. 614 P.
- 2) DAVIS, C.V. Handbook of Applied Hydraulics. New York, McGraw Hill Book Co. Inc. 1952. 1272 P.
- 3) ETCHEVERRY, B.A. Irrigation Practice and Engineering, Vol. II Conveyance of Water. New York, McGraw Hill Book Co. Inc. 1915. 364 P.
- 4) FREVERT, R.K. Engineering in Soil and Water conservation. Ann Harbor, Edwards Brothers Inc. 1953.
- 5) KING, H.W. Handbook of Applied Hydraulics. New York, McGraw Hill Book Co. Inc. 1939. 617 P.
- 6) TRUEBA, SAMUEL Hidráulica. México, Editora de Libros Técnicos "Avance". 1947. 430 P.

BOMBAS PARA RIEGO Y DESAGUE

Generalmente la conducción del agua desde los cauces o depósitos naturales hasta los campos de riego, o desde las áreas inundables hasta los cauces de desagüe, resulta más económica cuando puede aprovecharse la gravedad. Existen casos, sin embargo, en donde las condiciones topográficas de los terrenos y su posición con relación a las fuentes de abastecimiento o cauces de desagüe, no permiten una diferencia de nivel adecuada para el transporte del agua, a menos que ésta sea elevada por medio de algún dispositivo mecánico.

El riego de los fundos localizados en las riberas de los ríos, cuando tales fundos no cuentan con la servidumbre necesaria para atravesar con un canal los predios vecinos superiores, o cuando debido a la topografía dicho canal resulta demasiado largo y costoso; el drenaje de las áreas inundables localizadas a niveles más bajos que los cauces de desagüe; el aprovechamiento de las aguas subterráneas; la necesidad de imprimir presión al agua en los sistemas de riego por aspersión; etc., son varios de los casos en que puede justificarse el empleo de tales dispositivos mecánicos.

Desde tiempos muy remotos, el hombre ha venido utilizando distintas clases de mecanismos para elevar el agua de riego o de drenaje y salvar algunas de las dificultades arriba mencionadas. Las palas oscilantes, los tornos, las ruedas de paletas o de baldes, las norias, los tornillos de Arquímedes, etc., son varios de esos mecanismos que todavía se usan en algunos países del Oriente. Debido a que tales mecanismos son poco eficientes en el uso de la energía y a su bajo rendimiento, han ido poco a poco cayendo en desuso y han sido reemplazados por otros mecanismos más eficientes y confiables, como son las bombas.

TIPOS DE BOMBAS.

Las bombas son máquinas que imprimen energía de presión a los líquidos. Esta energía es convertida en energía potencial y, generalmente, se emplean para la elevación de dichos líquidos.

Existe una gran diversidad de tipos de bombas, según el principio de operación de las mismas, o según la clase de mecanismo que utiliza estos principios.

La clasificación más amplia, quizá, pueda realizarse en función de la clase de movimiento que se emplee para imprimir energía de presión a los líquidos, distinguiéndose así los tipos de movimiento de recíproco y los de movimiento rotatorio. Dentro de los primeros encajan las bombas de pistones, de las cuales hay varias modalidades comerciales, y las bombas de diafragma. Entre las segundas se encuentran las bombas de cilindro rotatorio, las bombas de piñones, las bombas centrífugas, las de propulsión y las de flujo mixto.

Además de estos tipos de bombas, hay otros mecanismos, como el ariete hidráulico, la bomba de aire y otros, que son de uso frecuente para elevar agua.

En la práctica del riego y del drenaje las bombas de uso más frecuente son las centrífugas, las de propulsión, y las de flujo mixto. Por esta razón, la discusión que sigue, se referirá más específicamente a este tipo de bombas.

Bombas Centrífugas.

Las bombas centrífugas, cuya construcción se ilustra en la Fig. N° 1, son máquinas relativamente simples, de bajo costo, fáciles de operar y adecuadas para manejar aguas con algún contenido de limo y materias extrañas en suspensión. A estas características, así como a su alta eficiencia y a sus amplios límites de adaptación, deben las bombas centrífugas la gran aceptación que tienen para los trabajos de riego.

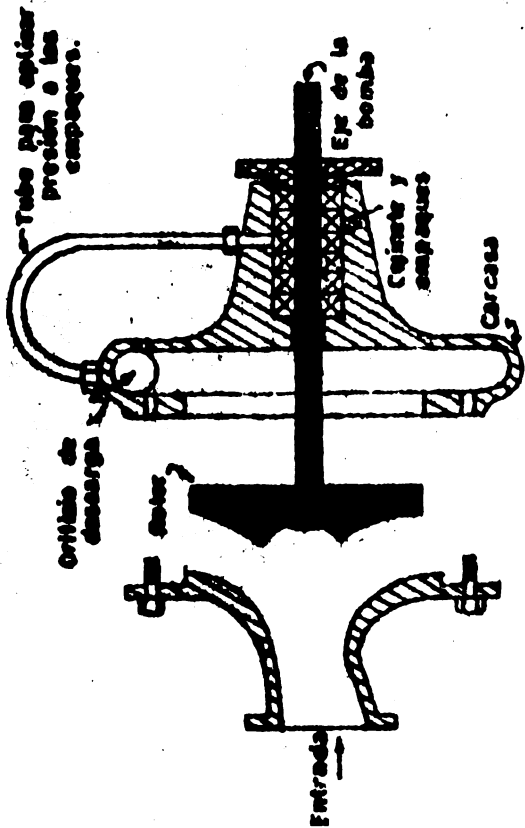


FIG. Nº 1. Partes de una bomba centrífuga horizontal.- Ref. 6.-

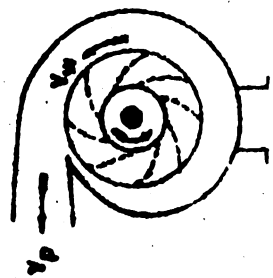


FIG. Nº 2. Bomba centrífuga de voluta.- Ref. 1.

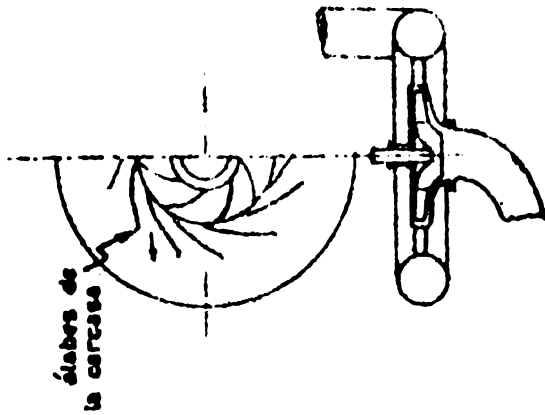


FIG. Nº 3. Bomba centrífuga tipo turbina. Ref. 1.



FIG. Nº 4. Tipos de rotores. Ref. 2.

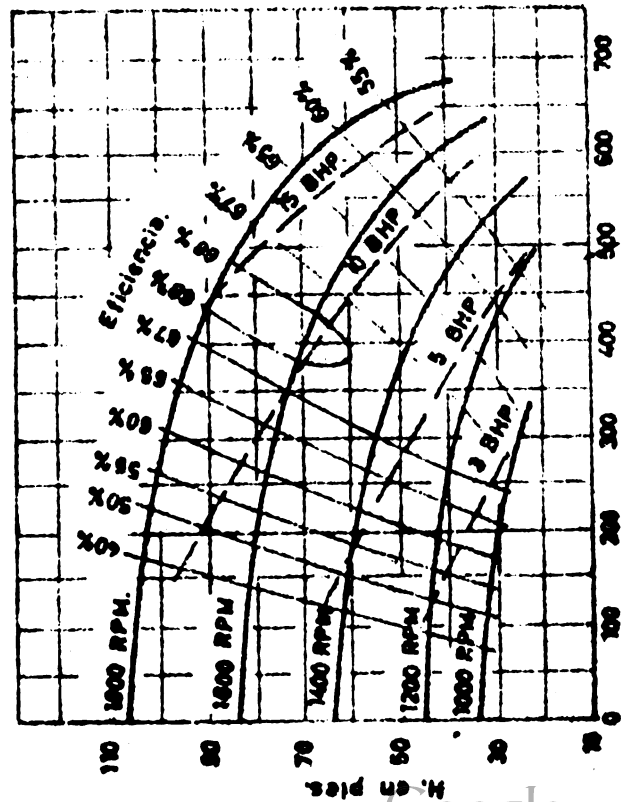


FIG. Nº 5. Curvas características de una bomba centrífuga. G. P. M.

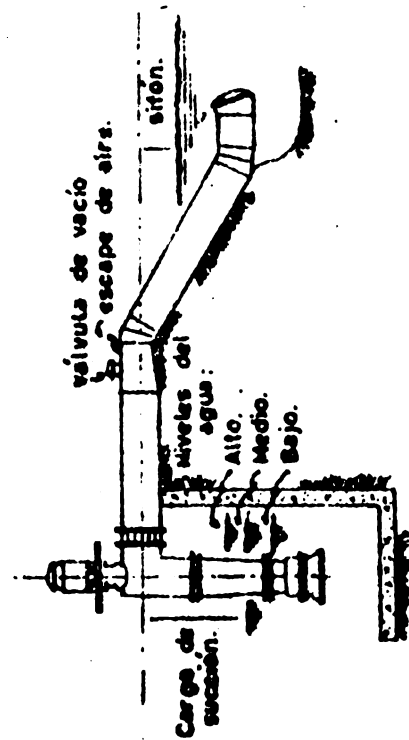


FIG. Nº 6. Instalación típica de una bomba de propulsión. Ref. 7.

Principios de Operación.- Las bombas centrífugas están constituidas por dos elementos principales: el rotor o impulsor que imprime energía al agua, y la carcasa que guía el agua en su curso a través de la bomba (Figs. N° 2 y 3). El vacío producido por el desplazamiento del agua, debido a la fuerza centrífuga creada por la rotación del impulsor, produce un flujo continuo de agua que entra en dirección normal al círculo de rotación. A fin de que las bomlas centrífugas puedan operar, se requiere, entonces, que el tubo de succión se mantenga lleno de agua. Si el agua en el tubo de succión es desplazada por aire que se infiltre en alguna forma en el tubo, la bomba cesará de descargar agua y entonlces se dice que la bomba ha perdida la celeba. Para iniciar la operación de las bombas centrífugas se requiere celobarlas previamente, lo cual se realiza extrayendo el aire del tubo de succión, para lo cual será necesario cerrar previamente el tulbo de descarga y colocar una válvula de pie en el extremo infelrior del tubo de succión.

Clasificación.- Las bombas centrífugas se clasifican en dos tipos, según la construcción de la carcasa al rededor del rotor. En unas, la carcasa está construída en forlma de una espiral, de tal manera que el área de flujo del agua aumenta progresivamente hacia el tubo de descarga. Estas se denominan centrífugas de voluta. (Fig. N° 2). En otras, la carcasa, que es circular, posee unas venas difusoras fijas. El área comprendida entre estos difusores se ensancha progresivamente y guían el agua hacia la carcasa. El ensanchamiento del área de flujo reduce la velocidad del agua, convirtiendo la energía cinética en presión. Estas son las bombas de turbina (Fig. N° 3).

Tipos de rotores.- Los rotores de las bombas centrífugas se construyen de tres tipos diferentes, según se ilustra en la Fig. N° 4. El rotor abierto tiene sus álabes unidos a la periferia de un disco central; el rotor se-

micerrado presenta sus álabes unidos lateralmente a dos discos de rotación.

Los rotores abiertos tienen la ventaja de permitir el paso de impurezas sin que ocurra obstrucción y son más baratos, pero ofrecen una baja eficiencia. Los rotores cerrados son más costosos y se obstruyen más fácilmente, pero ofrecen la más alta eficiencia de operación, y tienen, en general, una mayor duración. Los rotores semicerrados tienen características intermedias.

Características de operación.— Cada bomba ofrece una serie de relaciones fijas y definidas entre el gasto, la carga de bombeo, la eficiencia, la potencia, la velocidad de operación, etc., que están en función de su tamaño y de su diseño y construcción. Estas relaciones constituyen las características de operación de las bombas, las cuales son presentadas por los fabricantes en la forma de curvas que cubren toda la amplitud de operación de cada bomba. La Fig. Nº 5 ofrece un juego de curvas típicas correspondientes a una bomba centrífuga. En ellas puede observarse que tanto el gasto como la potencia aumentan a medida que disminuye la carga, y que hay una condición de gasto y de carga que corresponde a la máxima eficiencia de operación.

Leyes de las Bombas.— Las bombas centrífugas siguen ciertas leyes que resultan de importancia práctica cuando se trata de cambiar las condiciones de operación de una bomba dada. Estas leyes, que relacionan la velocidad de operación con el gasto, la carga y la potencia requerida, pueden resumirse en la forma siguiente:

- 1) El gasto es directamente proporcional a la velocidad del rotor.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{RPM_1}{RPM_2}$$

2) La carga varía como el cuadrado de la velocidad del rotor.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{RPM_1}{RPM_2} \right)^2$$

3) La potencia varía como el cubo de la velocidad del rotor.

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left(\frac{RPM_1}{RPM_2} \right)^3$$

En estas relaciones:

Q = Gasto
 H = Carga
 HP = Potencia
 RPM = Velocidad del rotor.

Carga máxima.- La carga máxima teórica de una bomba centrífuga está representada por la altura máxima a que dicha bomba podría descargar agua, y será equivalente a la altura de succión, más la presión desarrollada por la bomba cuando se cierre completamente la válvula de descarga. El valor teórico de esta altura estará dado por la siguiente relación:

$$H_m = \frac{v^2}{2g}$$

Donde: Hm = Carga máxima en metros
 V = Velocidad periférica del rotor en mt/seg.
 g = Aceleración de la gravedad en mt/seg.

La velocidad periférica, dada en función del diámetro y del número de revoluciones por minuto del rotor, se expresa en la forma siguiente:

$$V = \frac{\pi D \times \text{RPM}}{100 \times 60}$$

Donde: D = Diámetro en centímetros
RPM = Revoluciones por minuto del rotor.

Altura de succión.— Como se indicó anteriormente, el agua asciende hasta la carcasa de las bombas centrífugas impulsada por la presión atmosférica, debido al vacío que se forma en el tubo de succión. Por esta razón, la altura de succión está limitada por la presión atmosférica del sitio de instalación de la bomba.

La presión atmosférica al nivel del mar es de 760 mm. de mercurio que corresponde a una columna de agua de 10.33 m. Esta sería la altura teórica máxima de succión, la cual se reduce, en promedio, a razón de 8 cms. por cada 100 mts. de elevación sobre el nivel del mar. Debido a que el vacío que se produce no es perfecto, la altura real máxima de succión se estima en un 70% del valor teórico.

La distancia máxima que debe existir entre el nivel del agua y la bomba será, entonces, la altura real de succión menos la carga de velocidad y menos las pérdidas por fricción que ocurran en el tubo de succión.

La carga de velocidad representa la energía consumida en darle velocidad al agua y tiene la siguiente expresión:

$$H_v = \frac{V^2}{2g}$$

Donde: H_v = Carga de Velocidad en m.
V = Velocidad del agua en el tubo de succión en mts/seg.
g = Aceleración de la gravedad en mts/seg.²

Las pérdidas por fricción se obtienen según se explica en el capítulo correspondiente al flujo de agua en tuberías.

Bombas de Propulsión.

Principios de Operación.- Las bombas de propulsión (Figs. N° 6 y 7) se diferencian de las bombas centrífugas en que el rotor tiene la forma de una hélice y el flujo de agua ocurre en dirección paralela al eje del rotor, en lugar de desplazarse en forma radial. Por esta razón, estas bombas son conocidas, también, con el nombre de axiales. Las bombas axiales operan con el mismo principio de propulsión de los barcos, con la diferencia de que aquí la hélice rota en una posición fija, desplazando al agua por impulso continuo.

Las bombas de flujo mixto son aquellas que tienen el rotor diseñado de manera tal que combina la acción centrífuga con el flujo axial. La Fig. N° 7 muestra la diferencia de construcción entre las bombas centrífugas, las de propulsión y las de flujo mixto.

Características de operación.- Las bombas axiales se adaptan, principalmente, al bombeo de grandes volúmenes de agua contra cargas relativamente bajas. Por ello son de uso más frecuente en obras de drenaje. Las características de operación de estas bombas se ilustran en la Fig. N° 8. Como puede observarse, estas bombas no ofrecen, en general, variaciones muy pronunciadas en su eficiencia de operación y la potencia requerida disminuye a medida que disminuye la carga de bombeo. Estas bombas ofrecen, así, el peligro de sobrecargar el motor cuando se aumenta la carga de bombeo.

La Fig. N° 9 muestra las curvas características de una bomba de flujo mixto, muy similares a las curvas de las bombas centrífugas (Figs. 5 y 10), con la diferencia de que la potencia requerida es aproximadamente constante, en casi toda la amplitud de operación de la bomba.

Selección de las bombas.

En la operación de seleccionar una bomba debe tomarse una decisión en cuanto al tipo de bomba que debe usarse y otra en cuanto al tamaño de la misma, todo según las condiciones locales de operación del equipo. Usualmente la carga total de bombeo, la altura de succión y el gasto requerido permiten hacer la selección del tipo. El cuadro N° 1 facilita esta selección:

Tabla N° 1Características de operación de varios tipos de bombas

Tipo de bomba	Carga de succión	Carga total	Gasto
Centrífuga	Media	Alta	Media
Flujo Mixto	Media-Baja	Media	Media-Alta
Axial	Baja	Baja	Alta

Para la selección del tamaño de la bomba será necesario establecer primero el gasto necesario y la carga total de bombeo.

Determinación del gasto.- Aún cuando una discusión más completa sobre este asunto se hace en el capítulo correspondiente al consumo de agua de las plantas y en la sección sobre drenajes de las tierras agrícolas, a continuación se incluye un breve resumen sobre el particular.

La dotación de riego depende, esencialmente, de las condiciones climáticas de la localidad; de los requisitos de agua del cultivo más exigente; de la eficiencia probable de aplicación y del área total que se considera. En una localidad donde el consumo diario de agua de un cultivo determinado fuera de 0.5 cms. y la eficiencia de aplicación probable fuera de 50%, la dotación de riego necesaria se calcularía como se indica a continuación:

$$q = \frac{0.005 \times 10,000}{24 \times 60 \times 60 \times 0.5} = 1.16 \text{ lts/seg.} \times \text{hectárea}$$

Este sería el gasto necesario, si la bomba fuera a operar 24 horas al día. Si el número de horas de operación diaria se reduce, el gasto debe aumentarse en proporción inversa.

En las obras de avenamiento el gasto está determinado principalmente por el coeficiente de avenamiento y el área total de la zona avenada. Un coeficiente de avenamiento de 5 centímetros implicaría un gasto de

$$\frac{0.05 \times 10,000}{24 \times 60 \times 60} = 5.8 \text{ lts/seg.} \times \text{hectárea}$$

En los proyectos grandes de drenaje se acostumbra hacer reservorios para el almacenamiento de las aguas, a fin de reducir la capacidad de la bomba.

Determinación de la carga. - La carga total de bombeo representa la altura que media entre el nivel del agua en su punto de captación y el nivel del agua en su punto de descarga, más las pérdidas por fricción y otras que ocurran en las tuberías de succión y de descarga. En la Fig. N° 11 la carga total de bombeo H_t , está representada por la siguiente expresión:

$$H_t = H_s + h_{fs} + h_{fd} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{v_d^2}{2g}$$

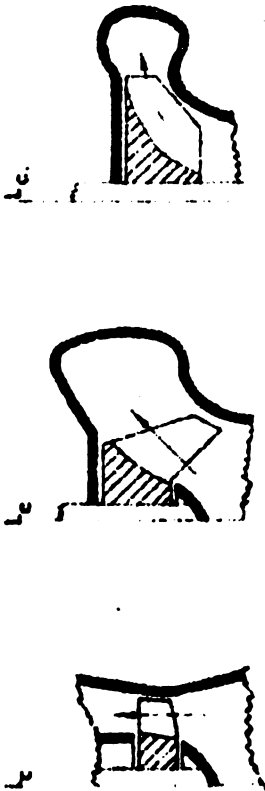
Si el agua debe llegar al final de la línea de descarga con una presión determinada, como ocurre en los sistemas de riego por aspersión, el valor de H_t se obtendrá sumando a la expresión anterior el valor de la carga de presión correspondiente (H_p).

El valor de h_f se calcula en función del gasto total y del diámetro y la longitud correspondiente, según se indica en el capítulo relacionado con el flujo de agua de tuberías.

Curvas características.- Con los valores de H_t y Q se entrará a escoger una bomba que ofrezca la máxima eficiencia cuando opere en esas condiciones de gasto y de carga. En general, resultará más conveniente seleccionar una bomba cuya curva de eficiencia ($Q \times E$) sea relativamente plana en la región de máxima eficiencia, especialmente si se espera tener fluctuaciones en los valores de H_t (Figs. N° 5, 8, 9, 10). En estas circunstancias será igualmente importante que la curva de la carga ($Q \times H$) sea de gran inclinación. En esta forma las variaciones de H_t causarán pocas variaciones en los valores de Q y de la eficiencia, asegurando así una operación casi uniforme.

El bombeo de aguas subterráneas.- Cuando se han de seleccionar bombas para extraer aguas subterráneas, resultará necesario considerar la curva de depresión piezométrica del pozo, a fin de incluir el valor de la depresión correspondiente al gasto deseado, en el cálculo de la carga total de bombeo. La Fig. N° 12 ilustra como pueden coordinarse de manera gráfica las características del pozo con las características de la bomba. La bomba que debe seleccionarse es aquella que presente su máxima eficiencia en el punto de intersección de las curvas $Q \times H$ del pozo y de la bomba. Esta intersección debe ocurrir en el gasto deseado.

Quando se tienen variaciones estacionales en el nivel piezométrico del pozo, resultará conveniente obtener una bomba que se ajuste a las condiciones más severas de trabajo y que presente una curva $Q \times H$ bastante inclinada en el área de operación y una curva de eficiencia bastante plana, alrededor del punto de máxima eficiencia. En esta forma el gasto y la eficiencia



De propulsión. De flujo mixto. Centrífuga.
 FIG. N° 7. Diferencias de flujo en 3 tipos diferentes de bombas. Ref. 2.

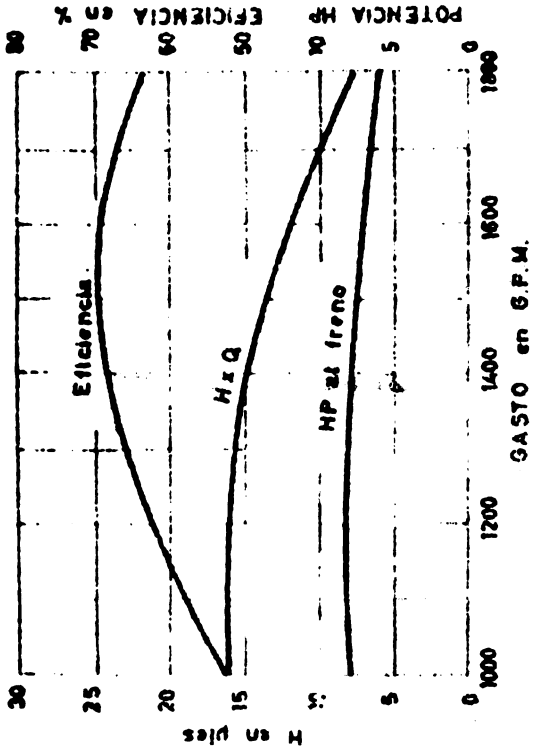


FIG. N° 8. Curvas características de una bomba de propulsión Ref. 4.

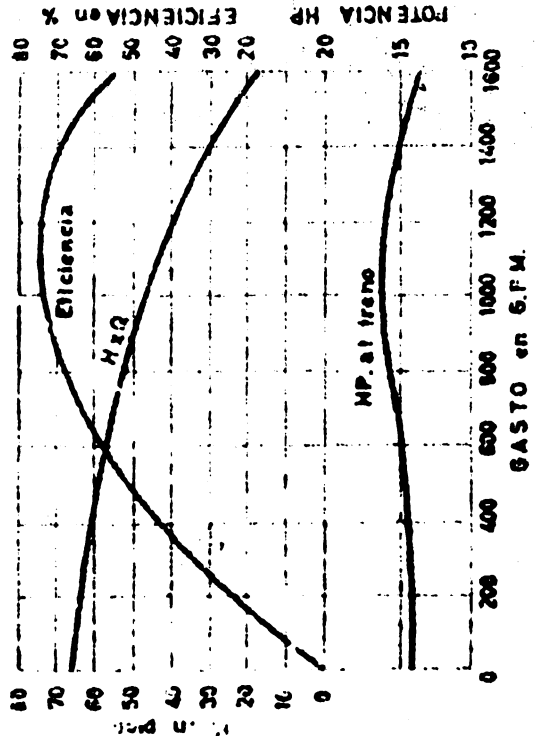


FIG. N° 9. Curvas características de una bomba de flujo mixto Ref. 4.

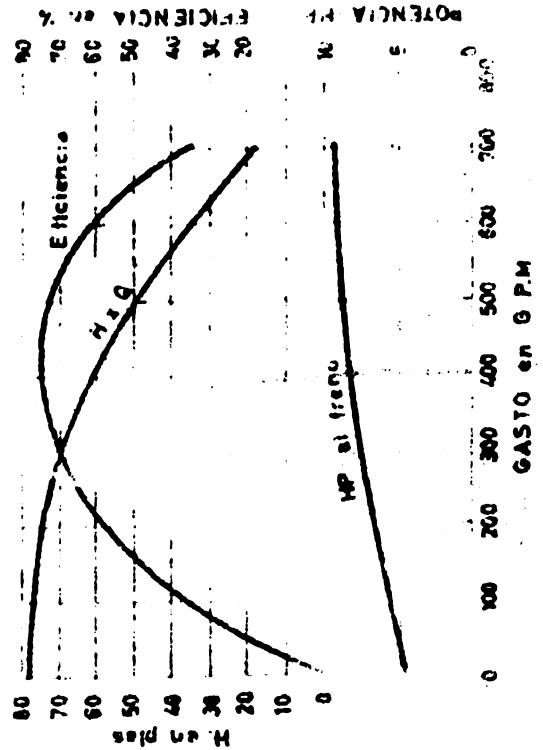


FIG. N° 10. Curvas características de una bomba centrífuga Ref. 4.

variarán muy poco con las variaciones del nivel piezométrico del pozo.

Selección de motores para el bombeo

Al seleccionar el motor para accionar una planta de bombeo, deben considerarse la disponibilidad de energía eléctrica o de combustibles en el sitio de la instalación y el valor relativo de éstos. Por otra parte, debe establecerse la potencia necesaria, la eficiencia de la transmisión y las condiciones locales que puedan afectar el rendimiento de los motores, especialmente cuando éstos son de combustión interna.

Potencia para elevar el agua. - Las unidades de potencia más corrientemente usadas para designar los motores son el caballo de potencia (HP) y el caballo de vapor (CV).

- 1 HP = 33000 lbs-pies por minuto
- = 76 kilográmetros por segundo
- = 1.014 caballos de vapor (CV)
- = 0.746 kilowattios-hora por hora
- 1 CV = 75 kilográmetros por segundo
- = 0.987 caballo de potencia (HP)
- = 0.737 kilowattios-hora por hora

La potencia usada por una bomba para elevar un gasto dado de agua, estará dada por la siguiente expresión:

$$HP_a = \frac{Q \times w \times H}{76}$$

$$CV_a = \frac{Q \times w \times H}{75}$$

- Donde:
- Q = Gasto en lts/seg
 - w = Peso específico del agua en Kg/lt = 1
 - H = Carga total de bombeo en mts.

Potencia necesaria en el eje de la bomba. La eficiencia de las bombas representa la capacidad de éstas para aprovechar la potencia que se les suministra, y se expresa como la relación entre la potencia aprovechada por la bomba y la potencia disponible en el eje de la misma. La potencia necesaria en el eje de la bomba, expresada en caballos de potencia (HP_b) puede determinarse por medio de la siguiente expresión:

$$HP_b = \frac{H P_a}{E_p}$$

Donde: E_p = Eficiencia de la bomba expresada como una fracción de la unidad.

Potencia en el eje del motor.- Para obtener la potencia necesaria en el eje del motor que habrá de operar la bomba, será necesario considerar la eficiencia de la transmisión. Cuando la transmisión se ejecuta por medio de un eje cardán o en forma directa, o por medio de una unión flexible, la eficiencia de la transmisión es de 100%. Cuando la transmisión es por medio de piñones, la eficiencia es de 95%, aproximadamente. Las transmisiones por medio de bancos planas, cuando son bien diseñadas, pueden alcanzar una eficiencia máxima de 90%, pero decrece considerablemente en las instalaciones pobremente ejecutadas. Las transmisiones por medio de fajas en "V" son, en general, más eficientes que las de las fajas planas, con un valor medio de 85%.

Sobre la base de la eficiencia de la transmisión podrá calcularse la potencia necesaria en el eje del motor (HP_m).

$$HP_m = \frac{H P_b}{E_t}$$

Donde: E_t = Eficiencia de la transmisión expresada como una fracción de la unidad.

Potencia de los motores eléctricos. Los motores eléctricos en general, operan con una alta eficiencia, la cual varía entre, 85% para los motores de inducción de 5HP, hasta 90% para los mismos motores de 100 HP. La potencia requerida de un motor eléctrico para una instalación dada, podrá determinarse, entonces, por medio de la relación que existe entre la potencia necesaria en el eje del motor y la eficiencia del mismo.

Es conveniente mencionar acá, sin embargo, que la potencia indicada en la placa de identificación de los motores eléctricos corresponde a la potencia que los motores pueden desarrollar en el eje (HPem). Esa será, entonces, la potencia que define el tamaño del motor, por lo cual resultará innecesario considerar la eficiencia del motor para seleccionar el tamaño del mismo. Esta operación será necesaria, sin embargo, cuando se desea estimar la energía que el motor consumirá para producir la potencia que desarrolla.

Los motores eléctricos se fabrican en tamaños determinados según se indica en la Tabla N° 2, por lo cual será, generalmente, difícil obtener un motor del tamaño exacto requerido. La práctica consiste en obtener un motor de tamaño inmediatamente superior al tamaño calculado, teniendo en cuenta que los motores trifásicos admiten una sobrecarga de 10% aproximadamente.

Tabla N° 2

Tamaño y eficiencia aproximada de los motores de inducción(1)

Tamaño del motor en HP	Eficiencia en %	Tamaño del motor en Hp	Eficiencia en %	Tamaño del motor en Hp	Eficiencia en %
5	86	20	89	50	91
7.5	88	25	90	60	91
10	89	30	90	75	91
15	89	40	91	100	91

(1) Tomado de Referencia 3.

Si se necesitara una potencia en el eje del motor de 16 HP, podría utilizarse un motor especificado para 15 HP, debido al factor de sobrecarga que estos motores pueden tolerar. Si la potencia necesaria fuera de 18 HP, sería necesario adquirir un motor especificado para 20 HP.

Motores de combustión interna.— Los motores de combustión interna vienen, generalmente, especificados en razón de la máxima potencia que pueden desarrollar a una presión atmosférica de 760 mm. de mercurio y a una temperatura de 15.5 grados centígrados. A fin de seleccionar un motor de combustión interna para la operación de una bomba, deben considerarse los siguientes puntos:

- 1) La potencia de los motores de combustión interna varía en proporción directa con la presión atmosférica y con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta, lo que puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$\frac{HP_r}{HP_n} = \frac{P_r}{P_n} \times \sqrt{\frac{T_r}{T_n}}$$

Donde: HP_r = Potencia real en HP
 HP_n = Potencia normal a 760 de presión y 15.5°C
 P_n = Presión normal = 760 mm de mercurio
 P_r = Presión real en mm. de mercurio
 T_n = Temperatura absoluta normal a 15.5°C = 273 + 15.5
 T_r = Temperatura absoluta real a la temperatura (t) del lugar (273 + t) en grados centígrados.

La presión atmosférica decrece con la altura sobre el nivel del mar a razón de 8 cm por cada 100 mts. de ascenso aproximadamente.

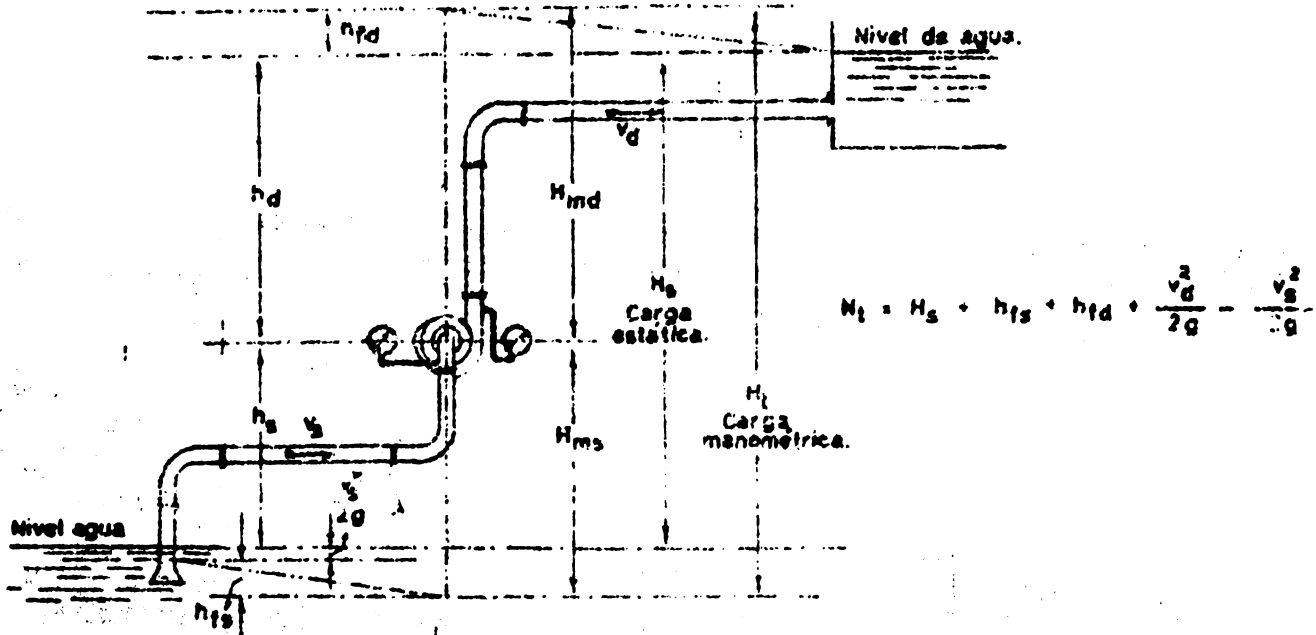
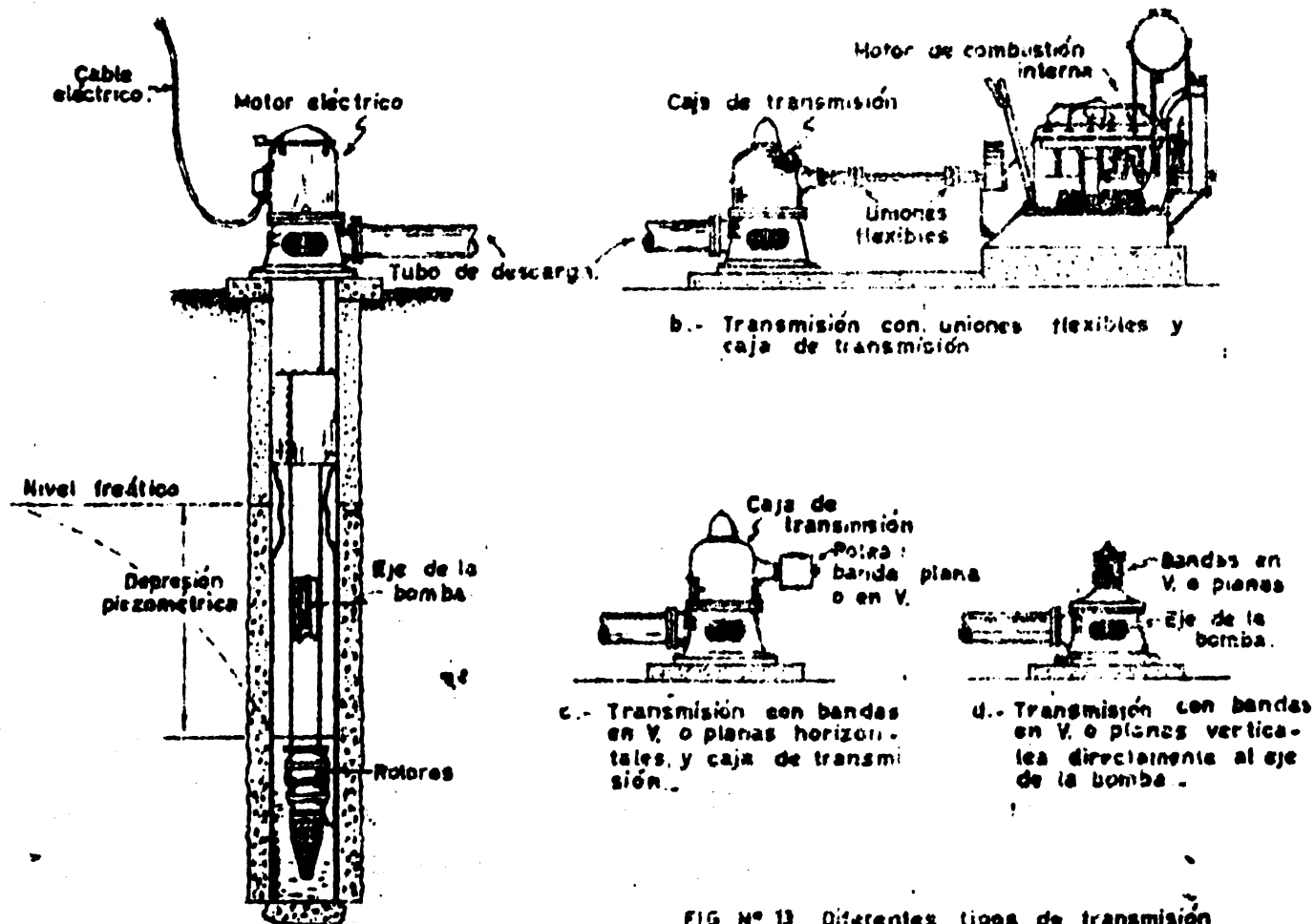


FIG. N° 11. Factores que determinan la carga total de bombeo

Ref. 1.



a.- Transmisión directa en una bomba de pozo profundo.

b.- Transmisión con uniones flexibles y caja de transmisión

c.- Transmisión con bandas en V. o planas horizontales y caja de transmisión.

d.- Transmisión con bandas en V. o planas verticales directamente al eje de la bomba.

FIG. N° 13. Diferentes tipos de transmisión para bombas.

Ref. 7

- 2) Como la operación de bombeo es una acción continua, los motores de combustión interna deben operar solamente a un 70%, aproximadamente, de la potencia máxima que pueden entregar en las condiciones reales de temperatura y de presión en que habrán de funcionar.
- 3) Cuando los motores de combustión interna son enfriados por medio de un ventilador, la capacidad aprovechable de los mismos debe reducirse en un 10%, aproximadamente, si el motor ha de operar en forma continua.
- 4) Muchos fabricantes además de especificar la potencia máxima de sus motores, indican también los rendimientos posibles bajo distintas condiciones de operación. Estas indicaciones deben observarse de manera estricta para establecer el tamaño necesario de los motores de combustión interna.
- 5) La velocidad de los pistones de un motor resulta una buena guía para seleccionar los motores de combustión interna. En general, será conveniente que los pistones operen a una velocidad comprendida entre los 400 y los 500 metros por minuto.

Ejemplo: Determínese la potencia para operación continua de un motor de combustión interna, cuya potencia máxima es de 50 HP. El motor operará en las siguientes condiciones:

Altura s.n.m. = 1000 mts.

Temperatura media = 24°C

El motor es enfriado por aire.

Solución: 1) Potencia real (presión atmosférica y temperatura)

$$\text{HPr} = 50 \times \left(\frac{760 - 80}{760} \right) \times \sqrt{\frac{297}{288.5}} = 44.1 \text{ HP}$$

2) Reducción por ventilador

44.1 - 4.4 = 39.7 HP

3) Reducción para asegurar operación continua

39.7 x 0.7 = 27.8 HP

27.8 HP será la potencia neta disponible en el eje del motor.

Sistema de transmisión

Los sistemas de transmisión más comúnmente usados en las instalaciones de bombas son las transmisiones directas, o aquellas que se ejecutan por medio de uniones flexibles, bandas planas y bandas en "V" y cajas de transmisión de piñones.

Transmisiones directas con uniones flexibles.- Siempre que sea posible, resultará mejor hacer la transmisión en forma directa o por medio de uniones universales o uniones flexibles, las cuales aseguran una eficiencia máxima de transmisión. Estas transmisiones sólo pueden hacerse cuando la velocidad de operación de la bomba coincide con la dirección del eje del motor. Este tipo de transmisión es más frecuente en las bombas horizontales y también en las de pozo profundo, cuando son accionadas con motores eléctricos. Las transmisiones directas requieren una alineación perfecta de los ejes y tienen su mayor aplicación en las bombas verticales. En las bombas horizontales accionadas por motores eléctricos es más frecuente encontrar uniones flexibles.

Transmisiones con bandas.- Las transmisiones por medio de bandas planas o bandas en "V" son de uso más frecuente cuando la unidad de fuerza es un motor de combustión interna, aún cuando también se usan con motores e-

léctricos y tienen la ventaja de permitir cualquier ajuste que sea necesario entre la velocidad del motor y la velocidad de la bomba. Estas transmisiones son menos eficientes, estimándose en 80% el coeficiente de transmisión de las bandas plazas y en un 85% el de las bandas en "V".

La potencia transmitida por las bandas está en función de la velocidad de la polea motora, del ancho de las bandas y de la resistencia de las mismas. La fórmula siguiente permite dimensionar una banda para transmitir una potencia determinada.

$$HP = \frac{W C D N}{1500}$$

Donde:

- W - Ancho de la banda en centímetros.
- C - N° de capas de las bandas de lona.
- D - Diámetro de la polea motora en cms.
- N - Revoluciones por minuto de la polea motora.

Las bandas de lona se construyen de grosores diferentes, que varían entre 3 y 10 capas.

Cuando se usan bandas de cuero el valor de C en la fórmula anterior, será de 2.5 multiplicado por el número de capas que tenga la banda.

La distancia entre los ejes de las poleas debe ser suficientemente amplia para asegurar buen contacto entre éstos y las bandas, y máxima duración de las mismas. Las distancias mínimas aconsejables varían entre 3 metros para transmisiones de 10 HP, hasta 8 metros para transmisiones de 125 HP, y siempre será mayor que la suma de los diámetros de las poleas. Cuando la unidad de potencia es un motor de combustión interna, la distancia indicada debe aumentarse en un 50%.

La selección de las bandas en "V" para una determinada transmisión en una planta de bombeo, puede hacerse por medio de la Tabla N° 3, que da la potencia transmitida por bandas de diferentes denominaciones a distintas velocidades.

Tabla N° 3

Potencia transmitida por las bandas en "V" horizontales*

Velocidad de la banda en m/min.	Potencia transmitida por cada banda, según el tipo, en HP				
	A	B	C	D	E
300	0.9	1.2	3.0	5.5	7.5
600	1.7	2.3	5.5	10.0	14.0
900	2.4	3.2	7.5	14.5	19.5
1200	2.8	4.2	9.0	17.5	23.5

(*) Adaptado de Referencia 3.

La distancia mínima entre los ejes de las poleas, cuando se usan bandas en "V", debe ser por lo menos igual a la suma de los diámetros de las poleas.

Cajas de transmisión.- Cuando una bomba centrífuga vertical o una bomba de pozo profundo va a ser accionada por un motor de combustión interna, el sistema de transmisión más adecuado es, usualmente, una caja de transmisión combinada con una unión flexible o universal, con una banda plana, o con un juego de bandas en "V". La caja de transmisión se selecciona según la relación de las velocidades entre el eje del motor y el eje de la bomba. Las cajas de transmisión se fabrican comercialmente para las siguientes relaciones de velocidad entre el eje de la bomba y el eje exterior de la caja: 5 a 4; 4 a 3; 3 a 2; 2 a 1; y 1 a 1.

La figura N° 13 presenta los distintos tipos de transmisión discutidos en esta sección.

Instalación de las bombas.- Los esquemas de las figuras N° 6, 14, 15 y 16 ofrecen algunas sugerencias en cuanto al tipo de instalación que puede realizarse según el tipo de bomba, el objetivo de ésta y las condiciones de operación de la misma.

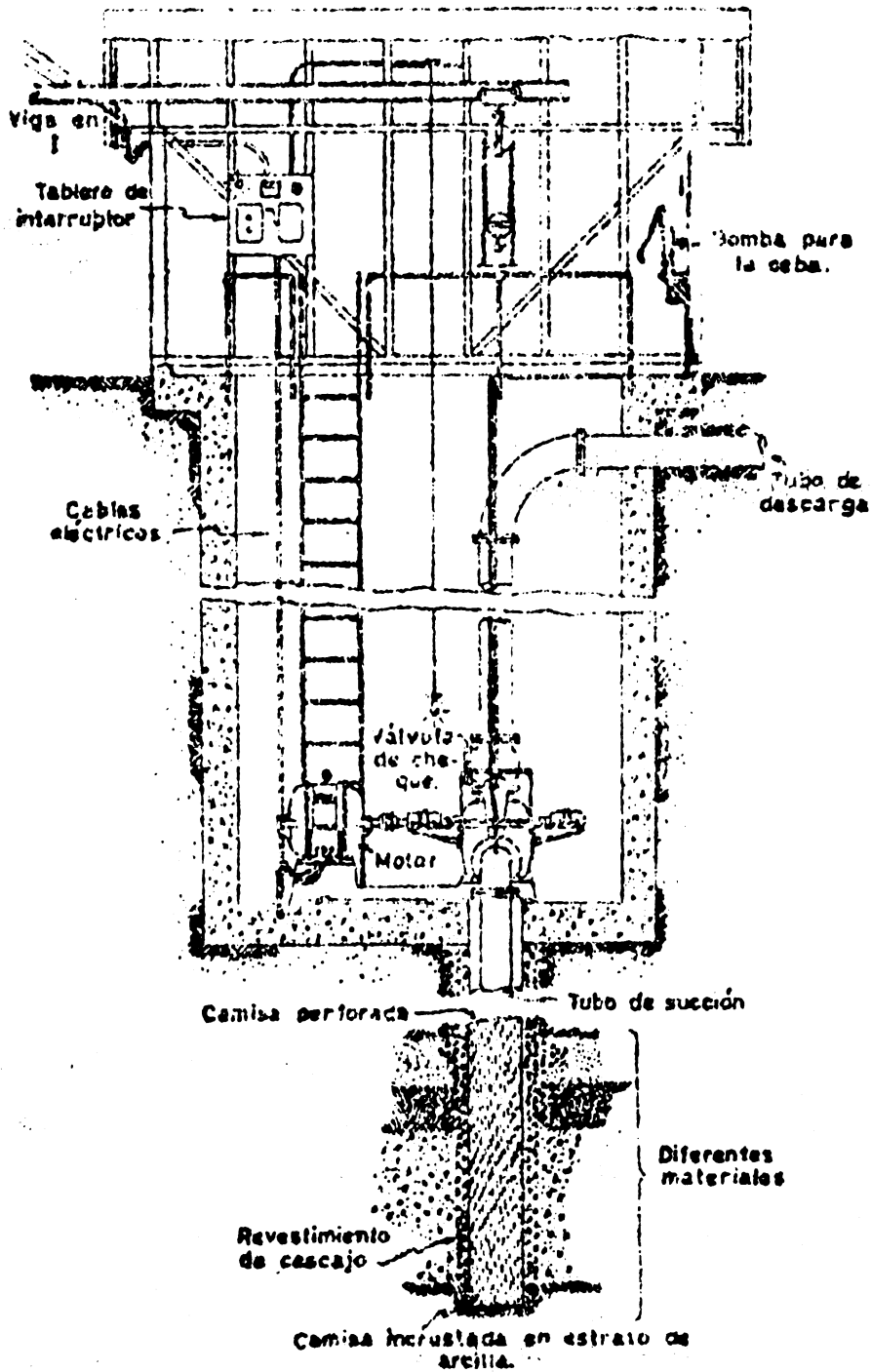


FIG. No 14. Instalación típica de una bomba centrífuga horizontal.

Ret. 5.

Resulta conveniente indicar acá que las casetas construdas para proteger las bombas deben estar provistas de suficiente ventilación, cuando se trata de plantas accionadas con motores de combustión interna. En estos casos puede resultar conveniente construir una caseta que sea desmontable, para permitir las reparaciones necesarias del equipo. Algunas casetas han sido montadas sobre bisagras agarradas al piso, de manera tal que pueden levantarse totalmente haciéndolas girar sobre dichas bisagras. Esto facilita la ventilación en los días calurosos y proporciona espacio adecuado para cualquier reparación.

COSTO DEL BOMBEO

En toda operación de bombeo resultará conveniente establecer una valoración cuantitativa de los costos, de tal manera que puedan apreciarse en forma concreta el valor del agua y las retribuciones económicas que de ella se derivan o pueden derivarse.

En la figuración del valor total del bombeo será conveniente subdividir el costo de bombeo en dos partes esencialmente diferentes: costos fijos y costos de operación.

Costos fijos

Dentro de la denominación de costos fijos se incluyen todos aquellos factores de costo que no varían con la cantidad de uso anual que recibe el equipo en consideración. Estos factores están dados, principalmente, por el valor original del equipo o por su duración probable, o por los dos factores juntos. Los factores que determinan el costo fijo anual de un equipo son los siguientes:

Depreciación
 Intereses sobre la Inversión
 Impuestos
 Seguros
 Almacenamiento
 Reparaciones
 Lubricación y Servicio Diario

Depreciación.— La depreciación representa la pérdida de valor que sufre un equipo por razón de su desgaste natural o por causas accidentales, y, en algunos casos, también porque con el transcurso del tiempo otras máquinas más eficientes y mejores toman su lugar.

La duración probable de las diferentes partes que constituyen una planta de bombeo, puede estimarse por medio de la Tabla N° 4.

Tabla N° 4

Duración probable del equipo de bombeo

Bombas centrífugas	10 años
Motores de combustión interna	10 años
Motores eléctricos	20 años
Caseta protectora	20 años
Pozo	20 años
Tubería de fierro galvanizado	20 años

La Depreciación puede estimarse por varios de los siguientes métodos:

1) Depreciación Uniforme.— En este procedimiento se asume que las máquinas pierden anualmente un valor uniforme. En esta forma, el monto de la depreciación anual será dado por la fórmula siguiente:

$$D = \frac{V_i - V_f}{A}$$

Donde: D = Depreciación anual en \$
 V_i = Valor inicial de la máquina en \$
 V_f = Valor de la máquina en A años en \$
 A = Duración probable en años

Si el valor D obtenido con el método anterior fuera depositado año tras año en una cuenta especial, al cabo de A años se tendría el valor total de la máquina. En este caso, sin embargo, no se han considerado los intereses de las sumas depositadas, por lo cual, en algunos casos resulta preferible el llamado método de interés compuesto.

2) Método del Interés Compuesto.— Por medio de este método la suma que anualmente se sustrae del valor de la máquina, más los intereses que esta suma devengaría si fuera colocada en una cuenta de ahorros, arrojarían al final de A años el valor total de dicha máquina. La suma que debe depositarse anualmente, o sea, el valor de la Depreciación anual, será dada por la siguiente relación:

$$D = (V_i - V_f) \frac{I}{(1 + I)^A - 1}$$

Donde: I = interés comercial
 D , V_i , V_f , A , como en la fórmula anterior

3) Método del porcentaje constante. Este método valora la depreciación según un porcentaje constante que se reduce anualmente del valor restante de la máquina. El porcentaje a sustraer está dada la siguiente relación:

$$P = 1 - \sqrt[A]{\frac{V_f}{V_i}}$$

Donde: P = porcentaje fijo de depreciación
 Los otros términos, como en las fórmulas anteriores.

En este método el valor C de la máquina al cabo de "n" años podrá obtenerse por medio de la fórmula siguiente:

$$C = V_i (I-P)^n$$

4) Estimación del valor actual de la máquina. - Este método es, quizá, el más ajustado a la realidad, pero requiere reconocimientos previos del mercado para establecer un criterio sobre el particular.

En general, todos los métodos indicados para valorar la depreciación de una máquina son satisfactorios, aún cuando es evidente que los resultados no coinciden. La preferencia de un método sobre otro depende, principalmente, de los objetivos y propósitos del interesado, y de las características del negocio que se tenga establecido. El método de la reducción anual uniforme es el más comúnmente usado. El del interés compuesto deja un valor en la maquinaria que se aproxima mucho al valor que le asignaría su propietario. El método del porcentaje constante permite estimar, con mayor aproximación que los otros métodos, el valor real de una maquinaria.

Intereses sobre la Inversión. - Este factor se determina en función del interés bancario vigente en cada localidad, el cual es, generalmente, del 6% anual. Para estimar el costo anual de la máquina, la cantidad que debe cargarse será dada por la siguiente relación:

$$Z = (V_i - V_f) I$$

Donde: Z = Carga anual por concepto de intereses
I = Interés bancario

Impuestos. - Los impuestos que se cargan a la maquinaria agrícola en general, están bien definidos en algunos países. Estos impuestos podrían estimarse como u-

na parte proporcional del impuesto total vigente sobre el capital, impuestos estos que son variables según los haberes del propietario. En los Estados Unidos, como un promedio general, los impuestos sobre una máquina agrícola se estiman en el 0.6% del valor original de la máquina. Este valor puede usarse cuando se carece de información más exacta sobre el particular.

Seguros.- El valor del Seguro sobre una máquina de uso agrícola es variable según la empresa aseguradora. Para motores de combustión interna este valor se acerca al 1% anual del valor asegurado. El Seguro, generalmente, sólo cubre un 75% del valor de la máquina, y el valor medio asegurado durante toda la vida del equipo, puede asumirse como la mitad del valor inicial del mismo. En esta forma, la suma anual cargable por concepto de Seguro puede estimarse en 0.3% del valor total de la máquina por año.

Repuestos y Reparaciones.- A falta de una información concreta local sobre el valor probable de los Repuestos y las Reparaciones que demande una instalación de bombeo, éstas pueden asumirse en un 4% del costo original de la máquina. Este valor incluye las partes y el servicio mecánico necesario.

Lubricación y Servicio Diario.- Estos gastos pueden estimarse en 1% del valor original de la máquina e incluye el consumo de grasa o cualquier ajuste menor de la maquinaria.

Costos de Operación

Los Costos de Operación están directamente relacionados con la cantidad de uso que reciba anualmente la instalación de bombeo. Los factores que determinan estos costos son: el consumo de combustible, el consumo de aceite y los jornales que demande el operario.

Combustible.- El consumo anual de combustible de un motor de combustión interna está en relación directa con la potencia que desarrolle dicho motor y con el número de horas de operación del mismo. A falta de información más concreta sobre el consumo de combustible, éste puede estimarse de manera aproximada sobre la base de que un galón de combustible produce 8.5 HP-horas.

El consumo de energía de los motores eléctricos se determina sobre la base del costo local por kilowatio-hora consumido.

Aceite.- El consumo de aceite de los motores de combustión interna puede estimarse en 0.5 galones por cada 10 horas de operación del motor.

Operario.- Solamente cuando se trata de instalaciones grandes de bombeo se justificará asignar un operario de manera permanente a dicha instalación. Generalmente, sin embargo, la persona encargada de operar una instalación de bombeo en un fundo privado es una persona que cumple otras actividades al servicio de dicho fundo. En tales casos, la porción que debe cargarse al bombeo será una parte del salario de éste, proporcional al tiempo que dedica a la bomba. El valor de los salarios dependerá de la localidad y del grado de responsabilidad que deba conferirse al operario en una instalación dada.

Efectos del Uso sobre el Costo Unitario

El costo unitario de una instalación de bombeo podrá buscarse, entonces, en razón de los dos elementos de costo discutidos anteriormente: los costos fijos y los costos de operación.

El costo unitario de una planta será la suma de los costos fijos más los costos de operación. El costo unitario resultará más bajo mientras mayor sea el uso que se dé a las má-

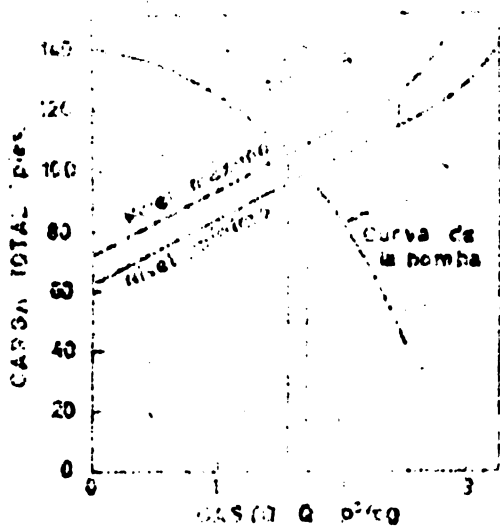
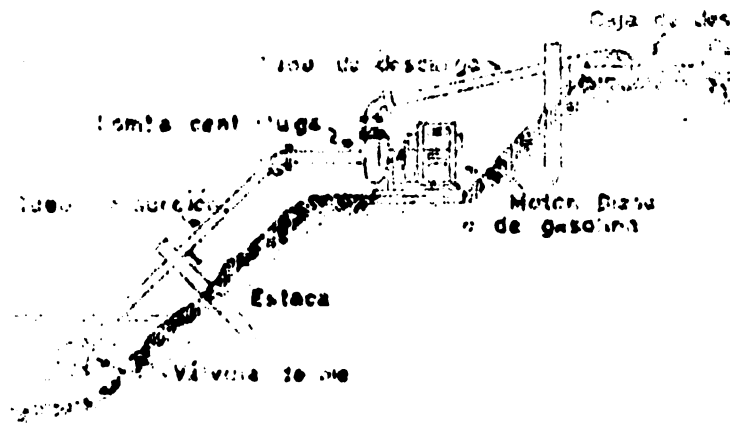


FIG. Nº 12. Selección de la bomba de acuerdo al costo. Ref. 3.



Nº 15. Instalación de una bomba centrífuga. Ref. 3.

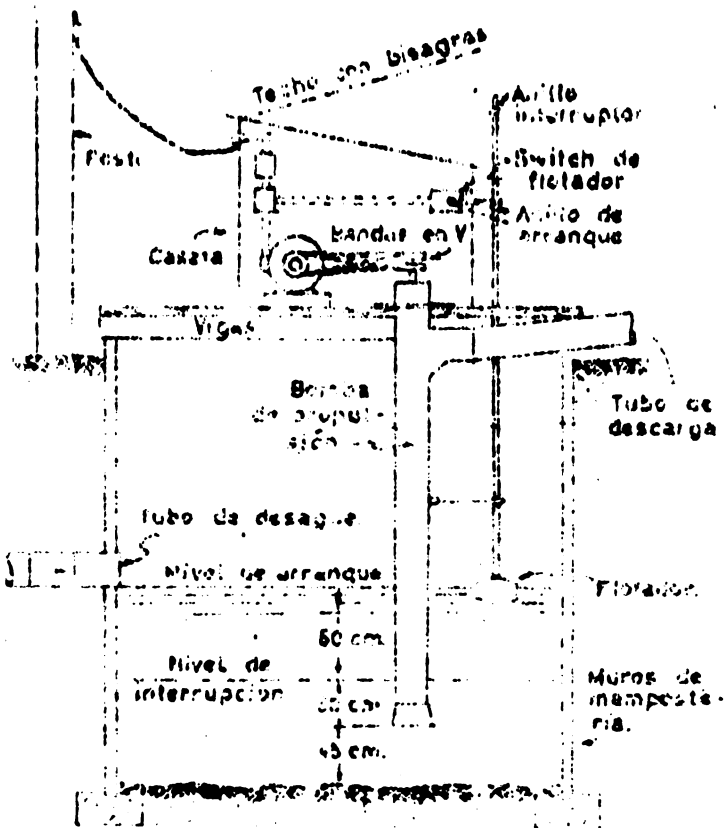


FIG. Nº 16. Instalación de una planta de bombas para descarga. Ref. 3.

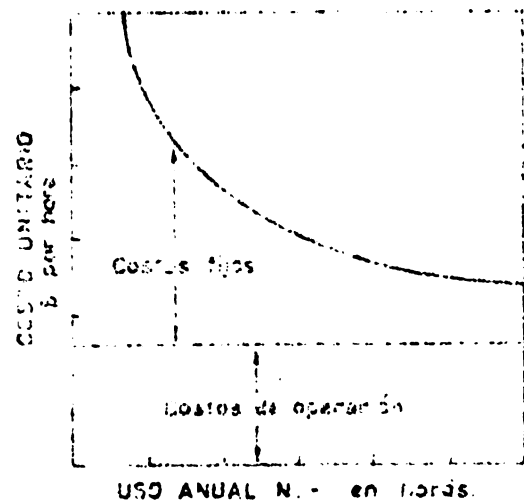


FIG. Nº 17. Efecto del uso anual sobre el costo unitario. Ref. 3.

quinas. La aseveración anterior puede apreciarse más fácilmente a través de la siguiente relación:

$$C_u = \frac{C_f}{N} + C_o$$

Donde:

- C_u = Costo unitario de la máquina (\$/hora)
- C_f = Costos fijos (\$/año)
- N = Uso anual (horas/años)
- C_o = Costo de Operación (\$/hora)

La curva de la ecuación anterior que relaciona los valores de C_u con N , presentará, así, la forma que se indica en la Fig. N° 17, en donde puede apreciarse cómo el costo unitario se reduce considerablemente, a medida que se aumenta el uso de la maquinaria.

REFERENCIAS

1. ADDISON, H. A Traetise on Applied Hydraulics. Third Edition. London. Chapman & Hall Ltd. 1948.
2. FREVERT, R.K. and OTHERS. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor, Edwards Brothers, Inc. 1953.
3. JOHNSTON, C.N. Irrigation Pumps, Their Selection and Use. University of California, Circular 415. 1952. 54 p.
4. ROHWER, CARL. Design and Operation of Small Irrigation Pumping Plants. U.S.D.A. Circular N° 678. 1943. 78 p.
5. ROHWER, CARL. Small Irrigation Pumping Plants. U.S.D.A., F.B. 1857. 1940. 29 p.
6. WOLFE, J. W. A Pumping Manual for Irrigation and Drainage. Oregon State College S.B. 481, 1950. 39 p.
7. WOOD, I.D. Pumping for Irrigation. United States Department of Agriculture SCS-TP-89, 1950. 40 p.

.....

EB/amm

AFORO DE AGUA

Con el fin de poder anticipar el uso futuro del agua, ya sea en el fundo o en extensiones mayores de tierra, resulta necesario establecer el caudal de agua disponible en los canales de riego, en los cauces naturales, o en las cañerías de conducción. A continuación se ofrecen varios métodos adecuados para aforar las aguas de riego.

Unidades de Medida del Agua

El agua se mide en unidades de volumen por unidad de tiempo, o sea en unidades de gasto. En el sistema métrico, las unidades de volumen más corrientemente usadas son el litro y el metro cúbico, y las unidades de gasto correspondientes, son el litro por segundo y el metro cúbico por segundo.

Dispositivos para medir el agua en canales.- Los dispositivos que se discutirán a continuación pueden usarse en canales artificiales o en cauces naturales, y la selección del método más adecuado estará determinada por las condiciones especiales que en cada caso existan, como se explica más adelante.

Orificios.- Los orificios son aberturas de forma regular hechos a través de un muro, por donde el agua circula haciendo contacto con todo el perímetro de dicha abertura (Fig. N° 1) Aún cuando los orificios pueden tener cualquier forma, los más comúnmente usados son de forma rectangular o circular. Los orificios pueden catalogarse en tres categorías:

- 1) Orificios con descarga libre.
- 2) Orificios sumergidos con dimensiones fijas.
- 3) Orificios sumergidos ajustables.

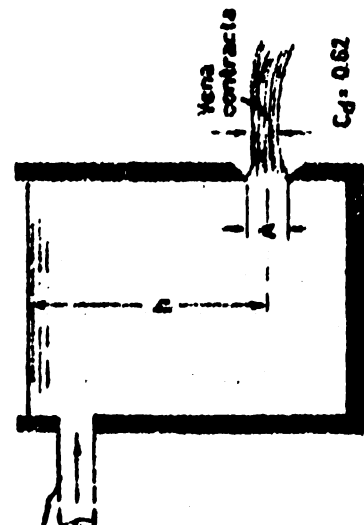
Los orificios con descarga libre son aquellos que descargan libremente, o aquellos en que el nivel del agua en la cara posterior del muro está por debajo del orificio. Estos son orificios de poco uso en los canales abiertos y se discutirán posteriormente, al tratar sobre el aforo de agua en cañerías.

Los orificios sumergidos son aquellos en que el nivel del agua, tanto en la parte anterior como en la cara posterior del muro, están por encima del orificio.

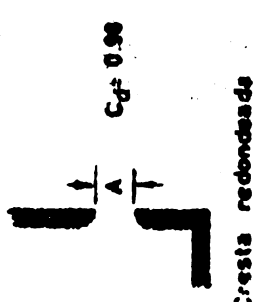
Los orificios sumergidos con dimensiones fijas se usan cuando la carga de agua disponible es insuficiente para la operación adecuada de los vertederos. Con el fin de darle mayor precisión a los aforos y asegurar una operación más eficiente, estos orificios se construyen de forma rectangular con la dimensión horizontal igual entre 2 y 6 veces al valor de la altura.

Los orificios sumergidos ajustables son aquellos en los que el área de descarga puede modificarse a voluntad, con el fin de acomodar el área a los distintos caudales probables, sin que ocurra una pérdida excesiva de carga. Uno de los tipos de orificio sumergido ajustable de uso más corriente, consiste en una estructura que combina una obra de derivación con un dispositivo aforador.

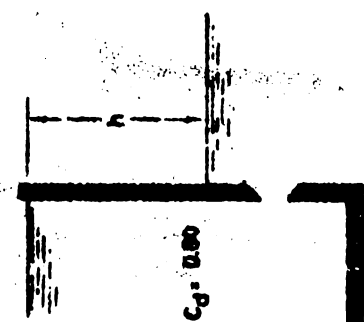
Fórmula general: $Q = C_d A \sqrt{2gh}$



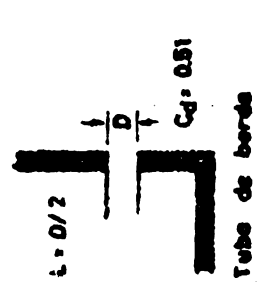
De cresta aguda
Descarga libre: contracción completa.
 $C_d = 0.62$



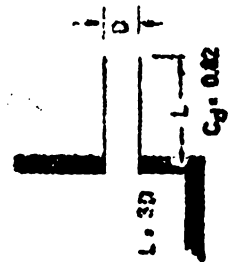
Cresta redondeada
 $C_d = 0.96$



Descarga sumergida.
 $C_d = 0.80$



$L = D/2$
Tubo de borda
 $C_d = 0.81$

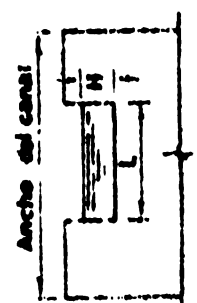


$L = 3D$
Tubo corto standard.
 $C_d = 0.82$

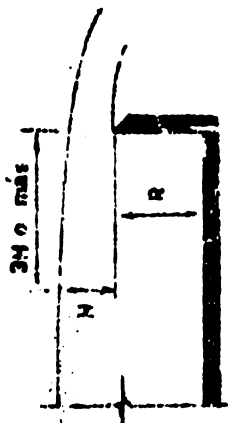
FIG Nº 1 ORIFICIOS PARA EL AFUERO DE AGUA.



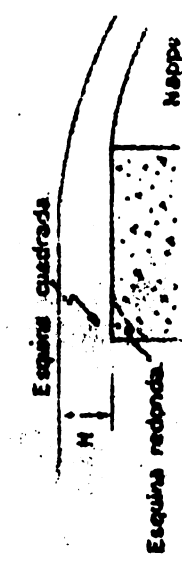
A Vertedero sin contracciones.
B Vertedero con 2 contracciones.



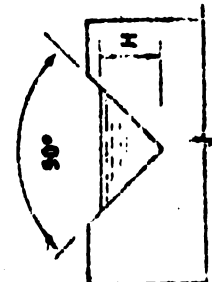
Ancho del canal
Vertedero rectangular.



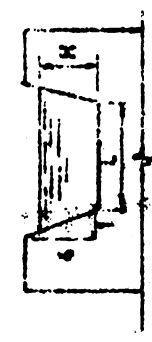
Cresta aguda, salto libre.



Cresta ancha, salto libre.



Vertedero triangular de 90°



Vertedero Cipolletti.

FIG Nº 2 VERTEDEROS O COMPUERTAS

La fórmula fundamental para el gasto de agua en orificios y tubos cortos es la siguiente:

$$Q = C_d A \sqrt{2g H}$$

Donde: Q = Gasto en $m^3/\text{seg.}$

C_d = Coeficiente que depende del tipo de orificio o tubo.

A = Area del orificio en m^2 .

g = Aceleración de la gravedad en $m^2/\text{seg.}$

H = Altura del nivel del agua sobre el centro del orificio en m.

Si el gasto Q quiere expresarse en $L/\text{seg.}$, midiendo A y H en centímetros cuadrados y centímetros, respectivamente, la fórmula anterior puede transformarse en la forma siguiente:

$$Q = 0.0415 C_d A \sqrt{H}$$

A continuación se indican algunos valores de C_d :

Orificios circulares rectangulares
o triangulares con cresta aguda: 0.60 a
0.55

Orificios circulares o rectangulares
de cresta redondeada: 0.95 a
0.98

Tubo de borda: 0.51

Tubo corto standard
($L = 3d$): 0.82

Cuando los orificios operan sumergidos, H es la diferencia de altura entre los niveles del agua, aguas arriba y aguas

abajo del orificio. En las fórmulas anteriores, se supone que la velocidad de aproximación tiene un valor mínimo que puede omitirse.

La pérdida de carga en los orificios es relativamente baja para un gasto determinado, cuando se compara con los vertederos, lo cual constituye una ventaja porque pueden instalarse en acequias con muy poca pendiente. Tienen la desventaja, sin embargo, de que la acumulación de basuras flotantes en la parte superior, y de sedimentos en la parte inferior, puede afectar la precisión de los aforos.

En general, para obtener resultados precisos en la medición de agua con orificios, el valor de H debe ser varias veces mayor que el diámetro del orificio.

Vertederos o compuertas.— Los vertederos o compuertas son aberturas de forma regular hechas a través de un muro, por donde el agua circula haciendo contacto solamente con los bordes inferior y laterales de dicha abertura (Fig. N° 2). Según su forma, los vertederos se clasifican en rectangulares, triangulares, y trapezoidales.

Los vertederos, en general, ofrecen algunas ventajas para el aforo del agua en canales. Tales ventajas están representadas por la precisión de los aforos; la sencillez en la construcción de las estructuras; el hecho de que no son obstruidos por los materiales que flotan en el agua, y, además, la duración relativamente larga de estos dispositivos.

Presentan también algunas desventajas, tales como la necesidad de una gran caída de agua y el hecho de que la acumulación de sedimentos cerca de la cresta puede reducir la preci-

si3n de los aforos.

Vertederos rectangulares.- Como su nombre lo indica, estos ver
tederos tienen una secci3n re
ctangular. La f3rmula b3sica para determinar el gasto en dichos ver
tederos, tiene la siguiente expresi3n:

$$Q = C_d \quad L \quad \sqrt{2g} \quad H^{3/2}$$

Donde:

- Q = Gasto en m³/seg.
- C_d = Coeficiente de descarga
- L = Ancho de la cresta en m.
- g = Aceleraci3n de la gravedad en m/seg².
- H = Altura del agua sobre la cresta en m.

La f3rmula anterior asume que el agua no lleva velocidad alguna antes de pasar por el vertedero, pero como, generalmente, el aforo de agua se ejecuta en canales o cauces, donde el agua lleva alguna velocidad, el valor de H^{3/2} en dicha f3rmula, debe reemplazarse por una expresi3n que considere la carga pro
ducida por la velocidad de aproximaci3n del agua (V_a). Esa ex
presi3n tiene la forma siguiente:

$$H^{3/2} = \left[\left(h + \frac{v_a^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_a^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

El coeficiente de descarga, C_d, varía seg3n el tipo de vertedero y seg3n el valor de H. En los vertederos rectangulares, que no ofrecen contracciones laterales del agua, el valor de C_d varía con la altura H del agua, y tiene la siguiente expresi3n:

$$C_d = 0.415 \quad \left(\frac{L - \frac{H}{5}}{L} \right)$$

De esta manera, la fórmula para el gasto de agua a través de vertederos rectangulares con contracciones laterales, tendrá la siguiente expresión:

$$Q = 0.415 (L - 0.2H) \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{v_a^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_a^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

Cuando la velocidad de aproximación es muy pequeña y cuando se desea el gasto, Q , en litros por segundo, con los valores de L y H en centímetros, la fórmula anterior puede representarse en la forma siguiente:

$$Q = 0.0184 (L - 0.2H) H^{3/2}$$

A fin de obtener aforos precisos, el valor de H debe medirse a una distancia aguas arriba del vertedero, mayor que 3 veces el valor de H , y el ancho (L) del vertedero debe ser igual o mayor que $3H$.

La discusión anterior se refiere a los vertederos de cresta aguda. Los vertederos de cresta ancha se usan con alguna frecuencia para medir o estimar el gasto de agua que pasa sobre las represas. El valor de C_d en estos vertederos varía según la forma de la cresta y según la forma del salto. Para vertederos de cresta ancha con esquinas cuadradas, o ligeramente redondeadas, y con salto libre, el valor C_d varía entre 0.34 y 0.5. Cuando se desea obtener aforos precisos sobre represas o estructuras similares, el valor de C_d es determinado en el laboratorio por medio de modelos hidráulicamente similares a la estructura real.

Vertederos triangulares.— Los vertederos triangulares son aberturas en forma de ángulo con el vértice localizado en la parte inferior. El tipo de vertedero

triangular más comúnmente usado es el que ofrece un ángulo de 90° en su vértice inferior, el cual resulta muy conveniente para aforar pequeños caudales de agua.

Cuando la forma de la cresta del vertedero es aguda el gasto, Q , lo da por la fórmula siguiente:

$$Q = 0.0146 H^{2.48}$$

Donde: Q = Gasto en lts./seg.

H = Altura del agua sobre el vértice en cm.

Vertederos de Cipolletti.-La forma de estos vertederos es tra-
pezoidal, con lados inclinados en la
relación de 4:1. La fórmula para el gasto tiene la siguiente
expresión:

$$Q = 0.0187 LH^{3/2}$$

Donde: Q = Gasto en lts./seg.

L = Longitud de la cresta en cm.

H = Altura del agua sobre la cresta en cm.

Reglas para la Instalación y Operación de Vertederos

1. Las compuertas o vertederos deben colocarse en el extremo inferior de una sección ampliada del canal, en donde el ancho y la profundidad del mismo permitan una velocidad de aproximación uniforme, inferior a 0.15 metros por segundo.
2. La compuerta o vertedero debe colocarse perpendicular a la dirección de la corriente del agua, y en posición vertical, esto es, sin inclinarse hacia atrás o hacia adelante.

3. La cresta del vertedero debe quedar perfectamente nivelada, a fin de que el agua que pasa sobre ella tenga la misma profundidad en todos los puntos a lo largo de dicha cresta; además, debe ser aguda en toda su longitud, para presentar el mínimum de resistencia y para que el agua que pase sobre ella la toque en una sola línea.
4. La altura de la cresta sobre el fondo del canal debe ser por lo menos 3 veces la profundidad del agua que pase en cima de ella, y la distancia que debe haber entre los la dos del canal y los lados de la cresta, no debe ser menor que dos veces la profundidad del agua que pasa sobre la cresta.
5. La escala que servirá para medir la altura del agua debe colocarse a nivel con la cresta de la compuerta y a una distancia conveniente de la cresta aguas arriba, con el objeto de que la curvatura de la superficie del agua que pasa sobre la cresta no tenga ninguna influencia sobre las lecturas. Para colocar la estaca de referencia, se puede usar un nivel de carpintero, aún cuando el nivel del ingeniero se prefiere en trabajos de mayor precisión.
6. La cresta de la compuerta o vertedero, debe colocarse a suficiente altura para que el agua, al caer, forme un es pacio libre entre ella y la compuerta. En caso de no producirse este espacio, la compuerta quedará sumergida y las medidas no podrán tomarse con exactitud.
7. Para obtener aforos exactos, la profundidad del agua que pasa sobre la compuerta no debe ser mayor que un tercio del largo de la cresta.
8. La profundidad del agua que pasa sobre la cresta debe ser superior a 5 centímetros, porque con una profundidad menor resulta difícil leer la escala y, en consecuencia, se reduce la precisión de los resultados.
9. Para evitar que la caída del agua produzca erosión en el cauce aguas abajo, se recomienda protegerlo con piedras u otro material.

Aforador Parshall

Este medidor, que se ilustra en la Fig. N° 3, es de uso muy frecuente para el aforo de agua en canales abiertos. Su diseño se basa en el principio de la conversión de energía. En este aparato la energía de posición es convertida en energía de velocidad. La fórmula general del gasto tiene la siguiente expresión:

$$Q = C_d \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times A_2 \sqrt{h}$$

Donde: g = Aceleración de la gravedad.

A_1 = Area de la entrada

A_2 = Area de la constricción

h = diferencia de elevación del nivel del agua entre la entrada y la constricción.

C_d = Coeficiente de descarga, que varía entre 0.95 y 1.00

Debido a las dificultades prácticas que ofrece la aplicación de la fórmula analítica anterior, Parshall ha desarrollado fórmulas experimentales para el gasto, que tienen la siguiente expresión general:

$$Q = K H^n$$

Donde: Q = Gasto

H = Altura del agua a la entrada.

K y n = Coeficientes experimentales que varían con el tamaño del medidor.

El valor de estos coeficientes en el sistema métrico, cuando Q se expresa en $m^3/\text{seg.}$ y H en metros, son los siguientes:

Para $W = 0.15 \text{ m.}$

$$Q = 0.3812 H_a^{1.58}$$

Para $W = 0.30 \text{ a } 2.50 \text{ m.}$

$$Q = 0.372W(3.281H_a)^{1.57}W^{0.026}$$

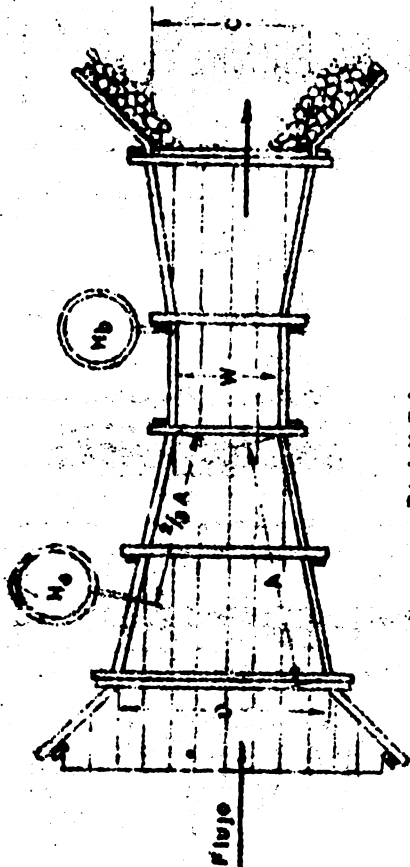
La Tabla N° 1 da los valores de K y de n para distintos valores de W .

Tabla N° 1

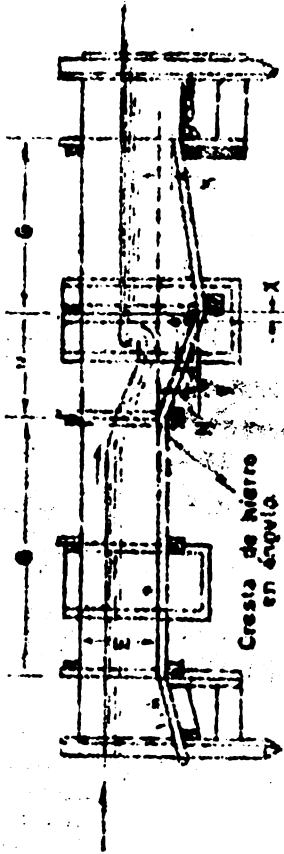
Valores de K y n para la fórmula del gasto en el aforador Parshall

W metros	K	n	W metros	K	n
0.15	0.3812	1.580	1.25	3.033	1.579
0.30	0.680	1.522	1.50	3.673	1.588
0.50	1.161	1.542	1.75	4.316	1.593
0.75	1.774	1.558	2.00	4.968	1.599
1.00	2.400	1.570	2.50	6.277	1.608

Las fórmulas anteriores se aplican solamente cuando el flujo no es sumergido, condición que debe tratar de mantenerse para obtener aforos más precisos. El flujo es sumergido cuando la relación entre la altura del agua en la garganta (H_b) y la altura del agua en la entrada (H_a) tiene los siguientes valores, según el tamaño del medidor:



PLANTA



CORTE LONGITUDINAL

Tabla N° 2

DENSIDADES STANDARD APROXIMADAS PARA LOS CONCRETOS MARSHALL.
 Longitudes en cm. Cargas en lbs./seg.

H	A	B	C	D	E	F	G	K	N	X	Y	Cargas Límites	
												P. descarga Libre	Módulo
7.6	66.6	15.7	17.8	25.9	38.2	15.2	50.5	2.5	5.7	2.5	3.8	34.0	0.8
15.2	62.2	61.9	39.6	39.6	45.7	30.5	51.0	7.6	11.4	5.1	7.5	109.2	1.4
30.5	137.0	136.2	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.8	5.1	7.6	434.0	9.8
50.0	140.0	140.0	70.0	100.0	92.0	61.0	91.5	7.6	22.8	5.1	7.6	720.0	15.0
75.0	148.0	154.0	100.0	140.0	92.0	61.0	91.5	7.6	22.8	5.1	7.6	1,200.0	25.0
100.0	170.0	165.0	120.0	165.0	92.0	61.0	91.5	7.6	22.8	5.1	7.6	1,450.0	28.0
150.0	194.0	190.0	175.0	225.0	92.0	61.0	91.5	7.6	22.8	5.1	7.6	2,240.0	45.0
200.0	215.0	215.0	225.0	285.0	92.0	61.0	91.5	7.6	22.8	5.1	7.6	3,000.0	90.0
250.0	242.0	250.0	285.0	340.0	95.0	61.0	91.5	8.5	24.5	9.0	10.0	4,000.0	120.0

FIG. N° 3. MEDIDOR MARSHALL.

W metros	$S = \frac{H_b}{H_a}$
0.30	0.60
0.30-2.50	0.70

Cuando el flujo es sumergido resulta necesario sustraer al gasto (Q), obtenido con las fórmulas anteriores, una corrección (C) que tiene las siguientes expresiones:

Para W = 0.15 m.

$$C = \frac{0.0285 H_a^{2.22}}{\left[\frac{H_a + 3.05}{3.05} - S \right]^{1.44}} - \frac{H_a - 0.056}{76.94}$$

Para W entre 0.30 y 2.50 m.

$$C = 0.0746 \left[\frac{3.28 H_a}{1.8} \right]^{4.57 - 3.14S} + 0.0935 W^{0.815} \\ \left(\frac{1.8}{S} \right) - 2.45$$

El cálculo del gasto con las fórmulas exponenciales que se han presentado, resulta muy laborioso, por lo cual será más cómodo usar tablas e nomogramas como los que se insertan en las Figs. Nos. 4, 5, 6, 7 y 8.

El medidor Parshall produce pérdidas de carga muy pequeñas, lo que constituye una gran ventaja para el aforo de agua en los canales, especialmente en aquellos que tienen poca pendiente. Las pérdidas de carga producidas por el medidor Par-

shall pueden calcularse por medio de la fórmula experimental siguiente:

$$h_p = \frac{5.072}{1.46 (W + 4.57)} (1 - s)^{0.72} q^{0.67}$$

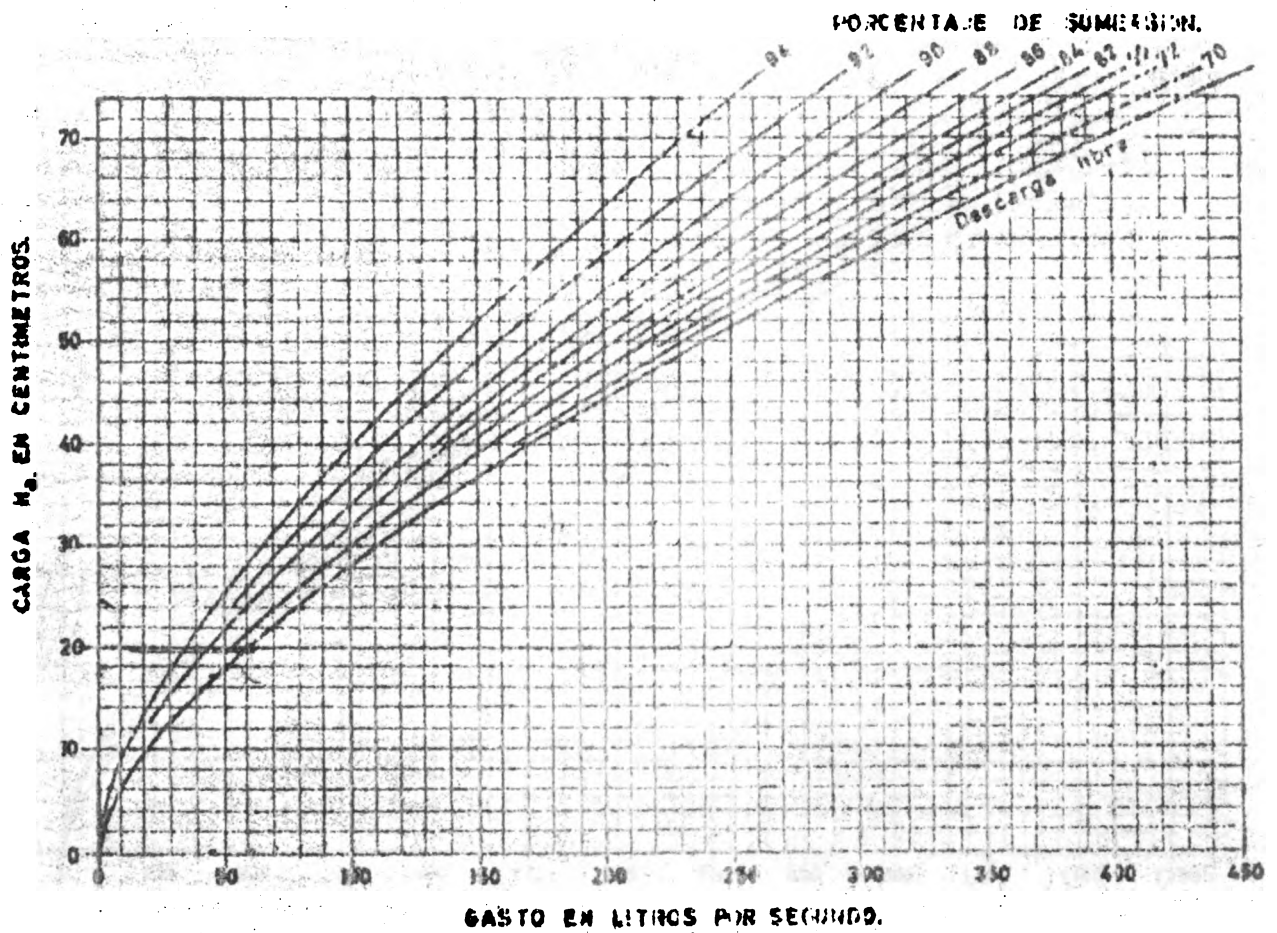
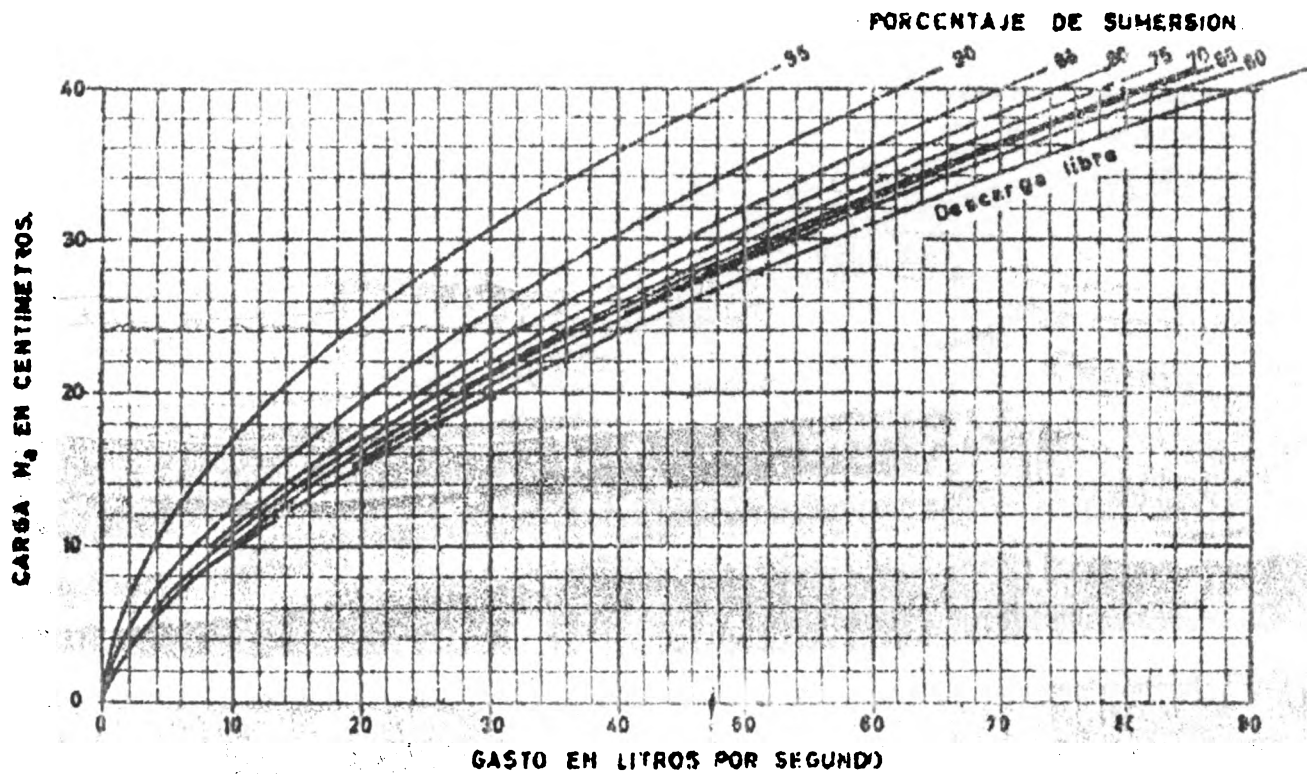
El nomograma de la Fig. N° 9 ofrece una solución gráfica de esta fórmula para aforadores con gargantas de 0.15 a 2.50 m.

El nomograma de la Fig. N° 9 ofrece una solución gráfica de esta fórmula para aforadores con gargantas de 0.15 a 2.50 m.

Construcción del Medidor Parshall.— Aún cuando el medidor Parshall fué concebido inicialmente en forma analítica, su desarrollo posterior ha sido esencialmente experimental y las dimensiones que deben darse a un medidor determinado deben ajustarse a los valores establecidos por su inventor, como se indica en la Tabla N° 2 de la Fig. N° 3, en donde se dan las dimensiones standard aproximadas para distintos tamaños de aforadores. Valores más exactos pueden obtenerse de las referencias 2, 3, 4, 5 y 6.

Estos medidores pueden construirse de madera, de lámina metálica o de concreto.

Instalación del Aforador Parshall.— La selección de un medidor Parshall se hace sobre la base del gasto máximo que habrá de medirse y en razón del ancho de la plantilla del canal y de la pérdida de carga que puede tolerarse. Generalmente, se procede a seleccionar en la Tabla N° 2 un tamaño de aforador que permite medir, sin que ocurra sumersión, el gasto máximo del canal. Como hay varios tamaños que satisfacen este gasto, la selección se continúa tomando un aforador cuya garganta (W) sea aproximadamente igual a 2/3 de la plantilla del canal. En esta forma se asegurará una mínima pérdida de carga.



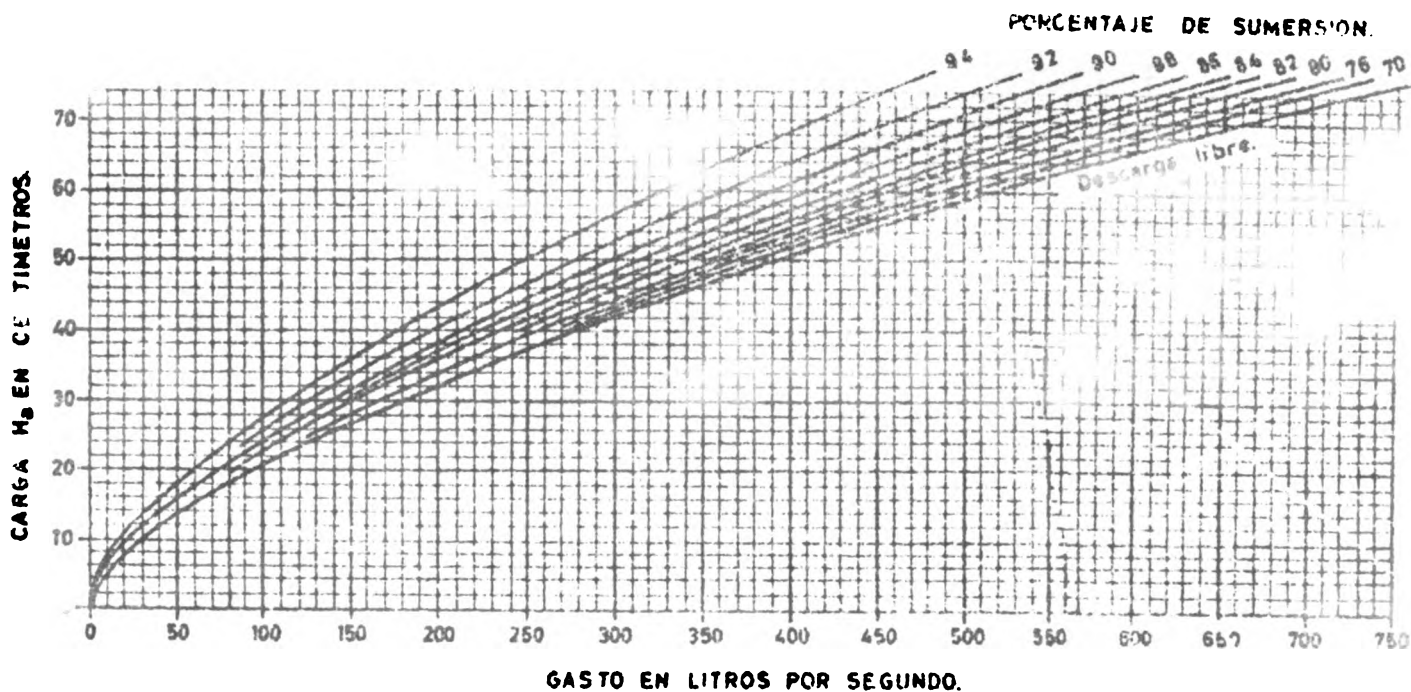


FIG. N° 6. Nomograma para determinar el gasto en un Medidor Parshall de 0.80 m. Ref. 7.

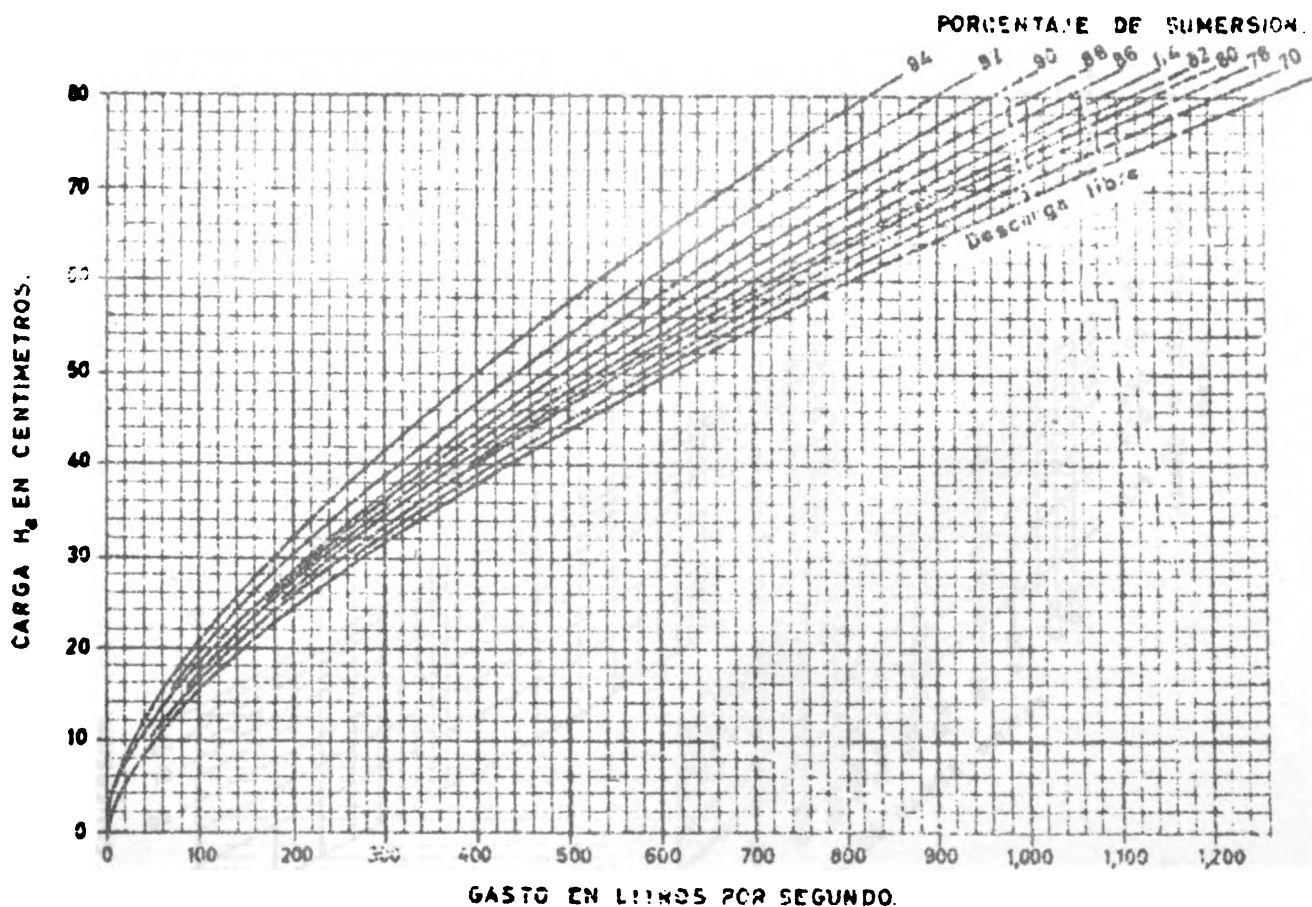


FIG. N° 7. Nomograma para determinar el gasto en un Medidor Parshall de 0.75 m. Ref. 7.

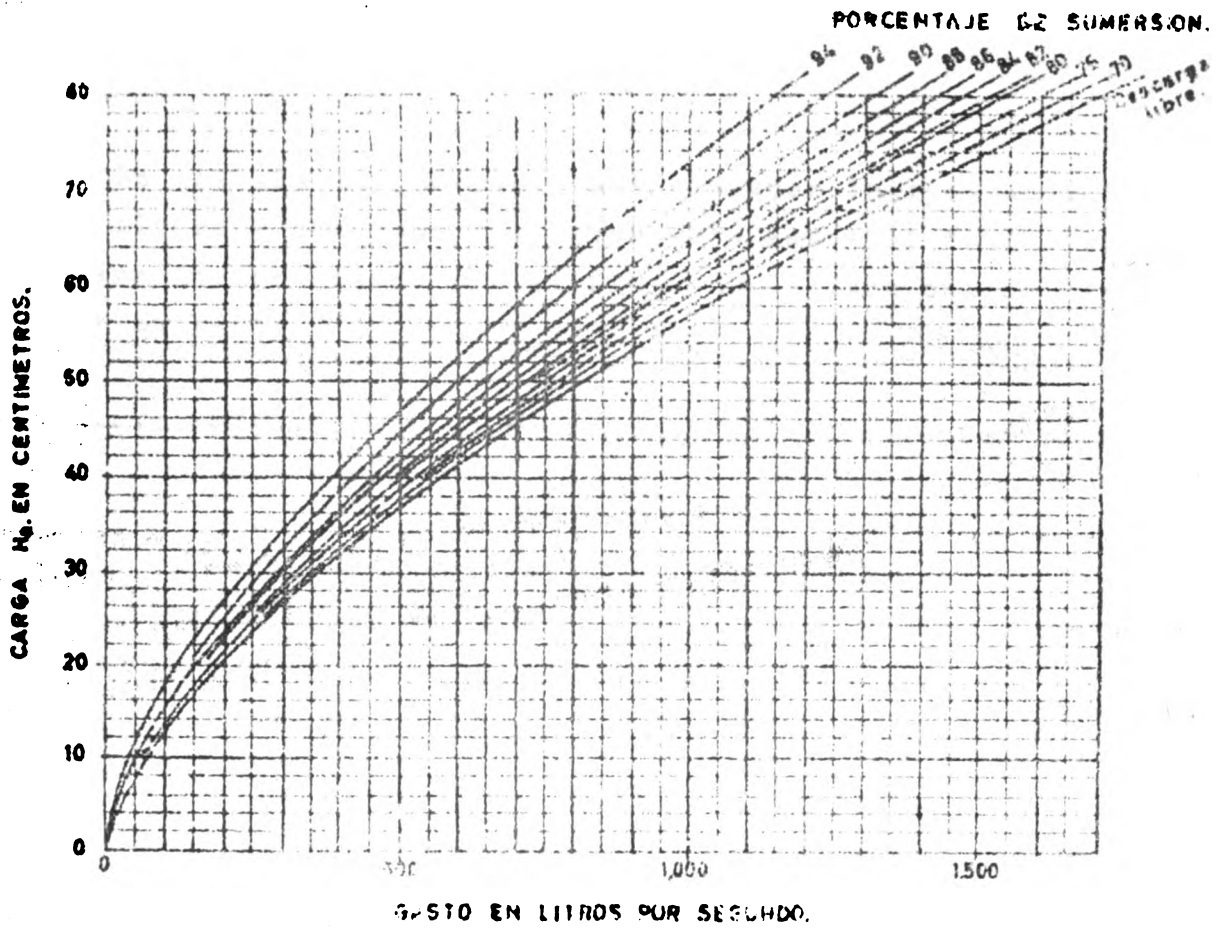


FIG. N° 8. Nomograma para determinar el gasto en un Medidor Parshall de 1.00 m. - Ref. 7.

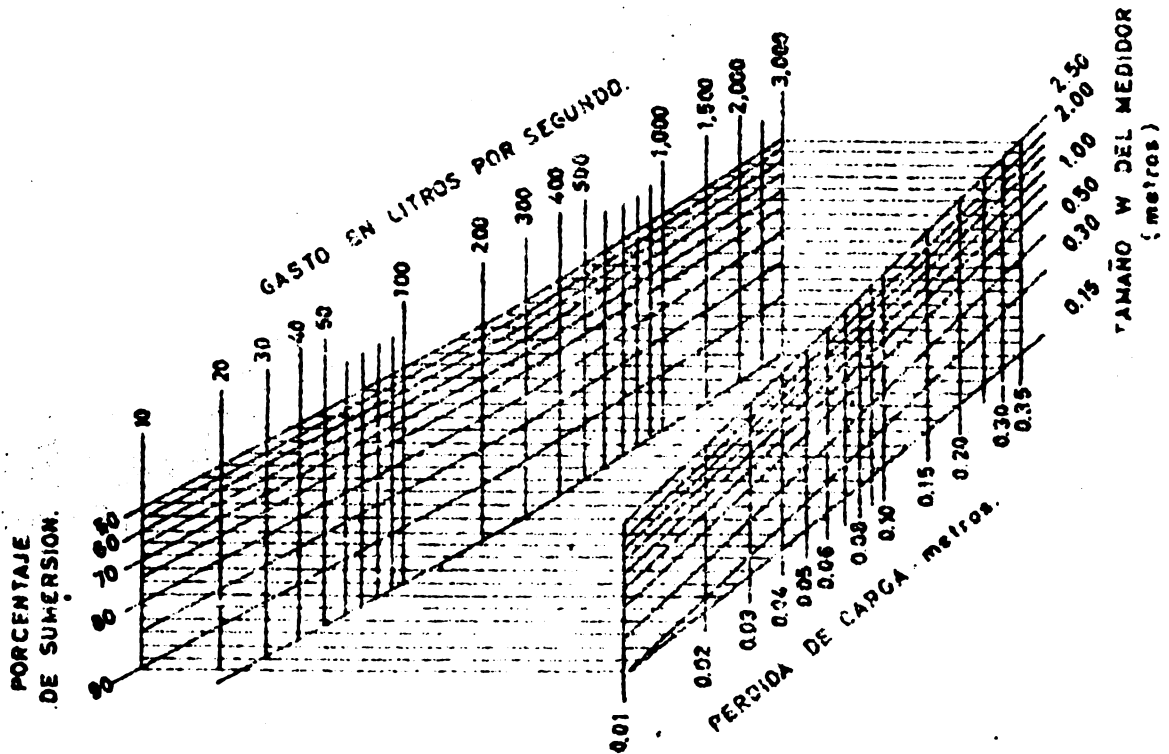


FIG. N° 9. Nomograma para calcular la pérdida de carga en Medidores Parshall - Ref. 7.

La instalación adecuada del aforador implica el cálculo de la altura a que debe colocarse éste sobre el fondo del canal para asegurarse de que el flujo sea libre cuando ocurra el máximo gasto.

Ejemplo.- Selecciónese un aforador Parshall para las siguientes condiciones:

Canal en tierra ($n = 0.025$) con taludes de 1:1; ancho del fondo: 1 m.; pendiente: 0.001; altura de los bancos: 0.90 m. Los gastos probables observados han sido los siguientes:

Gasto	Tirante
600 lts./seg. (Máx.)	0.6 m.
170 lts./seg. (Mín.)	0.3 m.

Solución:

- 1) Como deseamos que con el gasto máximo, la descarga sea libre, obtenemos en la Tabla N° 2 un medidor que satisfaga esta condición. Observamos que un medidor con cresta de 0.75 m. satisface este requisito.
- 2) La pérdida de carga, tomado del nomograma de la Fig. N° 9 correspondiente a una relación $H_p/H_a = 0.70$, es igual a 0.16 mts. y el valor de H_p , tomando $H_a = 0.52$ (Fig. N° 7), será igual a 0.36 mts.
- 3) En la Fig. N° 10 la línea $n - n$ representa el nivel normal del agua en el canal, que se asume horizontal por tratarse de un proyecto muy corto. La altura de esta línea sobre el fondo del canal, para un gasto de 600 lts/seg., es igual a 0.6 mts.

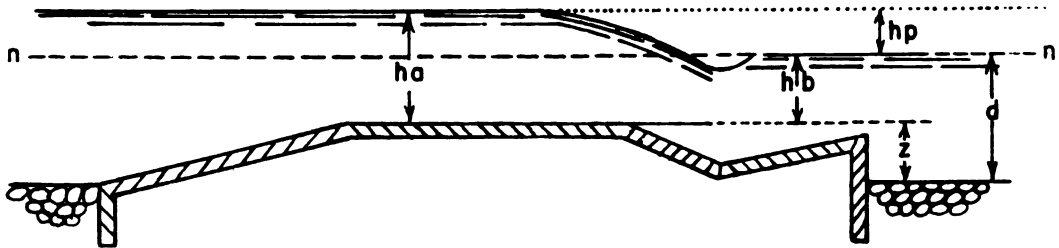


Figura N° 10

Cuando la estructura opera sumergida, se asume que el nivel del agua en la garganta del medidor estará a la misma altura que el nivel normal del canal. En tales circunstancias el valor de Z será la diferencia entre el tirante hidráulico del canal (d) y la elevación del agua sobre la cresta (H_p).

$$Z = 0.60 - 0.36 = 0.24 \text{ m.}$$

Esto representa la altura del piso del aforador sobre el fondo del canal.

En estas circunstancias el tirante hidráulico (d_1) del canal aguas arriba será igual al tirante hidráulico original (d) más la pérdida de carga (h_p).

$$d_1 = 0.60 + (0.52 - 0.36) = 0.76$$

Esta altura del agua es inferior a la altura de los bancos del canal (0.90 m) y, por consiguiente, el rebalse no producirá desbordamiento.

Los medidores Parshall ofrecen las siguientes ventajas para el aforo de agua en canales:

1. No son afectados por la velocidad de aproximación del agua en canales ordinarios.
2. Siendo la velocidad del agua en la garganta, mayor que la velocidad del cauce, no existe la posibilidad de que ocurran sedimentos que afecten los aforos.
3. Las pérdidas de carga son muy reducidas en comparación con otros dispositivos de aforo, lo que facilita su instalación en canales con pendientes limitadas.

Las siguientes pueden enumerarse como desventajas del aforador Parshall:

1. No puede combinarse fácilmente con otras estructuras, aún cuando resulta posible su combinación con saltos pequeños.
2. Su costo es más alto que el de un orificio o una compuerta.
3. No es tan preciso como una compuerta bien instalada, aún cuando el margen de error probable no sobrepasa el 5%, que es razonable.

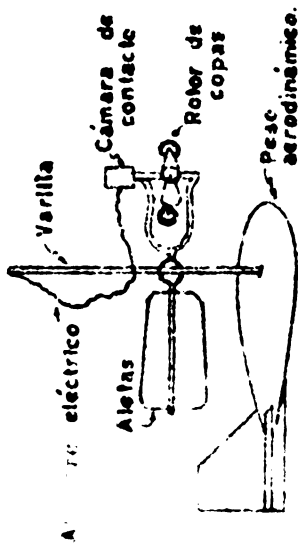
Molinete o Correntómetro

El molinete o correntómetro, como se ilustra en la Fig. 11(a), es un dispositivo especial que consta de un rotor montado sobre un eje vertical y provisto de copas que giran en virtud de la velocidad del agua. Las revoluciones del rotor son directamente proporcionales a la velocidad del agua y en consecuencia permiten elaborar una curva de calibración para cada molinete, según se ilustra en la Fig. N° 11(b).

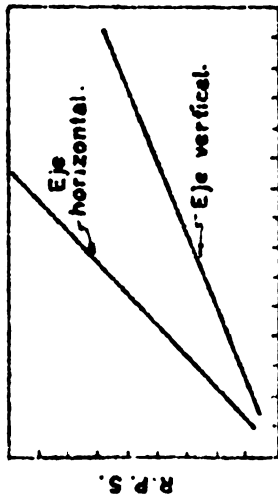
El sistema de aforo consiste en dividir el cauce de agua en varias secciones, como se ilustra en la Fig. 11(c), para determinar la velocidad del agua en cada sección. La suma de los productos de las áreas parciales por la velocidad correspondiente a cada área, dará el gasto total del cauce.

Determinación de la velocidad.— El perfil de la velocidad del agua en los ríos o canales semeja una parábola que tiene su eje paralelo a la corriente, (Fig. N° 11(d)). A fin de obtener un valor exacto de la velocidad promedio del cauce, sería necesario tomar la velocidad del agua en muchos puntos a lo largo del tirante hidráulico de cada sección, lo cual resultaría muy laborioso. Por esta razón, se han determinado experimentalmente los puntos en donde la velocidad del agua representa el promedio de la velocidad en toda la profundidad considerada. Los métodos standard que han sido adoptados para determinar la velocidad de los cauces se indican a continuación:

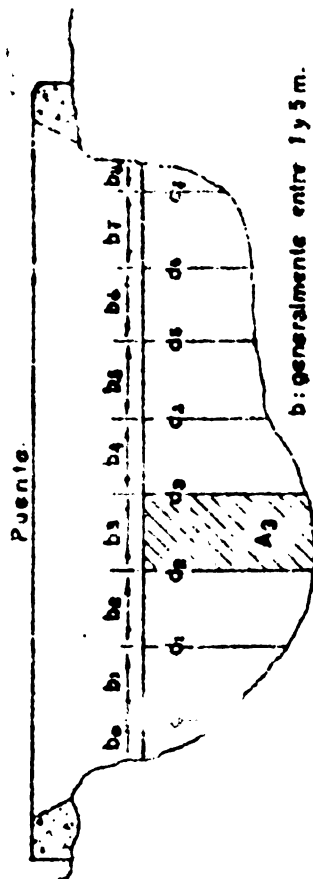
1. En ríos y cauces con profundidades menores de 15 cms. la velocidad promedio ocurre a 0.5 de la profundidad.
2. En cauces con profundidades que lleguen hasta de 45 cms., la velocidad promedio está localizada a 0.6 de la profundidad.
3. Los mejores resultados en la práctica se obtienen cuando se toma el promedio de las velocidades medidas a 0.2 y 0.8 de la profundidad del cauce. Este es el método standard usado por el Servicio de Reconocimiento Geológico de los Estados Unidos.
4. Cuando la velocidad en el cauce parece encontrarse anormalmente distribuida, o cuando se desea calibrar otros métodos, resultará conveniente tomar la velocidad a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad del agua, para obtener con ellos el promedio de la velocidad en cada sección.



a) Diagrama de un molinete.



b) Curva de calibración.

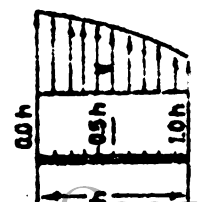


Area parcial : $A_3 = b_3 \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)$

Velocidad : $v_3 = \text{Promedio de las velocidades en } d_2 \text{ y } d_3$

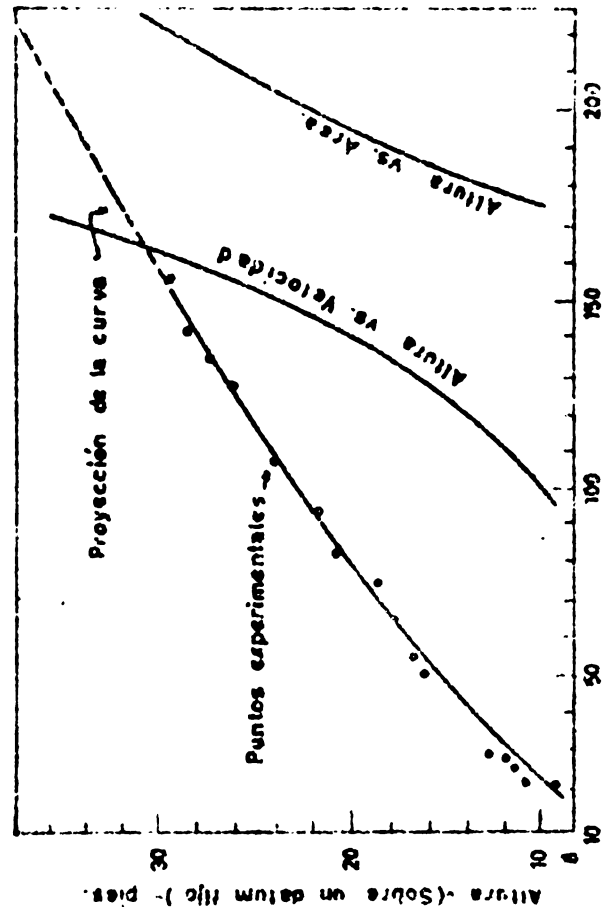
Caudal parcial : $Q_3 = A_3 \times v_3$

c) Sección de un río.



d) Perfil de velocidad (canal abierto)

Relaciones normales.
 Velocidad máxima a 0.05 - 0.75 h.
 Velocidad superficial = 0.8 a 0.95 del total.
 Velocidad media: probablemente a 0.8 h.
 - Con más exactitud dada por el promedio de las velocidades a 0.2 y 0.8 h.



e) Curva de niveles vs. descargas.

Operación.- Existen varios sistemas para realizar la operación práctica del aforo, según el tamaño y la profundidad del cauce. A continuación se describen algunos de los sistemas usados corrientemente.

1. **Vadeo del cauce.-** Este sistema resulta conveniente en cauces de poca profundidad. Generalmente, resultará conveniente colocar un cable de orilla a orilla en posición normal al cauce para que sirva de guía durante el proceso de aforo. Para hacer los registros el observador debe colocarse a unos 50 cms. aguas abajo del correntómetro, para evitar la turbulencia del agua y la consiguiente interferencia con los registros.
2. **Cables o puentes.-** Este sistema es muy usado para el aforo de ríos muy grandes. Consiste en colocar un cable elevado de orilla a orilla del río, sobre el cual se desliza un carro pequeño desde donde opera el observador para hacer las determinaciones de la profundidad y la velocidad del agua en los puntos que se hayan escogido. En estos casos el molinete se suspende de un cable y debe ir provisto de un peso suficientemente grande para que lo mantenga en posición vertical.

La misma operación puede realizarse desde un puente o cualquier otra estructura que atraviese el río. Cuando los puentes están colocados en una posición oblicua, será necesario introducir algunas correcciones, según el ángulo del puente con relación al cauce.

Los cimientos del puente pueden, en ocasiones, alterar el flujo del agua, por lo cual

resultará conveniente efectuar el aforo aguas abajo, donde, generalmente, existe mayor regularidad.

3. Botes o canoas.- Este sistema consiste en hacer las mediciones desde un bote que se desliza a través del río, guiado por un cable colocado a través del mismo en posición suficientemente rígida para darle consistencia a los registros.

Formulario de Registros.- La Fig. N° 12 ilustra un formulario apropiado para hacer los registros correspondientes a un aforo con molinete.

(Encabezamiento)

Fecha _____ Operador _____ Río _____ Localidad _____

Dis- tancia	Profun- didad	Revolu- ciones	Tiempo	Velocidad		Ancho	Prof. media	Area Media	Des- carga
				mts.	Media				
0	2'	20	30	5					
					7	10'	3.5'	35	245
10'	5'	20	20	9					

(Las cifras son arbitrarias)

Figura N° 12

El espaciamento entre las líneas verticales que dividen las áreas debe ser mayor cuando la sección o la velocidad del cauce son irregulares. Generalmente, este espaciamento no debe ser menor de 30 cms. y puede llegar hasta 10 mts. en ríos anchos y uniformes. Usualmente no se justifica dividir el río

en más de 20 secciones.

Durante la operación de aforo el molinete debe mantenerse quieto, mientras se hacen las lecturas, y el rotor debe girar libremente, ya que se ha calibrado bajo tales condiciones. Las materias flotantes, como basuras o algas, pueden alterar la precisión de las lecturas.

Flotadores.

Un flotador es cualquier objeto más liviano que el agua, susceptible de ser transportado por el agua. Una botella, un limón, u otro objeto similar, puede usarse como flotador.

Para hacer el aforo de un cauce, el flotador se coloca al comienzo de una sección recta del mismo y se toma el tiempo que demora en recorrer una distancia determinada. En esta forma puede determinarse la velocidad del flotador que, multiplicada por un coeficiente de 0.85, da la velocidad media aproximada del agua. Esta velocidad, multiplicada por la sección transversal media del cauce, dará la descarga aproximada del mismo.

Es conveniente indicar que este método conduce sólo a estimativos groseros del caudal, pero en ningún caso reemplaza a los métodos más precisos indicados anteriormente.

Dispositivos para Medir el Agua en Tuberías.

A continuación se describirán los métodos más corrientemente usados en el campo y se omitirá la discusión de aquellos dispositivos especiales, como el tubo de Venturi o la boquilla de flujo, que son de uso más frecuente en el laboratorio o en instalaciones industriales.

Entre los sistemas usados en el campo, se pueden indicar los siguientes:

Orificios.- Como se discutió anteriormente, al tratar de los orificios para aforar canales abiertos, la fórmula

general de descarga de los orificios es:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

En donde los símbolos tienen la misma significación explicada antes.

La descarga de una bomba puede medirse por medio de un orificio que se perfora en una lámina delgada de metal, la cual se acopla a la tubería de descarga de la bomba. El espesor de la lámina no debe ser mayor de 1/16 de pulgada.

Para obtener resultados exactos, la tubería debe estar en una posición horizontal y sin codos, o curvaturas u obstrucciones, en una longitud 8 veces mayor que el diámetro de la misma. La tubería debe fluir llena y la presión debe ser, por lo menos, igual a 2 cms. de agua.

La carga o presión se mide por medio de un tubo de goma de 1/8 de pulgada de diámetro, al cual se le acopla una porción de tubo de vidrio en el extremo libre. El otro extremo se conecta a la tubería por medio de un niple, el cual no debe sobrepasar la superficie interior de la tubería.

La carga será la altura del agua (H) en el tubo de goma, medida verticalmente desde del centro de la tubería.

Método Rústico para Estimativos Aproximados.

En ocasiones no se cuenta con dispositivos adecuados para medir la descarga de una bomba, y se desea hacer un estimativo aproximado de la misma. En tales casos puede usarse el método que se describe a continuación:

Con una regla corriente se mide la distancia horizontal que media entre el extremo de la tubería y un punto que está a 30 centímetros por encima de la superficie superior del chorro de agua. La distancia horizontal así medida, expresada en centímetros, multiplicada por el área de la tubería en centímetros cuadrados y por un coeficiente de 0.004 dará el valor

de la descarga en litros por segundo. Expresado en una fórmula,

$$Q = A \times L \times 0.004$$

Donde: Q = Descarga en litros por segundo.

A = Área de la tubería en centímetros cuadrados.

L = Distancia horizontal entre el extremo de la cañería y un punto de la superficie superior del chorro colocado a 30 centímetros de la horizontal, en centímetros.

En caso de que la tubería no descargue llena, se procede en la misma forma que se ha descrito anteriormente, y se mide, además, la distancia en centímetros que media entre el tope interno superior de la tubería y la superficie del agua. Si esta distancia en centímetros es denominada x, y el diámetro de la tubería se denomina D, la descarga, Q, en litros por segundo, será dada por la siguiente fórmula:

$$Q = \left(1 - \frac{x}{D}\right) A \times L \times 0.004$$

Como se indicó arriba, este método es sólo aproximado y se usa sólo para hacer estimativos groseros de la descarga de agua en tuberías.

REFERENCES

- 1) ADDISON, H. A Treatise on Applied Hydraulics. Chapman & Hall Limited. London. 1948. 614 P.
- 2) CHRISTIANSEN, J.E. Measuring Water For Irrigation. University of California. Bulletin 588. 1935. 95 P.
- 3) PARSHALL, R.L. Parshall Flumes of Large Size. Colorado Agricultural College. Bulletin 386. 1932. 55 P.
- 4) _____ The Parshall Measuring Flume. Colorado Experiment Station. Bulletin 423. 1936.
- 5) _____ Improving the Distribution of Water to Farmers by Use of the Parshall Measuring Flume. United States Department of Agriculture. Bulletin 488. 1945. 54 P.
- 6) _____ Measuring Water in Irrigation Channels With Parshall Flumes and Small Weirs. United States Department of Agriculture. Circular 843. 1950. 62 P.
- 7) TRUEBA, C.S. Hidráulica. Editorial de Libros Técnicos "Avance", México. 1947. 430 P.
- 8) U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. Irrigation Advisers' Guide. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation. 1951. 216 P.
- 9) U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Stream Gaging Procedure. U.S. Geological Survey, W.S.P. 888.
- 10) WOLFE, J.W. A Pumping Manual for Irrigation and Drainage. Oregon State College. Experimental Station Bulletin 481. 1950. 39 P.

ESTRUCTURAS PARA DISTRIBUCION DE AGUA EN LOS FUNDOS

El sistema de distribución de aguas en un fundo debe permitir llevar a cualquier área del fundo la cantidad de agua necesaria para el riego de esa área, sin causar erosión del suelo ni inundación de las partes más bajas, y permitiendo una distribución uniforme del agua. La distribución del agua, por otra parte, debe realizarse por medio de dispositivos simples y de fácil y rápida operación.

Las estructuras de uso más corriente en el fundo son las cajas de división de aguas, las trancas y los saltos. Además, ocasionalmente son necesarios los viaductos o puentes canales, los sifones invertidos y los puentes. A continuación se ofrece una discusión sobre el uso, diseño e instalación de cada una de estas estructuras.

Caja de División.

Las cajas de división son estructuras que se usan para dividir el agua de un canal entre dos o más acequias de distribución. Este tipo de estructura puede denominarse, también, compuerta de cabecera o compuerta de derivación, según su localización y según el objetivo que cumple. Las figuras 1 y 2 ilustran varios tipos de estas estructuras.

El diseño de las cajas de división, cuando tienen el fondo plano y situado al nivel de las acequias que sirven, puede hacerse en forma adecuada con las siguientes fórmulas:

$$Q = C_d \times 0.382 b \sqrt{2g} du^{3/2}$$

Donde: Q = Gasto en mts³/seg.

C_d = Coeficiente de descarga = 0.92

b = Ancho de la caja en mts.

g = Aceleración de la gravedad en mts/seg²

du = Profundidad del agua, aguas arriba de la caja, en mts.

La expresión anterior, que corresponde a la fórmula para vertederos de cresta ancha, se aplica cuando la profundidad del agua, aguas abajo, es menor de $\frac{2}{3} d_u$. Cuando esta condi-

ción no se satisface, se aplicará la fórmula siguiente:

$$Q = C_d \times b \ d_d \sqrt{2g (d_u + h_{vu} - d_d)}$$

$$C_d = 1.29 - 3.2 \left(\frac{hvd}{d_d} \right)$$

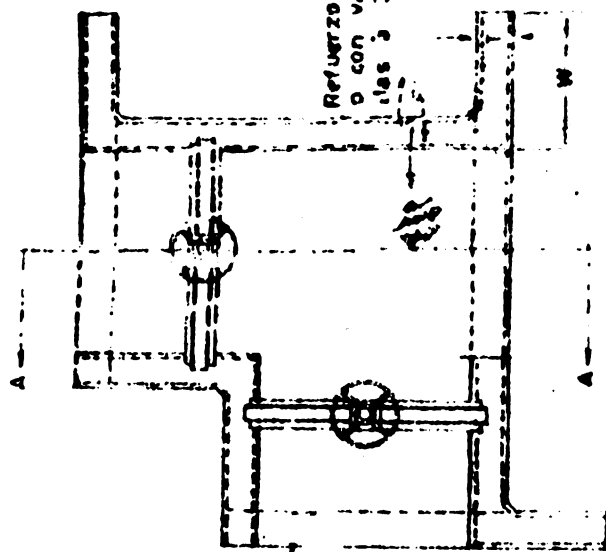
$$hvd = \frac{v^2}{2g}$$

En estas fórmulas, los símbolos tienen la misma significación que en la fórmula anterior y:

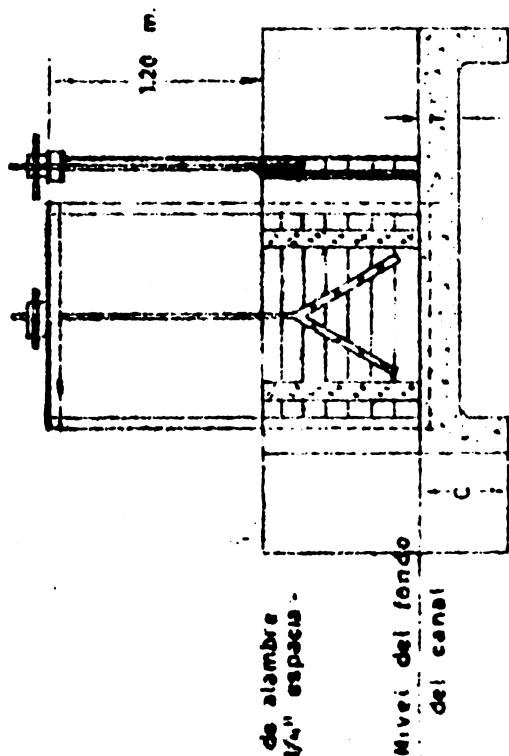
- d_d = Profundidad del agua en el canal aguas abajo en mts.
- hvd = Carga de velocidad en mts., correspondiente a la sección del canal.
- v = Velocidad del agua en el canal en mts/seg.

En la práctica del diseño se asumirá una sección de descarga para la caja y se calculará el valor de d_u . Este valor no debe ser muy superior a d_d , a fin de evitar que ocurra desbordamiento del agua sobre los bancos del canal. Generalmente, resulta conveniente dar a la caja un ancho (b) igual a la plantilla del canal.

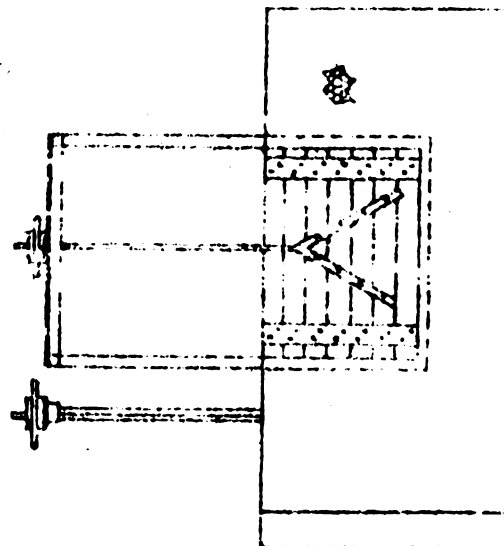
Ejemplo.- Diseñese una caja de división como la que muestra la Fig. N° 1, para un canal cuyo gasto es de 283.2 lts/seg.



PLANTA



CORTE A-A

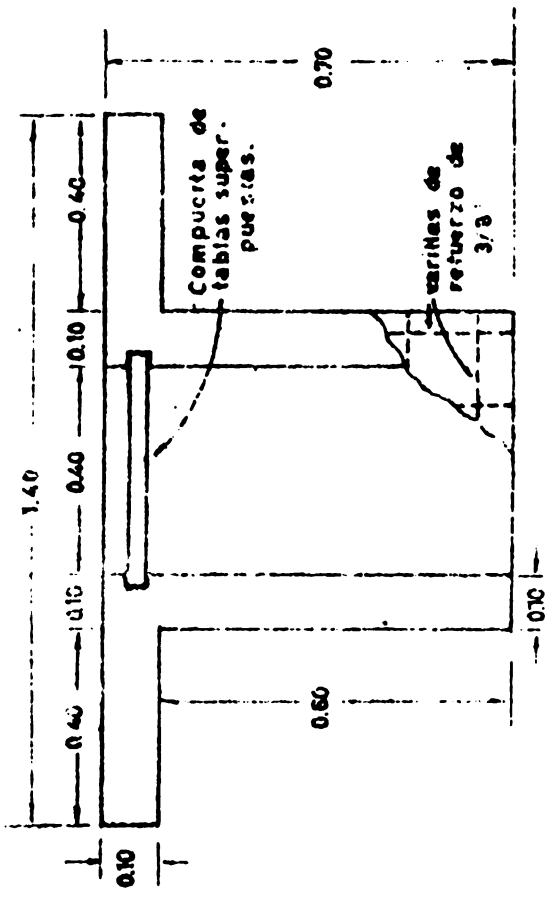


FRENTE

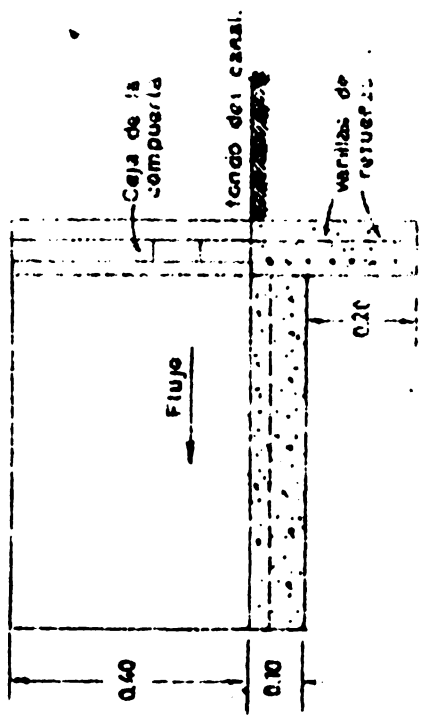
FIG Nº 1 CAJA DE DIVISION O COMPUERTA DE DEF

- T - el espesor mínimo de los muros será de
- C - E' valor mínimo de C será de 30 cm.
- W - Las aletas deben extenderse por lo menos la mitad del banco de la acequia.

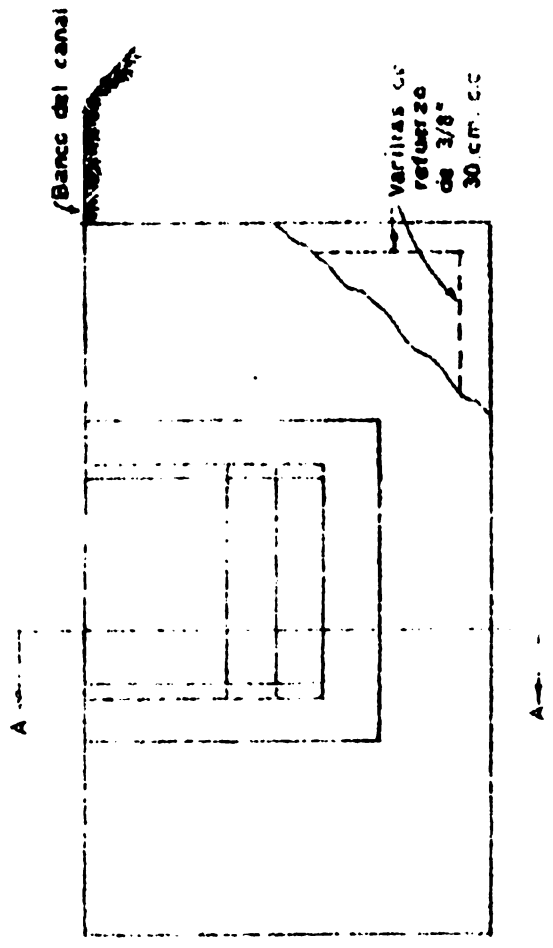
Adaptado de Ref. 3.



PLANTA.



CORTE A-A



FRENTE.

FIG. N° 3. Tranca de concreto
Capacidad aproximada 100 M³.
Temado de Ref 2

Nota: Todas las dimensiones están expresadas en metros.

283.2 lts/seg.

Profundidad del agua en el canal = $d_d = 0.40$ m.

Ancho del canal (en la base) = $b_c = 0.60$ m.

Taludes 1:1

Franco del canal = $F = 0.20$ m.

Determinese la carga de flujo cuando el ancho de la caja es de 0.60 m.

Determinese el alto de la caja, considerando un franco de 0.15 m.

1°) Verificamos si el flujo corresponde al de un vertedero con cresta ancha:

$$Q = C_d \times 0.382 \times b \sqrt{2g} \quad du^{3/2}$$

$$du^{3/2} = \frac{0.283}{0.92 \times 0.382 \times 0.60 \times 4.44} = 0.302$$

$$du = 0.302^{2/3} = 0.45$$

$$du = 0.45 \text{ m.}$$

$$2/3 \, du = 0.30 < D_d = 0.40$$

No hay flujo del tipo sobre cresta ancha.

2°) Aplicando fórmula (2):

$$Q = c'_d \times b \times d_d \sqrt{2g (du + hvu - d_d)}$$

$$c'_d = 1.29 - 3.2 \frac{hvd}{d_d}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.283}{0.4} = \frac{0.71^2}{19.62} = 0.0257 \text{ m.}$$

$$c'_d = 1.29 - 3.2 \frac{0.0257}{0.40} = 1.085$$

$$0.283 = 1.085 \times 0.60 \times 0.40 \times 4.44 \sqrt{du + 0.026 - 0.40}$$

$$du = \left(\frac{0.283}{1.085 \times 0.60 \times 0.40 \times 4.44} \right)^2 - 0.026 + 0.40 =$$

$$= 0.06 - 0.026 + 0.40 = 0.434 \text{ m.}$$

La carga de flujo será, entonces:

$$0.434 - 0.40 = 0.034 \text{ m., o sea, 3.5 cm.}$$

La profundidad de la caja será, entonces:

$$0.434 + 0.15 = 0.584 \text{ m} \approx 0.60 \text{ m.,}$$

que es igual a la profundidad del canal.

Como el franco del canal es de 0.20 m, no habrá peligro de desbordamiento. Los cálculos ejecutados corresponden a la sección de la caja localizada a lo largo del canal principal, pero el diseño de las tomas laterales se realiza en forma similar.

Las dimensiones de estas cajas pueden proporcionarse según se indica en la Fig. N° 1. En todos los casos será conve-

niente ponerle suficientes alas laterales y verticales, para amarrarla al suelo y evitar la horadación del agua y la falla eventual de la estructura.

Las trancas son estructuras que sirven para elevar el nivel del agua en una acequia, a fin de facilitar su derivación hacia otra acequia, o para permitir su aplicación a los campos de cultivo.

Las Figs. Nos. 3 y 4 ilustran dos de estas estructuras, construidas de concreto y de madera, respectivamente.

El diseño de las trancas se realiza en forma similar al diseño de las cajas de división que se explicó anteriormente.

Aparte de las trancas de tipo permanente ilustradas en las Figs. Nos. 3 y 4, se usan también algunas trancas portátiles, como las que se ilustran en las Figs. Nos. 5 y 6, las cuales se construyen de lona impermeable o de metal y se utilizan para desviar el agua hacia las regueras, o para levantar el nivel del agua y crear una carga suficiente para operar los sifones de riego.

El control del nivel del agua en las trancas permanentes se ejecuta por medio de tablas o compuertas que se superponen o se deslizan en las ranuras laterales de la estructura. Esta circunstancia produce una caída o un chorro, por lo cual resulta necesario proteger el fondo y las paredes del canal aguas abajo, por medio de un delantal, según se ilustra en las Figs. Nos. 3 y 4.

Saltos.

Los saltos son estructuras que se emplean para reducir la gradiente hidráulica de los canales, a fin de aminorar la velocidad del agua y evitar la erosión de los cauces.

Estas estructuras se diseñan esencialmente como vertederos contraídos, en los que el coeficiente de descarga (C_d) se modifica según las condiciones generales del cauce de aproximación.

La fórmula general para el diseño de estas estructuras es como sigue:

$$Q = C_d L H^{3/2}$$

Donde: Q = Gasto en $m^3/\text{seg.}$

L = Longitud de la cresta en m.

H = Carga de flujo en m.

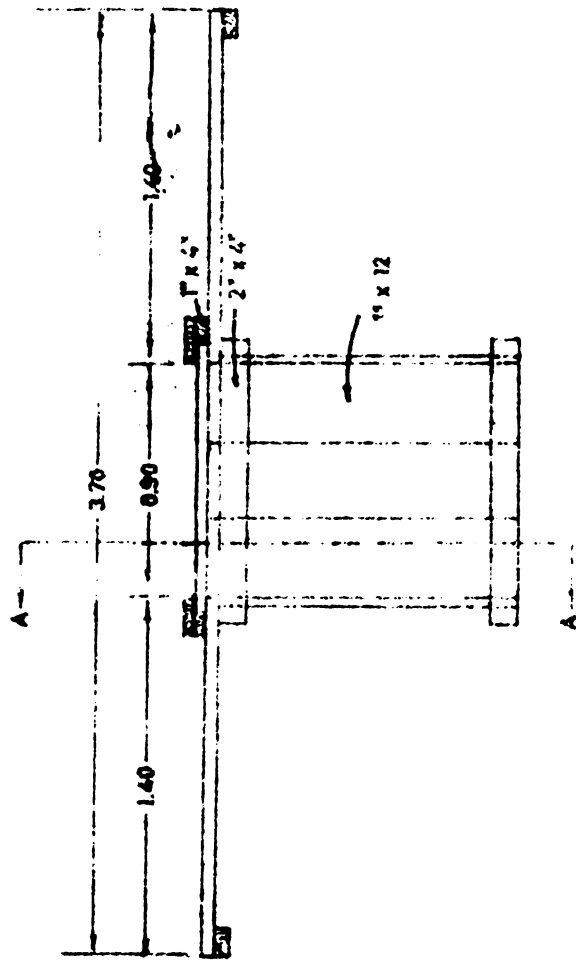
C_d = Coeficiente de descarga.

El coeficiente C_d para el diseño de estas estructuras, cuando existe flujo libre y cuando la cresta es recta, puede tomarse igual a 1.78.

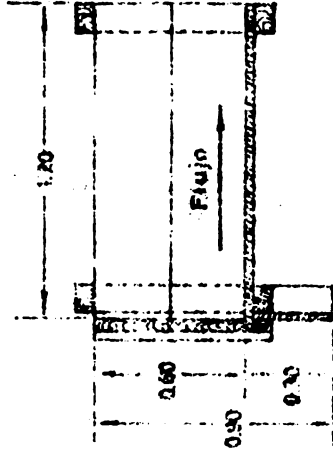
Las Figs. Nos. 7 y 8 ilustran dos tipos de saltos y presentan la forma de diseñar estas estructuras, según trabajos experimentales que se describen en las referencias 7 y 10.

Localización de los saltos.- Para localizar los saltos a lo largo de una acequia, será conveniente que el remanso producido por el salto más bajo se prolongue hasta el salto inmediatamente superior, a fin de asegurar un control efectivo sobre la gradiente hidráulica del canal en toda la longitud de éste, y para que el agua misma sirva de colchón protector en la zona inferior de salto.

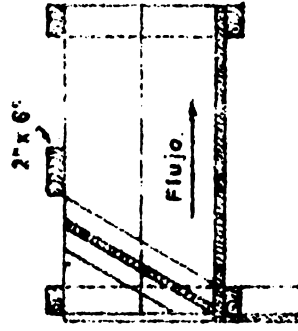
Para hacer la localización adecuada de los saltos, será conveniente levantar un perfil a lo largo de la acequia y establecer la pendiente del terreno (S_t), y después de calcular la pendiente máxima tolerable que no produce erosión del cauce (S_c), se determinará la distancia que debe mediar entre dos



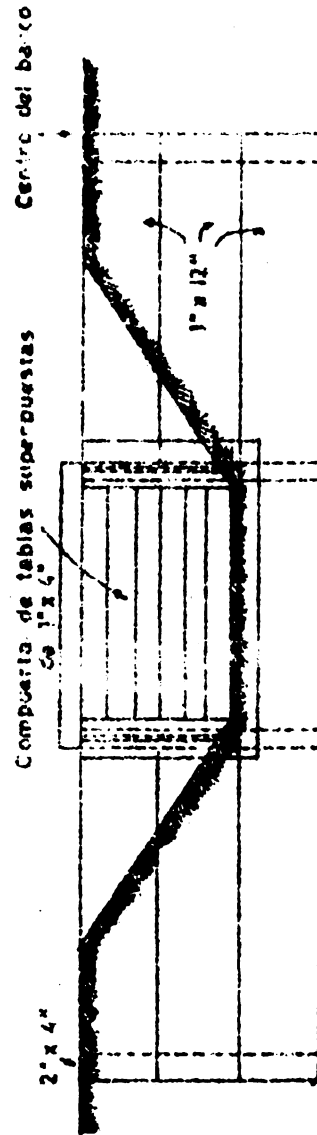
PLANTA



CORTE A-A
(Con compuerta vertical).



(Con compuerta inclinada).



FRENTE

Nota. Las dimensiones están expresadas en metros.

FIG. Nº 4 Tranca de madera
Adaptado de Ref. 4

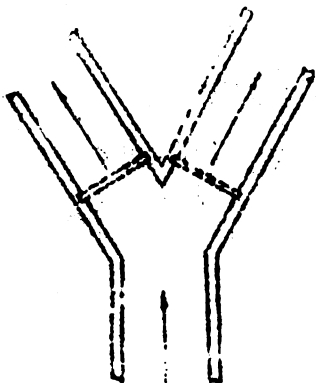
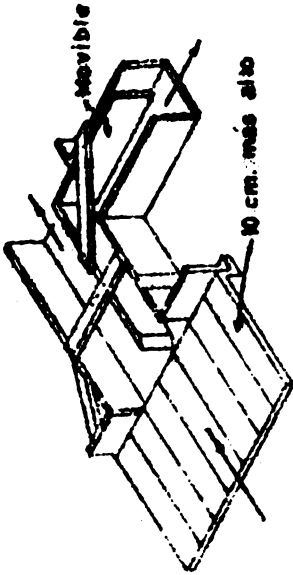
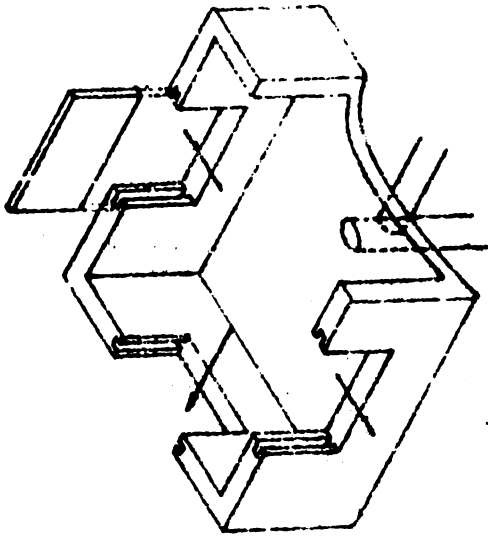


FIG. Nº 2. Estructuras para darán el agua. Ref. 2.

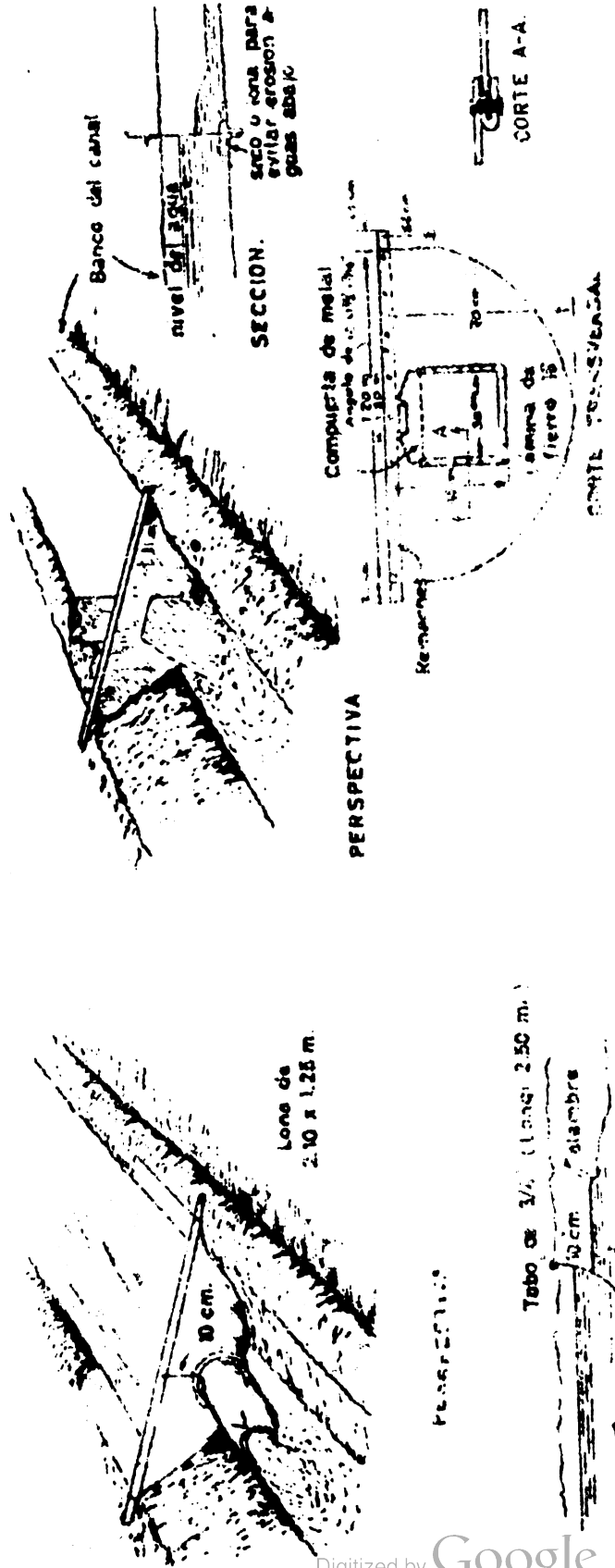
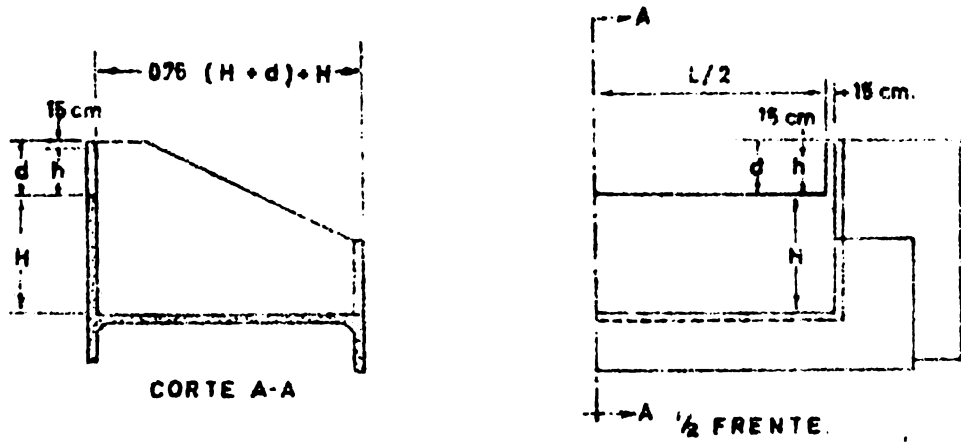
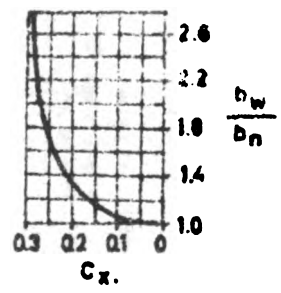
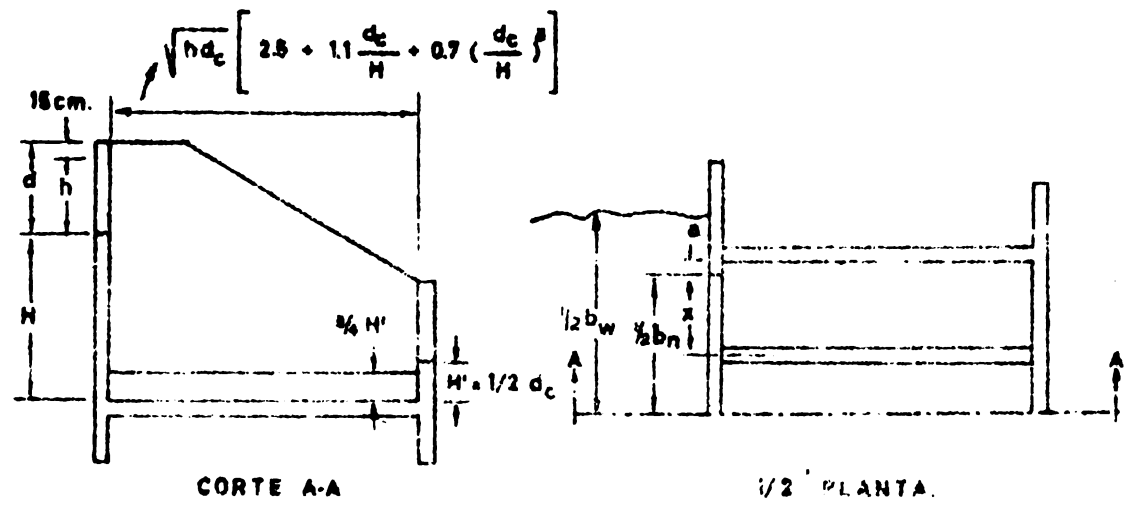


FIG. Nº 6. Tranca portátil de metal Ref. 11



$$Q = 3.2 L h^{3/2}$$

FIG. N° 7. Salto con delantal protector recto. Ref. 7



$$x = C_x b_n + 3a$$

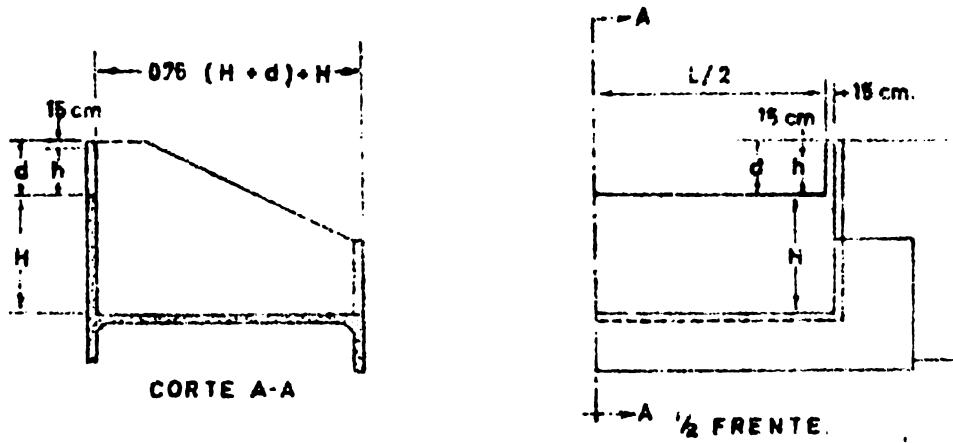
$$d = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b_n^3 g}}$$

$$Q = 3.2 b_n h^{3/2}$$

- Q = Gasto máximo
- H = Altura del salto.
- h = Carga sobre la cresta.
- d = Prof. del agua en el cauce.
- d_c = Prof. crítica del agua.
- L } Longitud de la cresta
- b_n }
- b_w = Ancho del canal.
- g = Aceleración de la gravedad.

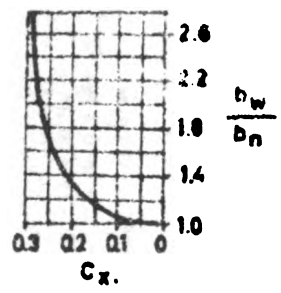
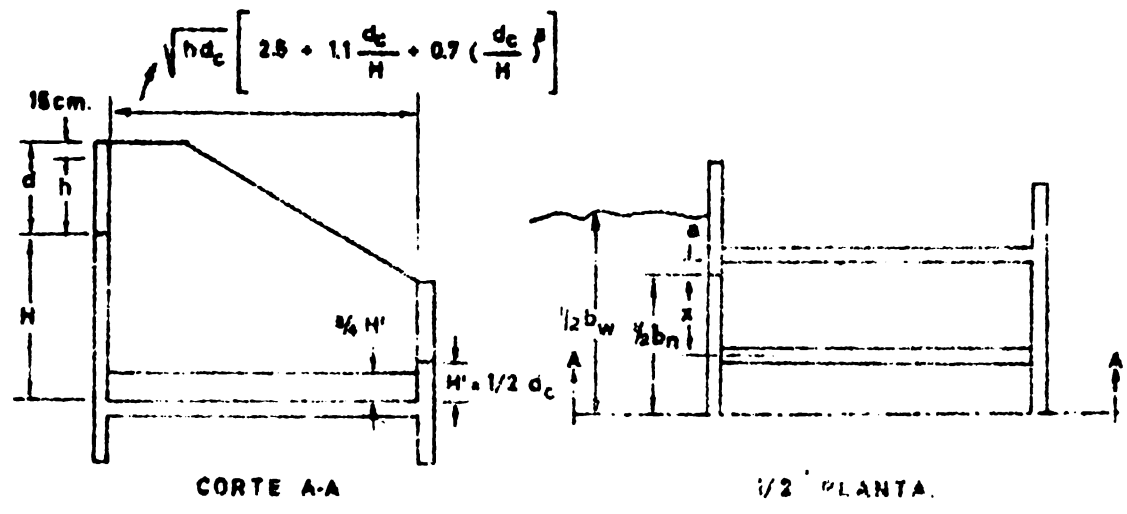
FIG. N° 8 Salto con colchón protector sg. Ref. 10

ELEMENTOS DE DISEÑO PARA DOS TIPOS DE SALTOS.



$$Q = 3.2 L h^{3/2}$$

FIG. N° 7. Salto con delantal protector recto. Ref. 7



$$x = C_x b_n + 3a$$

$$d = \sqrt{\frac{Q^2}{b_n^3 g}}$$

$$Q = 3.2 b_n h^{3/2}$$

- Q = Gasto máximo
- H = Altura del salto,
- h = Carga sobre la cresta
- d = Prof. del agua en el cauce.
- d_c = Prof. crítica del agua.
- L = Longitud de la cresta
- b_n = Ancho del canal.
- g = Aceleración de la gravedad.

FIG. N° 8 Salto con colchón protector sq. Ref. 10

ELEMENTOS DE DISEÑO PARA DOS TIPOS DE SALTOS.

$Q = 216 \text{ lts/seg.}$
 $n = 0.025$
 $z = 1$

Pendiente del terreno: $51 \times 10 \%$
 Velocidad máx. erosiva: $4 \times 0.7 \text{ m/seg.}$
 Altura máxima del salto: 1.0 m.

Bancos del canal

Nivel del agua: $S_1 = 2.5 \%$

Perfil del terreno: $S_2 = 10 \%$

1) Verificación de la velocidad: Asumimos: $h = 0.85 \text{ m.}$
 $d = 0.24 \text{ m.}$

$Z = 0.26 (0.75) = 0.190 \text{ m}^2$
 $P = 0.55 (0.48 + 1.4) = 1.23 \text{ m}$
 $R = 0.30 / 1.23 = 0.155 \text{ m}$
 En el Nomograma $V = 1.17 \text{ m/seg.}$
 $Q = 0.750 \times 1.17 = 0.222 = 215 \text{ lts/seg.}$
 $V = 1.17 > 0.70$ Se regulan saltos.

2) Pódicos como pendiente que no produce erosión: S_c

$A = \frac{Q}{V} = \frac{0.215}{0.7} = 0.3 \text{ m}^2$ Asumimos: $F = 1.0 \text{ m}$
 $H = 0.30 \text{ m.}$
 $A = 0.3 \times (0.3 + 0.7) = 0.30 \text{ m}^2$
 $P = 0.70 + (0.80) = 1.40 \text{ m}$
 $R = 0.30 / 1.40 = 0.214 \text{ m}$ $S_c = 2.5 \%$
 En el Nomograma

3) Distancia entre saltos:

$L = \frac{1000 H}{S_1 - S_2} = \frac{1000 \times 0.75}{2.5 - 1.0} = 400 \text{ m.}$

Fig. N° 3 del Capítulo
 Flujo de agua en Ca-
 nales

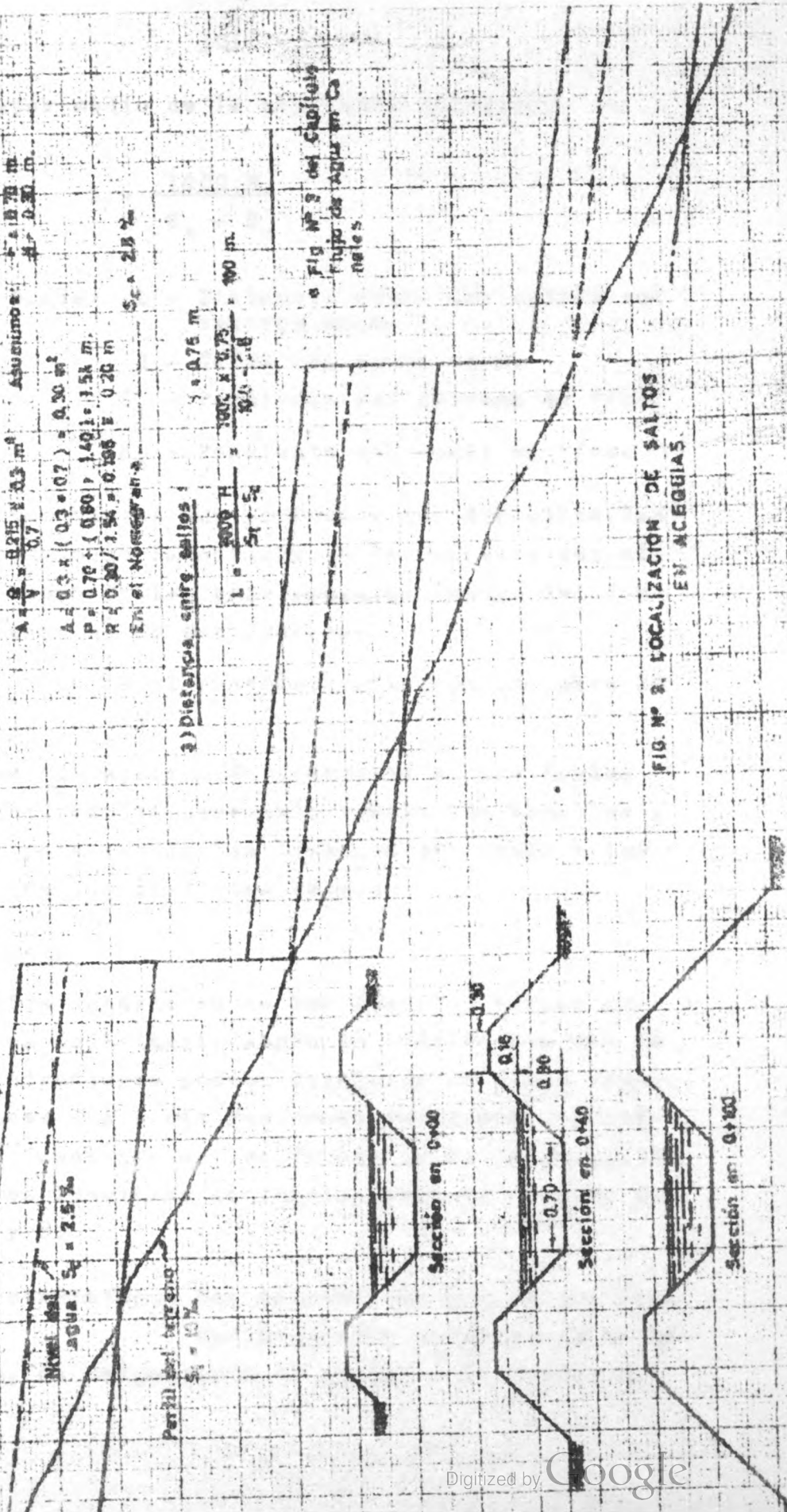


FIG. N° 3. LOCALIZACIÓN DE SALTOS EN ACEQUIAS.

saltos sucesivos, por medio de la siguiente relación:

$$L = \frac{1000 H}{S_t - S_o}$$

Donde: L = Distancia entre dos saltos sucesivos en m.

H = Caída del salto en m.

S_t = Pendiente del terreno en ‰.

S_o = Pendiente del canal en ‰.

A fin de evitar cortes muy profundos que dificultarían la desviación del agua de la acequia, o terraplenes muy altos, las caídas recomendables para acequias dentro del fundo no deben sobrepasar de 80 centímetros.

La Fig. N° 9 ilustra el procedimiento descrito para la localización de los saltos.

Los saltos son de aplicación frecuente en los fundos porque, generalmente, resulta necesario trazar las acequias a máxima pendiente, para seguir los linderos del fundo o las líneas divisorias de los distintos lotes.

Estructuras combinadas.

En los párrafos anteriores se han descrito varias estructuras de manera individual, según la función que han de cumplir. Estas estructuras pueden diseñarse en forma combinada, para satisfacer dos o más funciones de manera simultánea. El caso más frecuente en los fundos es el de un salto, que cumple a la vez funciones de tranca, como se ilustra en las Figs. Nos. 7 y 8.

Materiales de construcción.— Las estructuras que se han discutido, pueden construirse de madera, de concreto, de mampostería de piedra o de ladrillo, o

de lámina de fierro. Generalmente, cuando el planeamiento del sistema de distribución de un fundo no ha sido elaborado en forma precisa y definitiva, resulta preferible construir las distintas estructuras de madera, porque éstas son, en general, menos costosas y de más fácil movilización. Las estructuras de concreto o de mampostería son de carácter más permanente y deben construirse en sitios definitivamente establecidos.

Puentes canales.- Los puentes canales o viaductos son canales elevados que se usan para atravesar depresiones, cuando éstas son muy profundas. Estas estructuras pueden construirse de madera, de lámina de fierro corrugado, o de concreto.

Los viaductos tienen, generalmente, sección rectangular o semicircular y se diseñan como los canales. En éstos, el tirante hidráulico se toma igual a la mitad de la plantilla, para asegurar máxima eficiencia hidráulica.

Ejemplo.- Calcúlense las dimensiones de un viaducto de madera, cuya pendiente (S) será de 0.005 y cuyo gasto Q = 100 lts/seg.

Solución: Para máxima eficiencia hidráulica

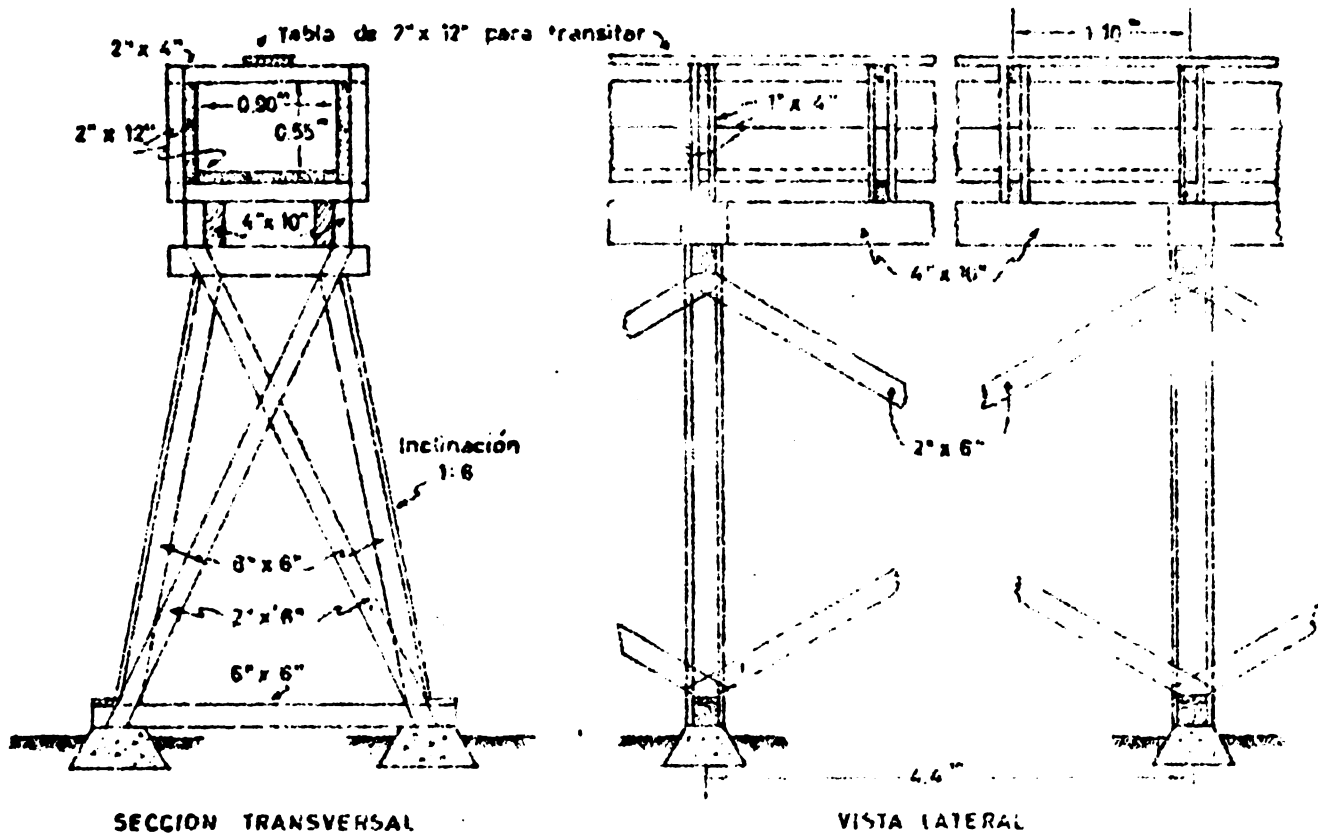
$$b = 2d$$

$$\text{Area: } bd = 2d^2$$

$$\text{Per.Hum.} = b + 2d = 4d$$

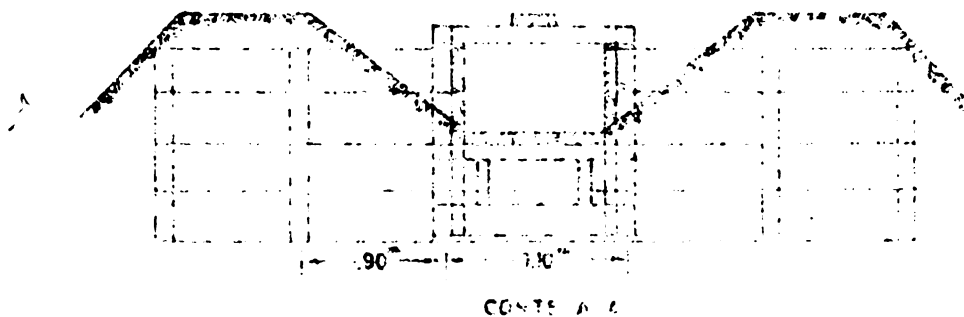
$$\text{Rad.Hidr.} = R = \frac{2d^2}{4d} = 0.5 d$$

$$n = 0.013 \text{ (madera)}$$

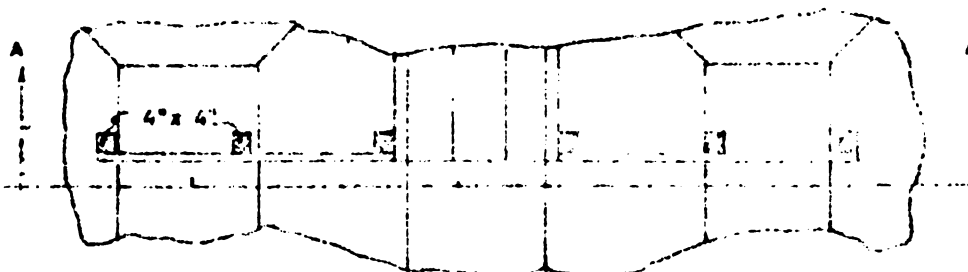


SECCION TRANSVERSAL

VISTA LATERAL



CORTE A-A



PLANTA A LA ENTRADA Y A LA SALIDA

Capacidad aproximada de transporte:

Pendiente	Costo
0000	356 \$/sq
0015	445
0020	506
0025	567

FIG. N° 10 VIADUCTO SIEVADO
Tomado de Ref. 4.

$$\text{Manning: } Q = \frac{1}{0.013} \times 2d^2 (0.5d)^{2/3} \times (0.005)^{1/2}$$

$$0.1 = 6.9 d^{8/3}$$

$$\left(\frac{0.1}{6.9}\right)^{3/8} = d = 0.205 \text{ m.}$$

$$b = 2d = 0.41 \text{ m.}$$

Dejando un franco de 0.10 m., el área del conducto sería de 41 centímetros de ancho por 30 centímetros de alto.

Este problema puede resolverse, también, por medio del nomograma de la Fig. N° 3 del capítulo sobre Flujo de Agua en Canales, en la forma siguiente:

Asúmase un valor de $b = 0.4$

Entonces $d = 0.2$

$R = 0.1$

Para $R = 0.1$ y $S = 0.005 = 5^\circ/100$

V (nomograma) = 1.2 m/s

Verificación:

$$Q = A \times v = 0.4 \times 0.2 \times 1.2 = 0.098 = 0.1 \text{ mt./seg.}$$

La Fig. N° 10 muestra un viaducto pequeño donde pueden apreciarse los elementos estructurales de estas obras.

Sifones invertidos.

Los sifones invertidos son estructuras que se usan también para conducir el agua a través de depresiones del terreno. Generalmente, estos sifones se construyen de concreto, el cual debe ser reforzado cuando la carga sobre cualquier punto del sifón es mayor de 4 metros.

El diseño de estas estructuras, que, generalmente, se construyen de sección circular, se realiza como el de una tubería, teniendo en consideración las pérdidas de carga que ocurran en todo el trayecto del sifón.

La pérdida total de carga de un sifón es igual a las pérdidas de carga a la entrada, más las pérdidas por fricción a lo largo del sifón, más la carga de velocidad, más las pérdidas de carga a la salida. Estos valores se determinan como se explicó en el capítulo correspondiente al flujo de agua en tuberías.

El diseño de un sifón se ilustra a continuación con un ejemplo.

$$Q = 200 \text{ l/seg.}$$

Elevación de la entrada de 100.5 m

" " " salida " 99.0 m

Velocidad del agua en el canal = 1.5 m/seg

Determinese el diámetro de la tubería de concreto ($n = 0.014$). Ver la Fig. N° 11.

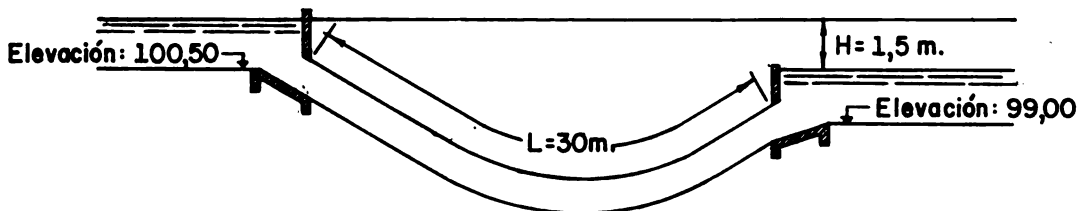


Figura N° 11

Este problema se resuelve por medio de tanteos consecutivos, como se explica a continuación:

1. Usando la fórmula de Manning, u otra fórmula apropiada calculamos el diámetro de la tubería asumiendo que toda la carga disponible se usará para producir el flujo de agua.

$$Q = \frac{0.3135}{n} d^{8/3} s^{1/2}$$

Para $n = 0.014$; $S = 0.05$ y $Q = 0.200 \text{ m}^3/\text{seg.}$

$$d = \left(\frac{0.200}{4.98} \right)^{3/8} = 0.3 \text{ m}$$

$$A = \frac{3.14 \times 0.3^2}{4} = 0.07 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.200}{0.07} = 2.87 \text{ m/seg.}$$

$$\text{Carga de velocidad} = h_v = \frac{2.87^2}{19.2} = 0.43 \text{ m.}$$

2. Ahora pueden valorarse las pérdidas de carga a la entrada y a la salida del sifón, usando las fórmulas del capítulo sobre Flujo de Agua en Tuberías.

$$h_e = 0.1 \frac{(2.87)^2 - (1.5)^2}{19.62} = 0.031 \text{ m.}$$

$$h_s = 0.2 \frac{(2.87)^2 - (1.5)^2}{19.62} = 0.062 \text{ m.}$$

3. Substrayendo los valores de h_e y h_s de la carga total disponible, obtendremos un valor neto de h igual a:

$$1.5 - 0.062 - 0.031 = 1.41 \text{ m.}$$

El valor de S se reduce así a:

$$\frac{1.41}{30} = 0.047$$

Con este valor se vuelve a calcular la velocidad para determinar nuevamente los valores de h_e y h_s , y el proceso se repite hasta cuando la suma de todas las pérdidas (h_s , h_e y h_f) sea igual a la carga total disponible, o sea, la diferencia de nivel del agua en el punto de entrada y el punto de salida. Repitiendo estas operaciones se encontró:

$$\begin{array}{r} h_s = 0.055 \\ h_e = 0.027 \\ h_f = 1.39 \\ \hline \text{Total} = 1.472 \text{ m.} \end{array}$$

que es suficientemente aproximado para el trabajo.

4. El diámetro de la tubería de concreto necesario será de 0.30 m. Los cálculos anteriores se simplifican notablemente cuando se usan tablas o diagramas para la solución de la fórmula de Manning, o de otra fórmula adecuada para el caso, como la fórmula de Scobey, cuya solución se encuentra en el nomograma de la Fig. N° 3 del capítulo sobre Flujo del Agua en Tuberías.

En el ejercicio anterior se ha omitido considerar las pérdidas ocurridas por el cambio de dirección de la tubería, debido a que se trata de una curva suave. Cuando ocurran curvas más pronunciadas, la pérdida o pérdidas se calcularán como se

explicó en el capítulo sobre Flujo del Agua en Tuberías y se procede a resolver el problema de la misma manera que se indicó anteriormente.

Las obras de transición a la entrada y a la salida pueden dimensionarse en forma adecuada, como se indica en la Fig. N° 12.

Tomas Laterales en Canales.

Las tomas laterales son estructuras que se ejecutan para derivar agua de los canales. En ocasiones se hacen abiertas y entonces se diseñan como las cajas de división, discutidas anteriormente. En otros casos, estas tomas se hacen por medio de tubos que atraviesan los bancos del canal, como se ilustra en la Fig. N° 13. En estos casos, la estructura se diseña como un tubo, en donde ocurren pérdidas de carga a la entrada y pérdidas por fricción a lo largo del tubo.

Ejemplo.- Determinese el diámetro de la tubería de concreto necesaria en una obra de toma lateral, como la que se ilustra en la Fig. N° 13, teniendo la siguiente información:

Altura del agua sobre la entrada = 0.90 m.
 Altura del agua sobre la salida = 0.80 m.
 Gasto máximo que se derivará.... = 50 lts/seg.
 Longitud del tubo = 5 m.

Solución: Este ejercicio se resuelve, por medio de tanteos consecutivos, en la forma siguiente:

- 1) Se asume que toda la carga disponible se perderá por fricción. Usando, entonces, la fórmula de Manning u otra fórmula adecuada, se calculará el diámetro de la tubería nece-

saría:

$$d^{8/3} = \frac{Q_n}{0.3135 S^{5/4}}$$

$$Q = 0.05 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$n = 0.014$$

$$S = 0.10/5 = 0.02 \text{ m/m.}$$

$$d = \left(\frac{0.05 \times 0.014}{0.3135 \times (0.02)^{5/4}} \right)^{3/8} = (0.0157)^{3/8} = 0.21 \text{ m.}$$

2) Se calcula la velocidad v :

$$A = 0.786 (0.21)^2 = 0.0354 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.05}{0.0354} = 1.41 \text{ m/seg.}$$

3) Con este valor se calculan las pérdidas de carga a la entrada:

$$h_e = 0.5 \frac{v^2}{2g} = \frac{0.5 \times 1.41^2}{19.62} = 0.051 \text{ m.}$$

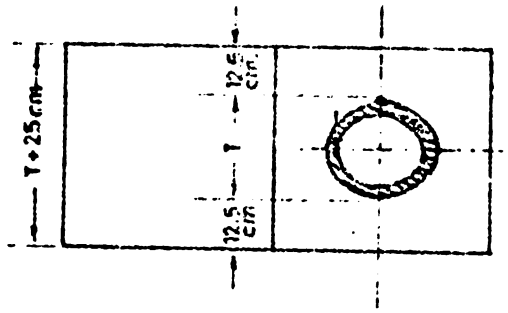
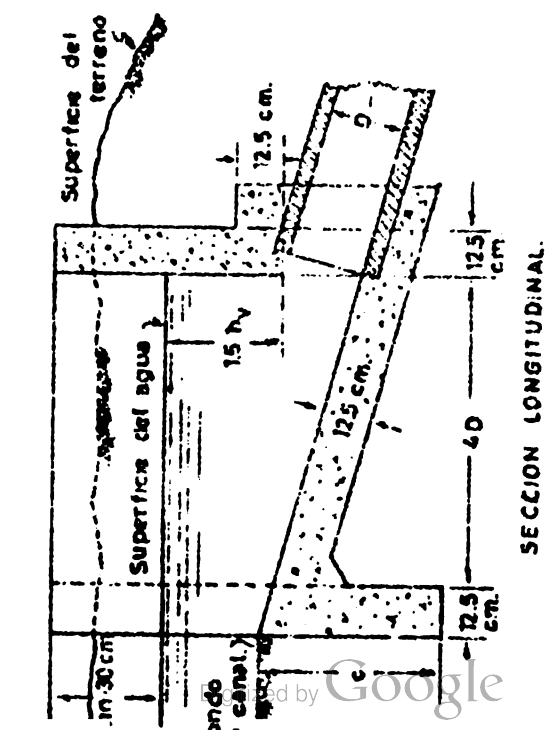
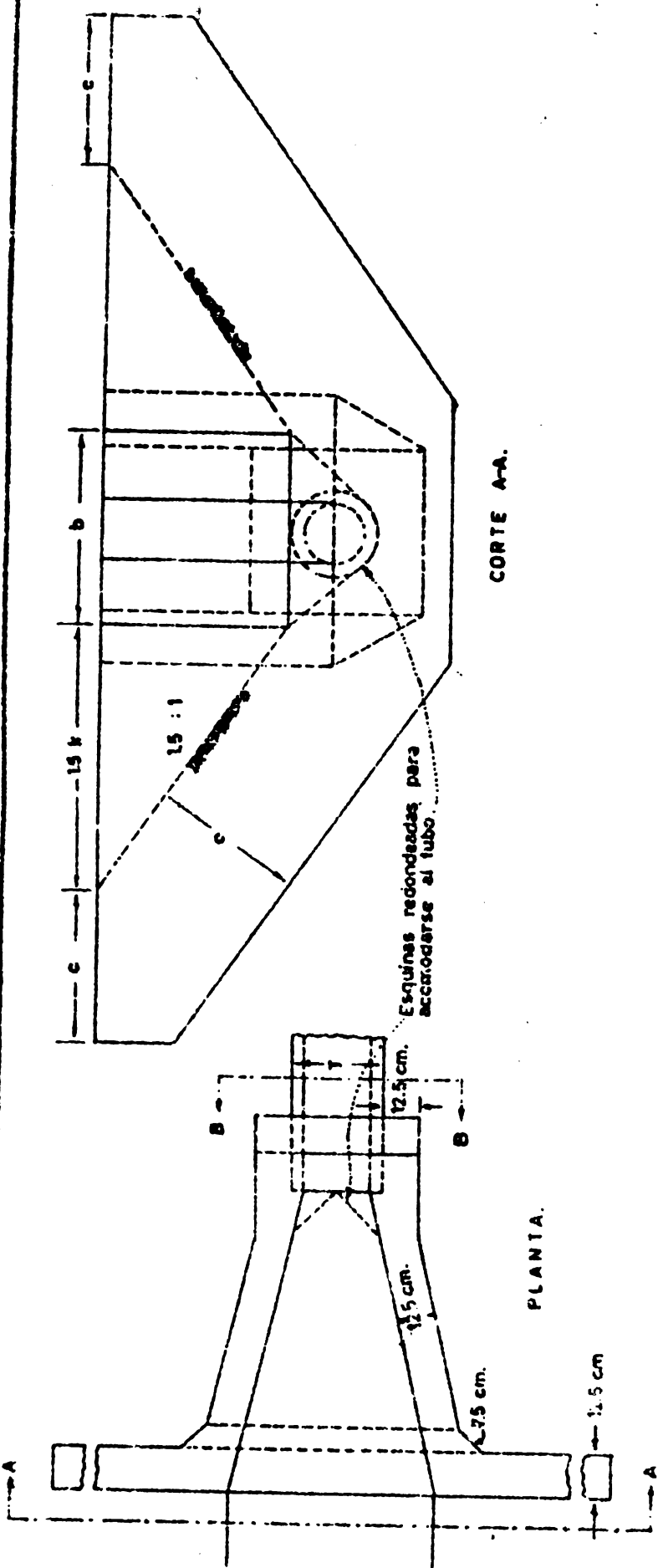
4) Restando el valor de h_e de la carga total disponible, obtendremos un valor neto para h .

$$h = 0.10 - 0.051 = 0.049 \text{ m.}$$

5) El nuevo valor de S para el cálculo del diámetro de la tubería será:

$$\frac{0.049}{5} = 0.0098 \text{ m/m}$$

$$d = \left(\frac{0.05 \times 0.014}{0.3135 \times (0.0098)^{5/4}} \right)^{3/8} = (0.02238)^{3/8} = 0.24 \text{ m.}$$



NOTA :

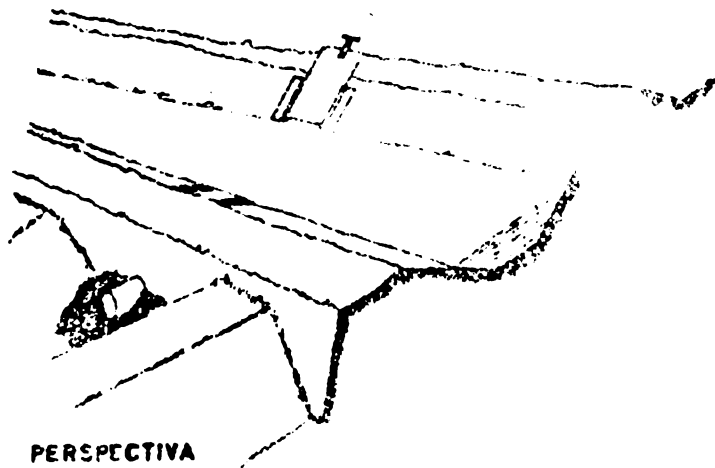
Para $Q < 80$ lts/seg. $c = 35$ cm

Para $Q > 80$ " " " " $c = > 45$ cm.

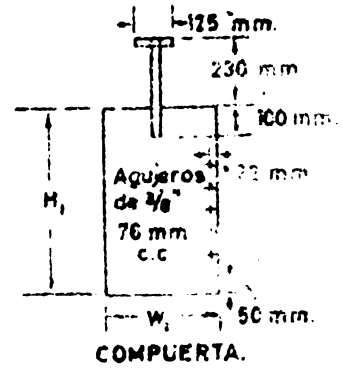
$h_v =$ Carga de velocidad en la tubería $= \frac{(V_t)^2}{2g}$

FIG. N° 12. ESTRUCTURA DE ENTRADA Y SALIDA PARA TUBERIAS.

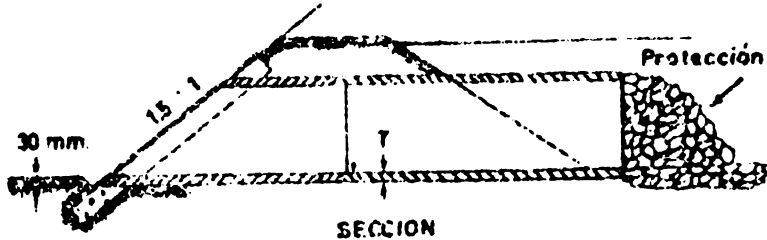
Adaptado de Ref. 9.



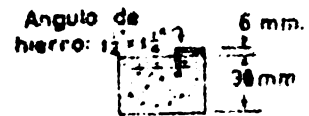
PERSPECTIVA



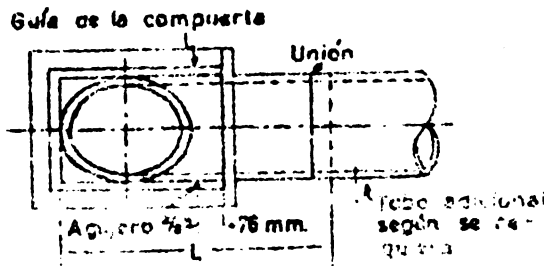
COMPUERTA.



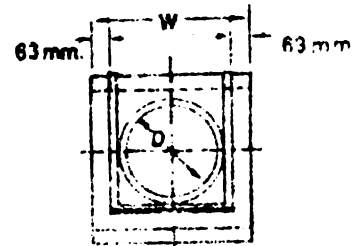
SECCION



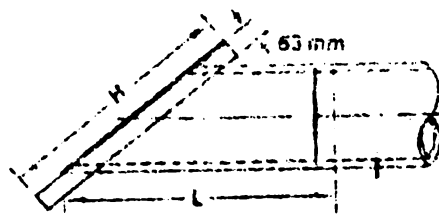
DETALLE DE LA GUIA



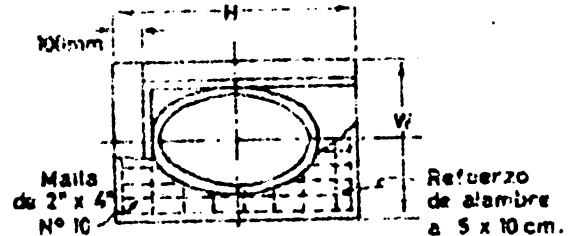
PLANTA



ELEVACION POSTERIOR



ELEVACION LATERAL.



VISTA NORMAL AL TALUD.

DIMENSIONES.

TUBERIA		MURO		COMPUERTA			CANTIDAD DE MATERIALES			CAPACIDAD
D	L	H	W	H ₁	W ₁	Lam. N°	Concreto m ³	Malla 2"x4" N° 10 - cm	Compuerta Peso - Kg.	Lts/sg
cm.	cm.	cm.	cm.	cm.	cm.					
6"	90	55	45	35	30	18	0.020	60 x 40	1.3	20 a 30
8"	90	65	45	45	30	18	0.025	60 x 40	1.7	34 a 50
10"	90	75	55	55	40	18	0.030	70 x 50	2.7	45 a 70
12"	90	85	55	65	40	18	0.040	80 x 50	3.8	70 a 90

6) Se calcula la velocidad v :

$$A = 0.786 (0.24)^2 = 0.0453 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.05}{0.0453} = 1.12 \text{ m/seg.}$$

7) Las pérdidas a la entrada con esta nueva velocidad serán iguales a:

$$h_e = \frac{0.5 \times (1.12)^2}{19.62} = 0.0321$$

$$0.0321 + 0.049 = 0.0811 < 0.1$$

8) La nueva carga disponible para pérdidas por fricción será, entonces, de:

$$0.1 - 0.0321 = 0.0679 \text{ m.}$$

9) El diámetro se calculará así, nuevamente, como se indica a continuación:

$$s = \frac{0.0679}{5} = 0.01358 \text{ m/m.}$$

$$d = \left(\frac{0.05 \times 0.014}{0.3135 \times (0.0136)^{1/2}} \right)^{3/8} = (0.0192)^{3/8} = 0.226 \text{ m.}$$

$$A = 0.786 \times (0.226)^2 = 0.04 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.05}{0.04} = 0.0125 \text{ m/seg.}$$

$$h_e = 0.5 \times \frac{(0.0125)^2}{19.62} = 0.0318$$

$$h_t = 0.0318 + 0.0679 = 0.0997 = 0.1$$

0, sea, un diámetro de 0.23 m. será adecuado.

R E F E R E N C I A S

- 1) ADDISON, H. . . . A Treatise on Applied Hydraulics. London Chapman and Hill Limited. 1948. 614 P.
- 2) BINGHAM, G.H. and MONSON, O.W. Irrigation Structures and Equipment. Montana State College. Bulletin N° 180. 1939. 67 P.
- 3) CURRY, A.S. Irrigation Structures and Implements. New Mexico State College. Extension Circular 92. 1944. 51 P.
- 4) ETCHEVERRY, B.A. and HARDING, S.T. Irrigation Practice and Engineering, Vol. I. New York. McGraw Hill Book Co. Inc. 1933. 256 P.
- 5) FREVERT, R.K. and others. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor. Edwards Brothers Inc. 1953.
- 6) JOHNSTON, C.N. Farm Irrigation Structures. University of California. Circular 362. 1945. 59 P.
- 7) MORRIS, B.T. and JOHNSON, D.C. Hydraulic Design of Drop Structures for Gully Control. Am. Soc. Civil Engrs. Proc. 68: 17-48. 1942.
- 8) PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Concrete Irrigation Structures for Farm Ditches. P.C.A. CP45. 1945. 4 P.
- 9) UNITED STATES DEPARTMENT OF INTERIOR - BUREAU OF RECLAMATION. Irrigation Advisers' Guide. U.S. Bureau of Reclamation. 1951. 216 P.
- 10) U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. Engineering Handbook. Region III. Milwaukee. 1942. (Mimeógrafo).

NIVELACION DE TIERRAS PARA RIEGO

La nivelación de tierras para el riego ha venido practicándose desde hace mucho tiempo en escala limitada, pero sólo en los últimos años esta práctica ha ganado importancia en la mayor parte de las zonas irrigadas del mundo. La escasez de agua, que se produce a medida que se aumentan las áreas de cultivo; el costo cada vez mayor del agua de riego debido al aprovechamiento de fuentes de abastecimiento cada vez más distantes o de más difícil captación; el incremento continuo en el valor de la tierra y la necesidad de intensificar la producción agrícola para competir adecuadamente en los mercados; han creado la necesidad de aprovechar más eficientemente las existencias de agua disponibles.

Las nivelación de las tierras permite una mejor distribución del agua de riego y asegura un mejor control de ella, lo cual se traduce en cosechas más uniformes, en menor costo de aplicación del agua, y en mayores rendimientos económicos. Para conseguir estos resultados, sin embargo, se requiere un planeamiento cuidadoso del trabajo de nivelación, para realizarlo, solamente, cuando las condiciones locales lo justifiquen y cuando el costo del movimiento de tierra no sobrepase las utilidades adicionales que puedan derivarse del mismo.

Usualmente los trabajos de nivelación de tierras para el riego implican un alto costo inicial, pero en muchas ocasiones este costo se amortiza rápidamente con los provechos adicionales que se obtienen, si el trabajo ha sido cuidadosamente planeado y ejecutado.

Limitaciones de la Nivelación.

Prácticamente todas las tierras agrícolas bajo riego son susceptibles de mejorarse por medio de la nivelación, pero an-

tes de iniciar un trabajo de esta naturaleza debe establecerse si las tierras son o no aptas para la aplicación del agua por métodos superficiales de riego. Como se explicó en el capítulo sobre Riego por Aspersión, existen condiciones especiales de suelo y de topografía que hacen más deseable el empleo de este método de riego. Tales condiciones (Ref. 5) pueden resumirse en la forma siguiente:

1. Suelos con un alto índice de infiltración que, por esta causa, dificultan o hacen imposible la aplicación del agua por métodos superficiales.
2. Suelos de escasa profundidad, donde cortes muy ligeros traerían a la superficie materiales impropios para el cultivo.
3. Suelos con una topografía muy accidentada, que harían excesivamente costoso el trabajo de nivelación.
4. Suelos con pendientes excesivas, mayores del 10%, donde la magnitud de los cortes produciría condiciones impropias para la agricultura y costos muy elevados para el movimiento de tierras.
5. Una napa de agua demasiado alta, que podría crear problemas de desagüe.
6. La disponibilidad de un caudal de agua muy escaso.

Tipos de Nivelación.

Aún cuando resulta un poco difícil establecer una clasificación de los trabajos de nivelación de tierras para el riego, debido a las muy variadas condiciones que pueden presentarse en la práctica, se han propuesto seis categorías o clases de nivelación, según la magnitud de los cortes y según la forma que se dé al relieve de los campos. Las seis clases mencionadas

(Ref. 1) pueden describirse en la forma siguiente:

Clase 1.- Dentro de esta categoría se incluyen aquellos trabajos que sólo emparejan el micro-relieve, suavizando las ondulaciones del campo. Este tipo de nivelación no asegura, por lo general, una distribución uniforme del agua de riego y se ejecuta, generalmente, como un paso previo para una nivelación posterior más completa.

Clase 2.- Esta clase de nivelación consiste en nivelar el terreno con una pendiente uniforme en una sola dirección, establecida por la pendiente natural del terreno. Este trabajo impone a veces pendientes excesivas en la dirección del riego y en sentido transversal, o impone el cultivo irregular de los campos. Se realiza cuando los fondos disponibles no permiten trabajos más adecuados.

Clase 3.- Esta clase consiste en nivelar el terreno en una sola pendiente longitudinal, eliminando las pendientes transversales. En algunos casos la pendiente dada es excesiva y puede producir erosión, a menos que se usen bajos caudales de agua y surcos o melgas muy cortos.

Clase 4.- Esta clase es similar a la anterior, pero con la pendiente longitudinal suficientemente reducida para permitir un riego normal sin que se produzca erosión del suelo.

Clase 5.- Esta clase es también denominada nivelación a cero, por cuanto elimina completamente la pendiente del terreno. Se emplea cuando los terrenos no presentan problemas de drenaje; cuando los suelos son muy permeables y cuando es necesario lavar del suelo algún exceso de sales solubles.

Clase 6.- Esta clase corresponde a la nivelación en terrazas y se usa, generalmente, cuando la pendiente natural del

terreno está entre 1.0 y 5.0 por ciento. En estos casos la diferencia de nivel entre dos terrazas consecutivas debe ser menor que 0.60 metros. Cuando las terrazas se hacen muy amplias, los cortes aumentan considerablemente, haciendo muy costoso el trabajo de nivelación.

La selección de la clase de nivelación está, principalmente, subordinada a la topografía y a la pendiente del terreno, al costo del trabajo, a la disponibilidad de fondos, al método de riego que habrá de usarse, y a la retribución económica que pueda esperarse como consecuencia de la nivelación.

Estudios Preliminares.

Los estudios preliminares necesarios para el planeamiento de una nivelación, se pueden resumir en la forma que se indica a continuación.

Método de Riego que habrá de usarse.- El método de riego que habrá de usarse estará principalmente determinado por la clase de cosecha que va a cultivarse, por la naturaleza del suelo y por la disponibilidad de agua en el fundo. El método de riego y la naturaleza física del suelo, así como la disponibilidad de agua, determinan a su vez la longitud de los campos en el sentido de la pendiente, la inclinación longitudinal de los campos, y la pendiente transversal que puede tolerarse. El capítulo sobre Métodos de Riego y especialmente la tabla N° 3 de dicho capítulo, establecen las condiciones y las limitaciones de los distintos métodos de riego, y permiten fijar hasta cierto punto, las características que debe satisfacer el trabajo de nivelación que se proyecta.

Tiempo propicio para la nivelación.- Los trabajos de nivelación son obras más o menos demoradas, según el volumen del movimiento de tierras y según la clase y la capacidad del equipo que se utilice para

realizarlo. La operación del equipo se reduce notablemente cuando el tiempo es lluvioso, debido a la interferencia de las lluvias y a la reducción en la eficiencia de operación de las máquinas cuando trabajan sobre terrenos húmedos.

Por estas razones será conveniente que el trabajo se ejecute en tiempo seco, lo cual requiere un estimativo previo de la duración del trabajo, en función del equipo disponible para realizarlo. Cuando se opera con traillas de tamaño medio el rendimiento promedio para las varias clases de nivelación es de unas 2 hectáreas por día (Ref. 5). Cuando el trabajo no puede realizarse todo en una estación, será necesario planear su ejecución por etapas.

Desmonte o Roza del Terreno.— Cuando el terreno que va a nivelarse está cubierto por alguna vegetación natural, resultará necesario hacer el desmonte antes de iniciar el levantamiento topográfico, si la vegetación es de tipo arbóreo o arbustiva, y, en cualquier caso, antes de iniciar el trabajo de nivelación. La presencia de alguna vegetación sobre el terreno, impide al operador del equipo de nivelación observar las estacas del terreno para orientarse en la ejecución de los cortes y los rellenos. Por otra parte, la vegetación dificulta la operación de las máquinas niveladoras y puede producir falsos rellenos.

Levantamiento Topográfico.— El levantamiento topográfico puede realizarse por medio de cualquier método standard que produzca un mapa topográfico básico del área que se estudia. Sin embargo, cuando el levantamiento se realiza para ejecutar una nivelación precisa del terreno, inmediatamente después del levantamiento conviene estudiar el proceso que se explica a continuación:

1. **Estacado del campo.**- Para estacar el campo deben localizarse en el terreno dos líneas normales entre sí, que correspondan en forma aproximada con dos lados del campo. Estas constituirán las líneas básicas, sobre las cuales se colocarán estacas cada 20 metros, fijando así los puntos que luego permitirán completar el cuadrícula del campo, colocando estacas en las intersecciones de las líneas normales que pasen por dichos puntos. La Fig. N° 1 ilustra este procedimiento de estacado.

Otro procedimiento, que a veces resulta más expedito, se ilustra en la Fig. N° 2. Allí se han trazado primero, en forma consecutiva, las siguientes líneas AB, CD, EF y GH, con una distancia entre las líneas paralelas de unos 60 ó 100 metros. Estas líneas son luego estacadas cada 20 metros, quedando el campo dividido en 6 áreas, que luego se estacan a 20 metros, por medio de visuales simultáneas dadas entre las estacas ya localizadas.

Cuando el movimiento de tierras va a realizarse inmediatamente después del levantamiento, resultará conveniente usar estacas largas de 2" x 1/2" x 1.20 m. clavadas firmemente para que sean usadas posteriormente como guía del operador en la ejecución de los cortes y de los rellenos, como se explicará más adelante.

En trabajos pequeños, o de poca precisión, no será necesario el estacado total del campo, en cuyo caso las líneas básicas sirven para determinar los puntos de lectura de mira, por medio de dos visuales simultáneas.

Una vez concluido el estacado, será conveniente designar las estacas por medio de números en una dirección y letras en la dirección normal, a fin de poder localizarlos con facilidad (Ver Fig. N° 1).

2. Acotamiento y dibujo.— El levantamiento topográfico se inicia luego con nivel de precisión, el cual debe armarse en un punto estratégico del campo, de tal manera que pueda tomarse la elevación del mayor número de estacas posible con una sola armada del aparato. La primera lectura será una vista más (V_+) tomada sobre un punto de referencia (PR) fijo, al cual se le asigna una altura convencional. En adelante se procederá a tomar vis-tas menos (V_-) sobre cada uno de los puntos marcados por las estacas. El trabajo se continúa hasta agotar todas las lecturas de mira posibles desde la primera armada y luego se traslada el aparato hasta otra posición, escogiendo un punto de cambio (PC) para continuar el levantamiento, en la forma indicada anteriormente.

La Fig. N° 3 ilustra el procedimiento indicado y los cómputos necesarios para obtener las cetas correspondien-tes.

La precisión de las lecturas depende del grado de precisión deseado, pero, generalmente, es suficiente una aproximación al centímetro para las lecturas de las esta-cas, y una aproximación al milímetro para los puntos de cambio.

La mira debe colocarse de tal manera que las lectu-ras correspondientes permitan obtener un plano topográfico que represente la configuración real del terreno. Aún cuando, por regla general, debe colocarse siempre en el punto indicado por la estaca, en ocasiones será necesario desplazarla un poco de dicho punto para evitar un montículo o una depresión pequeños, de poca significación en el con-junto. La mira se coloca sobre el terreno en su condición natural, pero cuando éste ha sido arado o rastrillado pre-viamente, es conveniente compactar un poco con el pie, el punto de colocación.

El registro de las lecturas de mira y los cálculos correspondientes, pueden realizarse en una libreta de campo de tipo corriente, en cuyo caso las estaciones se identifican de acuerdo con los números y las letras que correspondan a cada estación. En trabajos de nivelación de este tipo, sin embargo, resulta más conveniente hacer los registros directamente sobre papel cuadrículado, papel éste que servirá luego para dibujar en él mismo la topografía del terreno. En este caso, los registros pueden hacerse en la intersección de las líneas de cuadrícula, como se indica en la Fig. N° 4. Una hoja de papel milimetrado montada sobre un tablero de dibujo es muy adecuada para esta clase de trabajos. En ella puede usarse una escala de 1 en 1000, lo que dará cuadrículas en el papel de 20 x 20 milí-

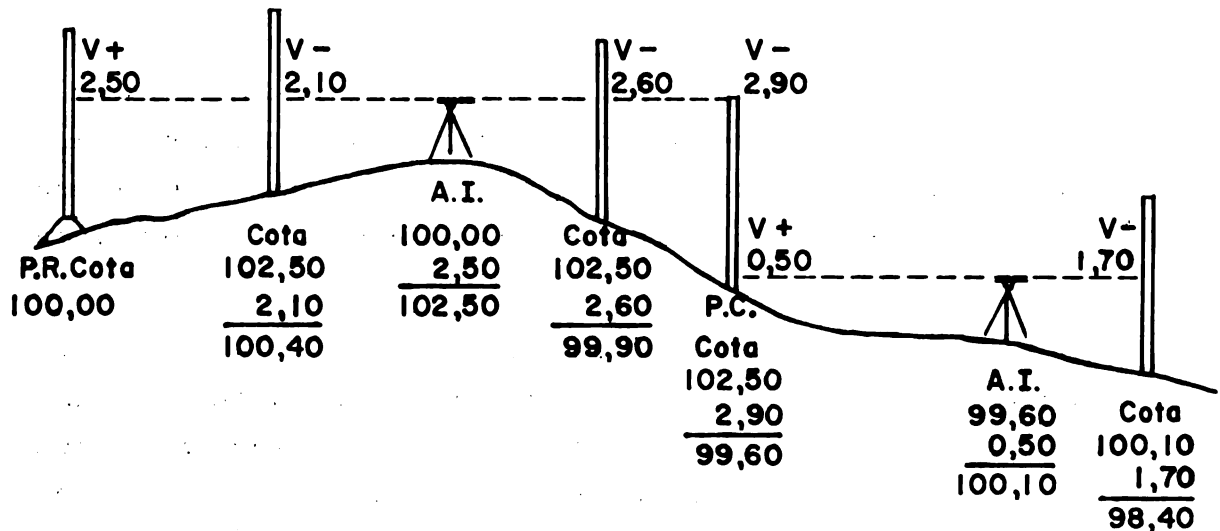


Figura N° 3

metros correspondientes a las cuadrículas de 20 x 20 metros, del terreno.

Cota Original	Lectura de mira
Cota Calculada	Corte o Terraplén

Figura N° 4

Las curvas de nivel se dibujan por interpolación visual aproximada y la distancia vertical entre las curvas puede seleccionarse de manera tal que se produzca una representación real de la configuración del terreno, sin comprometer la claridad del dibujo. La siguiente relación puede servir de guía para establecer el intervalo vertical entre las líneas de contorno:

$$\text{Int. vert. en cm.} = \text{Pendiente en } \% \times 10$$

El plano topográfico debe incluir los caminos interiores del fundo, la localización de los cercos existentes y la posición de la fuente de abastecimiento de agua.

Información sobre Suelos.- Mientras se ejecuta el levantamiento topográfico, será conveniente obtener alguna información sobre las características físicas de los suelos que van a nivelarse, su profundidad y las características de su perfil. Esta información será más adecuada cuando se dispone de un plano agrológico del campo que va a nivelarse.

Métodos de Riego y Areas de Nivelación Separada.— Con el plano topográfico que se ha ejecutado y con la información agrológica obtenida, se procederá a seleccionar los métodos de riego que van a emplearse de acuerdo con las especificaciones de cada método, según se resumen en la tabla N° 3 del capítulo sobre Métodos de Riego, y se planeará el sistema de distribución que tendrá el fundo en el futuro.

También será conveniente dividir el campo en secciones de nivelación separada, cuando el terreno es muy grande y cuando la topografía es irregular, o cuando la clase de nivelación necesaria es diferente.

Los factores que deben considerarse para hacer la división del campo, pueden resumirse en la forma siguiente:

1. Cambios de pendiente, indicados por la proximidad o distanciamiento de las curvas. En estos casos la línea divisoria entre los lotes debe trazarse a lo largo de la zona en que ocurre el cambio de pendiente.
2. Cambios en la dirección de la pendiente, lo que hará necesario cambiar la dirección del riego.
3. Pendientes uniformes muy planas o muy inclinadas en extensiones grandes, donde será conveniente dividir el área de acuerdo con la máxima longitud de los surcos o las melgas necesarias.
4. Areas con topografía muy irregular, que hace difícil establecer una separación adecuada para los campos de riego.
5. Areas con pendientes muy pronunciadas, que no son propias para el riego por métodos superficiales.

La finalidad de estas divisiones es reducir la profundidad de los cortes y el movimiento de tierra para asegurar un trabajo más económico.

La figura N° 5 ilustra la manera de realizar estas

divisiones.

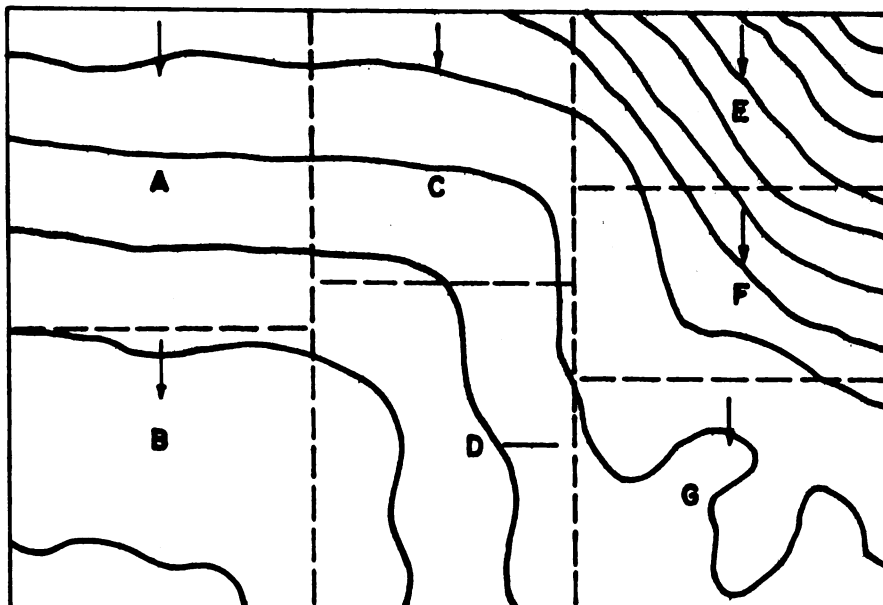


Figura N^o 5

Cuando sea necesario, dentro del sistema de distribución, construir acequias sobre terraplenes, será conveniente indicar en el plano la localización de estas acequias y prospectar dichos terraplenes a lo largo de las acequias correspondientes. Una faja de 0.30 a 0.50 metros de alto por 3 ó 5 metros de ancho, según el tamaño de la acequia, es usualmente satisfactoria para la mayoría de las acequias internas de un fundo.

Diseño de la Nivelación y Cálculo del Movimiento de Tierra

Al diseñar la nivelación de un campo para riego se desea dar al terreno una pendiente predeterminada, según las condiciones del suelo, según el método de riego que vaya a emplearse y según la clase de nivelación que se haya escogido, o que sea

posible. El objetivo del diseño es satisfacer los requisitos de pendiente necesarios, produciendo el mínimo movimiento de tierra y de manera tal que los cortes satisfagan los rellenos necesarios.

Para cumplir este objetivo hay varios métodos, que pueden denominarse en la forma siguientes:

1. Método de los perfiles simples.
2. Método de los perfiles dobles.
3. Método de las cuadrículas compensadas.
4. Método del centroide.

Los tres primeros se discutirán brevemente y el cuarto se explicará de manera detallada, por ser relativamente simple y fácil de aplicar a cualquier condición de los terrenos.

Método de los Perfiles Simples. - Este método consiste en tomar una serie de perfiles equidistantes del terreno, en cada uno de los cuales se proyecta una rasante con la pendiente deseada, en forma tal que los cortes y los rellenos queden balanceados. Cada uno de estos perfiles, se asume representativo de la faja de terreno que atraviesa. Las fajas tienen un ancho igual a la distancia entre los perfiles. El procedimiento que debe seguirse para diseñar la nivelación se resume a continuación (Ref. 6).

1. Se toman perfiles paralelos al sentido del riego que se dará al campo. Estos perfiles, generalmente, se trazan a lo largo de cada línea de estacas, de tal manera que en un terreno levantado con cuadrículas de 20 x 20 metros, la distancia entre los perfiles será de 20 metros.
2. Luego se trazan rasantes tentativas a lo largo de estos perfiles, procurando en cada caso que los cortes satisfagan los rellenos. La pendiente de las rasantes no tendrá que ser uniforme en toda su longitud, pero debe satisfacer

los requisitos impuestos por los métodos de riego que se hayan adoptado.

3. Las cotas de estas rasantes son luego usadas para dibujar perfiles transversales, a fin de verificar si la pendiente transversal del terreno satisface los requerimientos de la clase de nivelación y del método de riego adoptados.
4. El trabajo se continúa a base de tanteos regresando al numeral 2, en caso de que la verificación realizada en el numeral 3 no sea satisfactoria.
5. Las diferencias de cotas entre los perfiles originales y sus correspondientes rasantes representan los cortes o los rellenos necesarios.
6. La suma de los cortes en cada estación de 20 metros, multiplicada por el área de una cuadrícula, representa el volumen total de corte. Este volumen debe ser entre un 10 y un 30 por ciento mayor que el volumen de relleno necesario.

Este método es un poco elaborado por razón de los tanteos necesarios, especialmente en terrenos muy irregulares y muy grandes. Tiene su mejor aplicación en terrenos de poca extensión y de topografía regular (Ver Fig. N° 6).

Método de los Perfiles Dobles.— Este método es similar al anterior, con la diferencia de que los perfiles longitudinales y transversales se ejecutan sobre el mismo plano, colocando a escala, sobre líneas inclinadas a 45°, en cada estación la cota del terreno correspondiente. Se produce, así, un plano de relieve que representa las tres dimensiones del terreno, como se muestra en la Fig. N° 7. El procedimiento a seguir en este método se explica a continuación:

1. Sobre los perfiles trazados como se indicó arriba, se trazan varias rasantes en ambas direcciones, para estudiar las pendientes generales que pueden darse al terreno y que encajen dentro de los límites establecidos por el método de

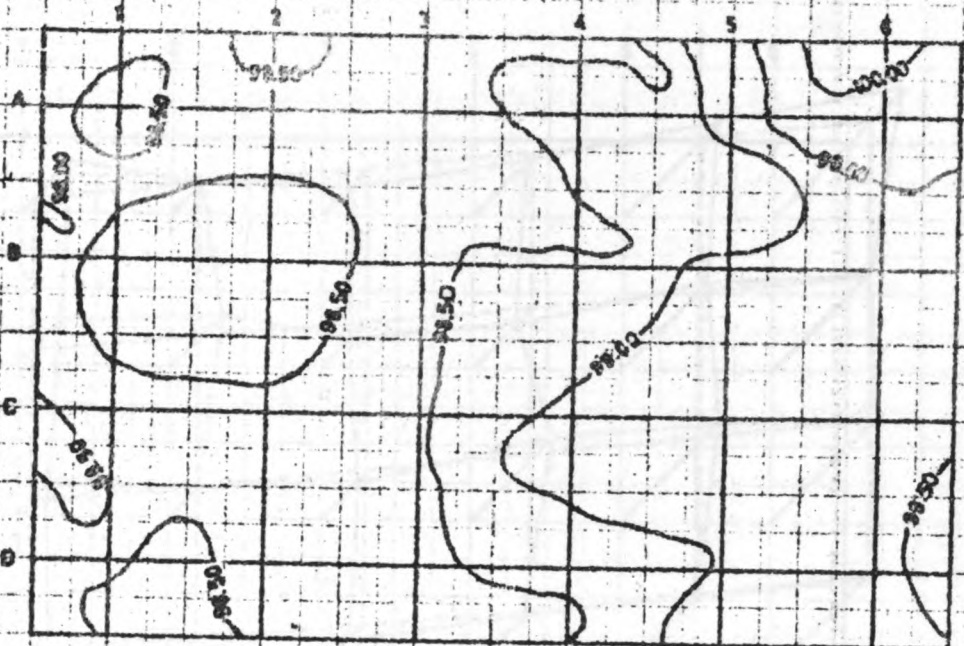
riego que vaya a usarse.

2. Una vez que se haya establecido la dirección que habrá de darse al riego, se procede a trazar rasantes tentativas en todos los perfiles en el sentido del riego y con la pendiente adecuada, procurando, al mismo tiempo, que las rasantes resultantes en el sentido transversal satisfagan los requisitos de pendiente necesarios en este sentido.
3. Los cortes y los rellenos se miden a escala y se computan en la misma forma que se indicó para el método anterior.

Este método, como el anterior, es bastante elaborado, aún cuando tiene la ventaja de presentar de manera muy aparente la configuración total del terreno, haciendo posible un estudio más claro del trabajo.

Método de las Cuadrículas Compensadas.- Este método, que consiste en compensar el corte que se haga en cada cuadrícula con el relleno necesario en otra, se ejecuta en la forma siguiente:

1. Se hace un estudio general del plano topográfico, tratando de localizar las zonas altas que requieren corte y las zonas bajas que requieren relleno, y tratando también de definir la dirección más conveniente de riego.
2. Luego se indican sobre el plano, cortes tentativos en las cuadrículas altas y rellenos tentativos en las áreas bajas, balanceados con dichos cortes. Este es un proceso de tanteo que se completa cuando, al verificar la nueva topografía dada al terreno, se obtienen las pendientes deseadas.
3. La suma de los cortes de cada cuadrícula, por el área de una cuadrícula, representa el volumen total de corte, el cual debe ser un 10 a un 30 por ciento mayor que el volumen de relleno necesario.



PLANO TOPOGRAFICO.
Escala: 1 cm = 25 m.

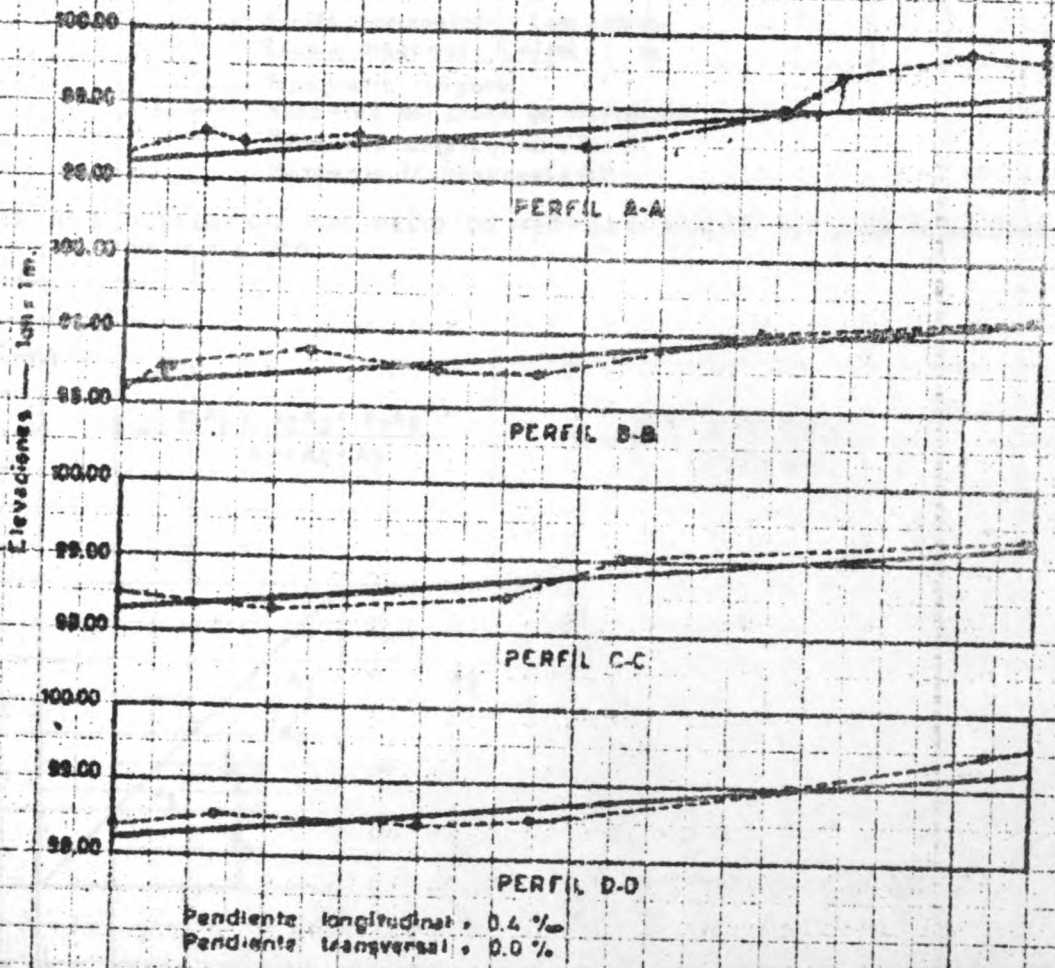
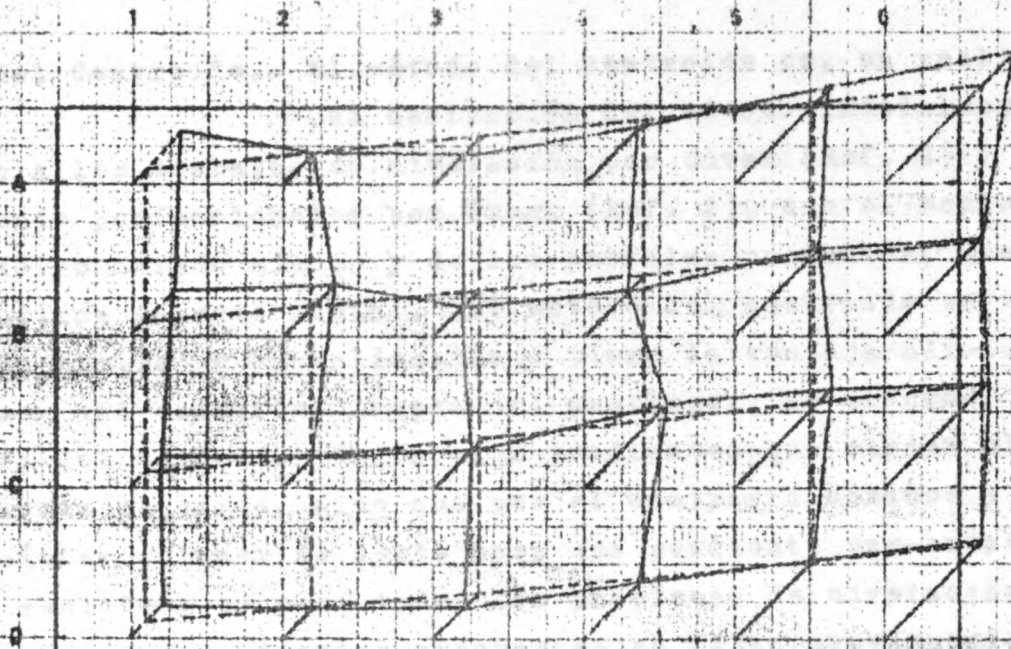


FIG. N° 6. NIVELACION POR MEDIO DE PERFILES SIMPLES.



Escala horizontal: 1cm = 25 m.
 Escala diagonal: 1.41cm = 1 m.

—— Topografía original.
 - - - - - Rasantes del plano de nivelación.
 Pendiente longitudinal = 0.4 %
 Pendiente transversal = 0.0

FIG. N° 2. NIVELACION POR MEDIO DE PERFILES DOBLES. Ver plano topográfico de la fig. N° 6.

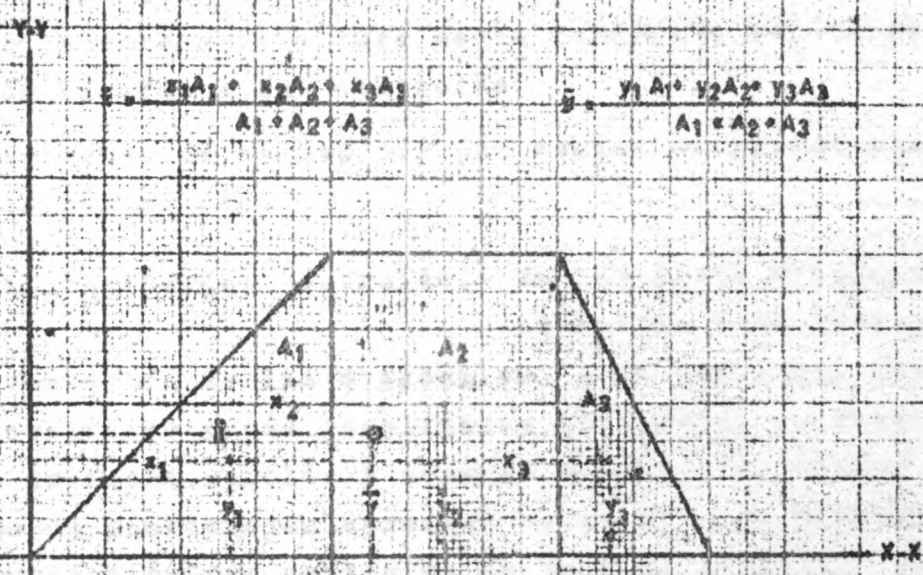


FIG. N° 3. DETERMINACION DEL CENTROIDE POR EL METODO DE LOS MOMENTOS.

Método del Centroide.- El método del centroide es, en realidad, una derivación del método inicialmente adaptado a los trabajos de nivelación por Givan (Ref. 4) y posteriormente perfeccionados por Chugg (Ref. 2), con el nombre de método del cuadrado mínimo y de los perfiles promedios, que no se discutirán en este manual. El método del centroide es relativamente simple en su aplicación y tiene la ventaja adicional de ofrecer una solución directa del problema. No produce, como el método del cuadrado mínimo, las pendientes que rinden el mínimo volumen de corte, sino que por el contrario conduce a obtener el mínimo volumen de corte para una pendiente pre-establecida. En realidad, en casi todos los problemas de nivelación para el riego, las pendientes necesarias se fijan previamente, en función del método de riego que se adopte y de las perspectivas económicas del trabajo de nivelación. Es por esto que el método del centroide ha encontrado una amplia aceptación entre los Ingenieros asociados con esta clase de trabajos.

El método consiste en hacer pasar un plano imaginario, con las pendientes longitudinal y transversal que se deseen, por el centro geométrico o centroide del área considerada. La intersección del plano imaginario con el terreno, en el centroide se produce teóricamente a la altura media ponderada del terreno, llamada también la altura del centroide.

A continuación se explica por etapas el procedimiento a seguir con dicho método:

1. **Localización del centroide.**- En las áreas rectangulares, el centroide está localizado en la intersección de las diagonales, y en las áreas irregulares el centroide puede localizarse dividiendo el área en secciones de forma regular y tomando momentos alrededor de dos ejes de coordenadas normales entre sí. La Fig. N° 8 ilustra la ubicación del centroide en un área irregular por el método de los momentos.

Cuando las áreas son muy irregulares, resulta mejor determinar la localización del centroide por medio del método gravimétrico, que consiste en cortar un cartón a escala con la misma forma del área que se considera y colgarlo en posición vertical desde dos o más de sus esquinas en forma sucesiva. Una plomada que tenga su origen en el mismo punto que sostiene al cartón pasará por el centroide del área, de tal manera que dos o más posiciones diferentes producirán sendas líneas rectas que interceptan en el centroide del área. Una vez localizado el centroide en el cartón se traslada al plano, usando la escala que corresponda. En la práctica, para facilitar los cálculos posteriores, el centroide se desplaza hasta la intersección más próxima de las líneas que limitan las cuadrículas.

Este método es muy práctico y sencillo y ha sido muy generalizado en esta clase de trabajos. La Fig. N° 9 ilustra el procedimiento que debe seguirse.

2. Determinación de la altura del centroide.- Para determinar la altura del centroide, el campo se divide en cuadrículas de tamaño uniforme y se asume que la altura de cada cuadrícula del terreno es la altura del centro de la misma. En esta forma la altura medio ponderada del campo, o sea, la altura del centroide, será la relación entre la suma de los productos del área de cada cuadrícula por su altura correspondiente, y la suma de las áreas de todas las cuadrículas. Expresado en una fórmula, esta relación tiene la forma siguiente:

$$H_c = \frac{\sum (h \times a)}{\sum a}$$

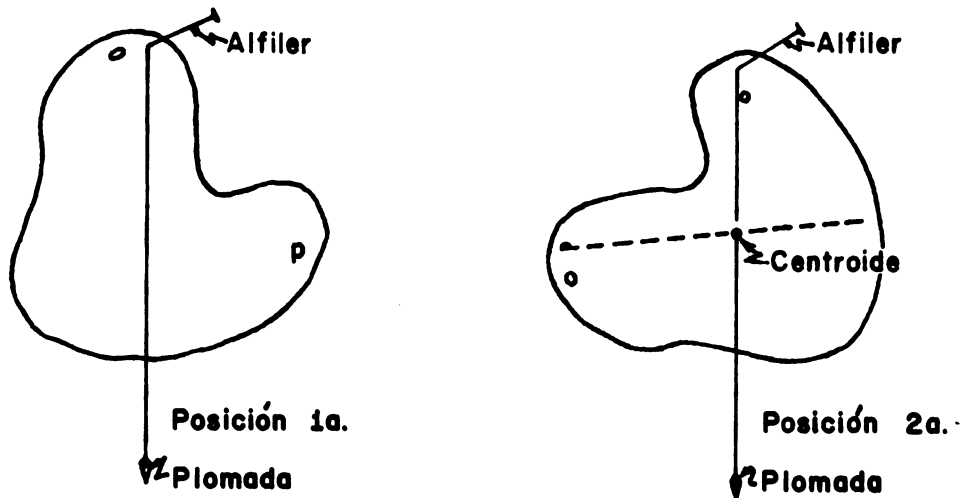


Figura N° 9

En la Fig. N° 9, la altura del centroide podría expresarse en la forma siguiente:

$$H_c = \frac{\sum (h \times a)}{\sum a} = \frac{h_1 \times A_1 + h_2 \times A_2 + \dots + h_{13} \times A_{13} + h_{14} \times A_{14}}{A_1 + A_2 + \dots + A_{13} + A_{14}}$$

Para evitar el uso de cifras con varios guarismos, lo que haría un poco elaborado el proceso, y debido a que la mayoría de las cuadrículas tienen un área igual, se acostumbra considerar a cada cuadrícula completa como una unidad, en tanto que las cuadrículas fraccionarias se incluyen en los cálculos, como una fracción de la unidad. En esta forma la altura del centroide en la Fig. N° 10 podría determinarse más fácilmente con la siguiente expresión:

$$H_c = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \frac{3}{4} h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + \frac{1}{4} h_8 + h_9 + h_{10} + \frac{5}{8} h_{11}}{8 + \frac{3}{4} + \frac{1}{4} + \frac{5}{8}}$$

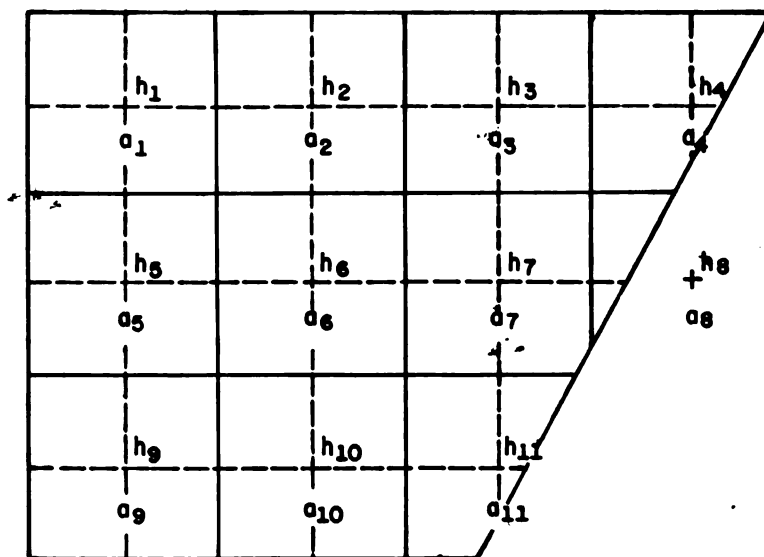


Figura N° 10

La altura del centroide así determinada, puede tener un ligero error, debido a que la altura del centro de cada cuadrícula puede no ser la altura media de dicha cuadrícula y también porque en las áreas marginales fraccionarias la altura de éstas no se toma en el centro de las mismas. El error, sin embargo, es muy pequeño, debido a que las cuadrículas se toman de áreas pequeñas, en relación con el área total, y porque los errores que se cometen al asumir la altura media de las cuadrículas igual a la altura media del punto medio de las mismas, es unas veces positivo y otras negativo, lo que tiende a reducir el error total.

3. Pendientes del plano.- Cualquier plano que pase por el centroide a la altura que se ha calculado

do, producirá un balance entre los cortes y los rellenos del campo. Resulta ahora necesario determinar las pendientes longitudinal y transversal que debe darse a dicho plano. Para esto pueden usarse dos criterios diferentes, según la topografía y la inclinación deseada y las limitaciones que imponga el método de riego adoptado. Estos dos criterios son: a) Darle al plano las pendientes longitudinal y transversal promedias del campo, o b) Darle al plano las pendientes impuestas por el método de riego que se ha adoptado.

El primer caso producirá el volumen mínimo de corte, pero sólo podrá aplicarse cuando las pendientes promedias resultantes caigan dentro de los límites tolerados por el método de riego que se adopte. El segundo caso produce cortes mayores, a medida que las pendientes del plano se alejan de las pendientes naturales promedias del terreno, pero es el criterio que debe primar si la finalidad de la nivelación es una máxima eficiencia en la aplicación del riego y riesgos mínimos de erosión.

Las pendientes promedias longitudinal y transversal, naturales del terreno, se obtienen como se indica en la Fig. N° 11.

De acuerdo con el método del cuadrado mínimo (Ref. 5) las pendientes que mejor se acomodan a los perfiles promedios longitudinal y lateral del campo, se obtienen por medio de la fórmula siguiente:

$$S = \frac{\sum (D \bar{h}) - \frac{(\sum D)(\sum \bar{h})}{n}}{\sum (D)^2 - \frac{(\sum D)^2}{n}}$$

Donde: S = Pendiente promedio del campo en sentido longitudinal (S_l) o transversal (S_t), según la dirección en que se tomen los factores de la fórmula.

D = Distancia normal desde el punto de origen (0) hasta la estación del perfil promedio que se considere.

h = Altura del campo en la estación considerada del perfil promedio.

n = Número de estaciones del perfil promedio considerado.

Para facilitar los cálculos, la longitud del lado de una cuadrícula se considera igual a la unidad y los ejes de las coordenadas se colocan a media unidad de distancia de los lados del área que se estudia.

En la Fig. N° 10, los valores de los distintos factores que entran en la fórmula anterior, son los siguientes:

$$\text{Pendiente promedio } N - S = S_t$$

$$\sum (D \bar{h}) = \frac{\sum h_o}{4} + \frac{2 \sum h_b}{4} + \frac{3 \sum h_a}{3}$$

$$\sum (D) = 1 + 2 + 3$$

$$\sum (\bar{h}) = \frac{\sum h_o}{4} + \frac{\sum h_b}{4} + \frac{\sum h_a}{3}$$

$$\sum (D)^2 = 1 + 4 + 9$$

$$\left(\sum D \right)^2 = (1 + 2 + 3)^2$$

$$n = 3$$

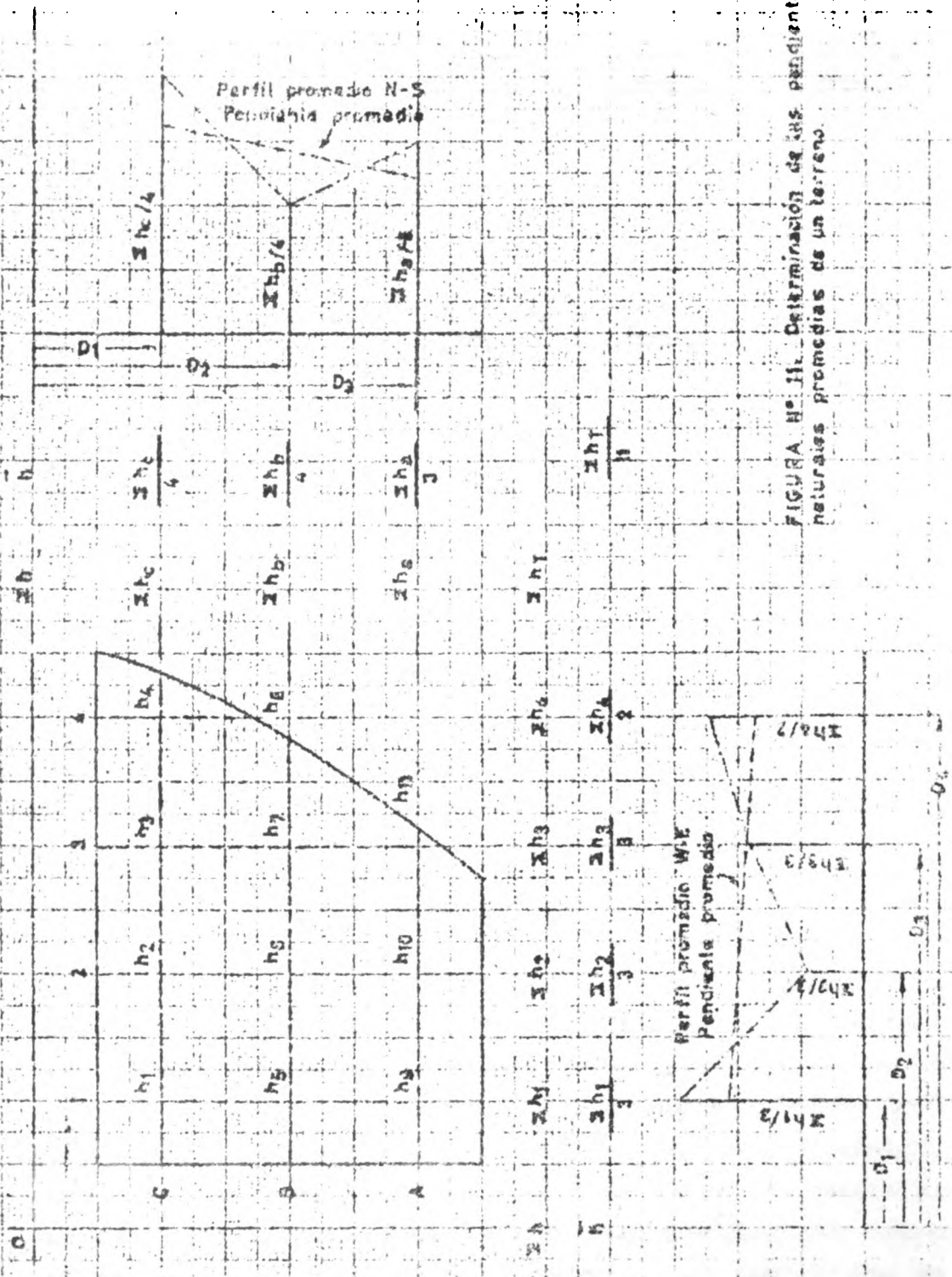


FIGURA No. III. Determinación de las pendientes naturales promedias de un terreno.

Pendiente promedio $W - E - S_1$

$$\sum (D \bar{h}) = \frac{\sum h_1}{3} + \frac{2 \sum h_2}{3} + \frac{3 \sum h_3}{3} + \frac{4 \sum h_4}{2}$$

$$\sum (D) = 1 + 2 + 3 + 4$$

$$\sum (\bar{h}) = \frac{\sum h_1}{3} + \frac{\sum h_2}{3} + \frac{\sum h_3}{3} + \frac{\sum h_4}{2}$$

$$\sum (D)^2 = 1 + 4 + 9 + 16$$

$$(\sum D)^2 = (1 + 2 + 3 + 4)$$

$$n = 4$$

Cuando las pendientes longitudinal y transversal del plano deban ser seleccionadas para satisfacer los requisitos del método de riego adoptado, se consultará la tabla N° 3 del capítulo sobre Métodos de Riego y se continúa el proceso.

4. **Altura del plano de nivelación.**— Cuando se discutieron los tres primeros métodos de nivelación se indicó la necesidad de que el volumen de corte sea entre un 10 y un 50 por ciento mayor que el volumen de relleno. Esta alta proporción de los cortes sobre los rellenos es por la mayor compactación que sufren las tierras del relleno, cuando se trabaja con equipo pesado, por desperdicio inevitable de parte del material de corte y por la tendencia de los tractoristas que ejecutan el trabajo, a acumular más tierra en el centro que en los lados de las fajas de tierra trabajadas. Usualmente el porcentaje adicional de corte necesario es mayor en los suelos pesados que en los suelos arenosos.

Por esta razón, el plano de nivelación debe colocarse un poco más bajo que el centroide, pero paralelo al plano ideal que pasa a la altura del centroide. El plano ideal produciría un volumen de corte igual al volumen de relleno necesario, y un plano paralelo más bajo, aumentará los cortes y reducirá los rellenos en proporción con la distancia que se baje dicho plano. La distancia vertical necesaria entre el plano ideal y el plano de nivelación, es sólo de unos pocos milímetros, que se establecen rápidamente al tanteo.

5. Determinación de los cortes y rellenos.- Conocida la altura del plano de nivelación en el centroide y las pendientes longitudinal y transversal de dicho plano, resultará una operación simple establecer los cortes y los rellenos en cada una de las intersecciones de las líneas que limitan las cuadrículas, siendo así que la distancia entre estas intersecciones, son conocidas y uniformes. Por ejemplo, si la altura del centroide fuera de 9.00 m.; la pendiente W - E de 0.2% y la distancia entre las intersecciones, de 20.00 m., la altura de la intersección próxima superior sería de 9.04 m. y la altura de la intersección inmediata inferior sería 8.96 m.

Este sistema se continúa en todas las intersecciones para obtener las alturas de todas ellas, correspondientes al plano de nivelación.

La Fig. N° 12 ilustra el procedimiento arriba explicado para determinar las cotas del plano de nivelación.

6. Cálculo de los cortes y rellenos.- La cantidad de corte o de relleno en cada intersección será la diferencia entre la cota original del terreno y la cota calculada del plano de nivelación. Los cortes o rellenos correspondientes se marcarán en el dibujo, como se indica en las Figs. Nos. 4 y 12.

El volumen total de corte será la suma de los productos entre el corte de cada intersección por el área de influencia respectiva de la misma. Como el área de la mayoría de las cuadrículas es igual, para realizar los cálculos será conveniente que el área de cada cuadrícula completa se considere igual a la unidad y el de las cuadrículas marginales incompletas como una fracción de la unidad, de la misma manera que se procedió para determinar la altura del centroide. Expresado en una fórmula, el volumen de corte puede indicarse en la forma siguiente:

$$V_c = (\sum c) \times n_c \times a$$

Donde: $\sum c$ = Suma de los cortes
 V_c = Volumen de corte
 n_c = Número de cuadrículas de corte
 a = Área de una cuadrícula completa.

De la misma manera el volumen total del relleno tiene la siguiente expresión:

$$V_r = (\sum r) \times n_r \times a$$

Donde: $\sum r$ = Suma de los rellenos
 V_r = Volumen de relleno
 n_r = Número de cuadrículas de relleno
 a = Área de una cuadrícula completa.

La relación entre V_c y V_r debe ser mayor que la unidad según el porcentaje adicional de corte que se haya establecido previamente, y según las características del suelo, como se explicó anteriormente. En caso de que el porcentaje adicio-

nal de corte no satisfaga la proporción establecida, se procederá a subir o a bajar el plano de nivelación, repitiendo el procedimiento explicado hasta obtener la proporción correcta de corte y de relleno.

La fórmula siguiente permite calcular la distancia vertical aproximada que debe subirse o bajarse el plano de nivelación con relación a la altura del plano del primer tanteo.

$$d = \frac{V_c - V_r (1 - P)}{P A_r + A_t}$$

Donde: d - Distancia que debe subirse o bajarse el plano, en m.

V_c y V_r - Volúmenes de corte y relleno en m^3 .

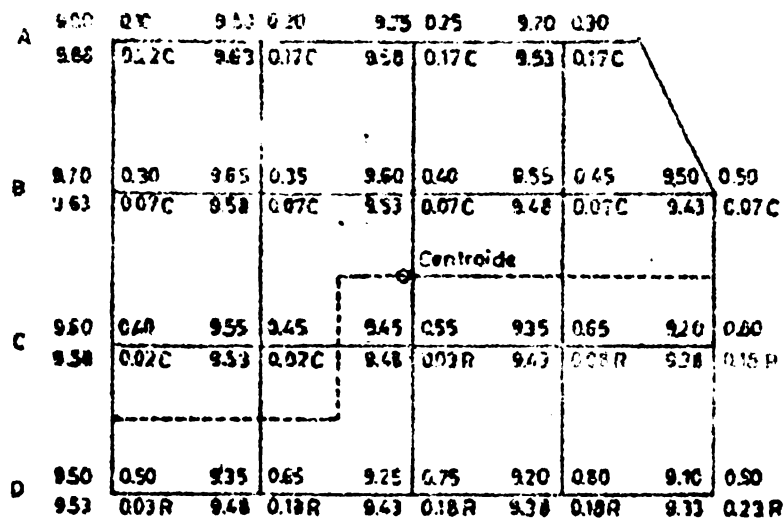
p - Porcentaje adicional de corte necesario.

A_r y A_t - Areas de relleno y total en m^2 .

Nivelación en Terrazas.

En ocasiones, cuando los terrenos tienen una pendiente excesiva, entre uno y cinco por ciento, puede resultar necesario, o conveniente, realizar un trabajo de nivelación de clase 6, a fin de reducir los cortes para aminorar el costo total del trabajo. Esta clase de nivelación busca la formación de una serie de terrazas consecutivas escalonadas en el campo.

El procedimiento a seguir para diseñar este tipo de nivelación es esencialmente igual al que se describió anteriormente, con la diferencia de que antes de iniciar los cálculos necesarios, debe estudiarse cuidadosamente el plano topográfico para establecer en él los límites de las terrazas, los cuales se colocan, generalmente, siguiendo en forma aproximada las curvas de nivel.

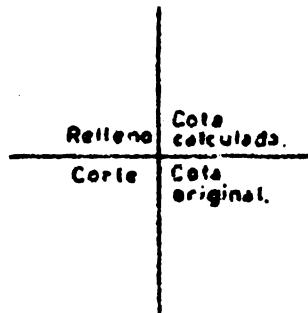
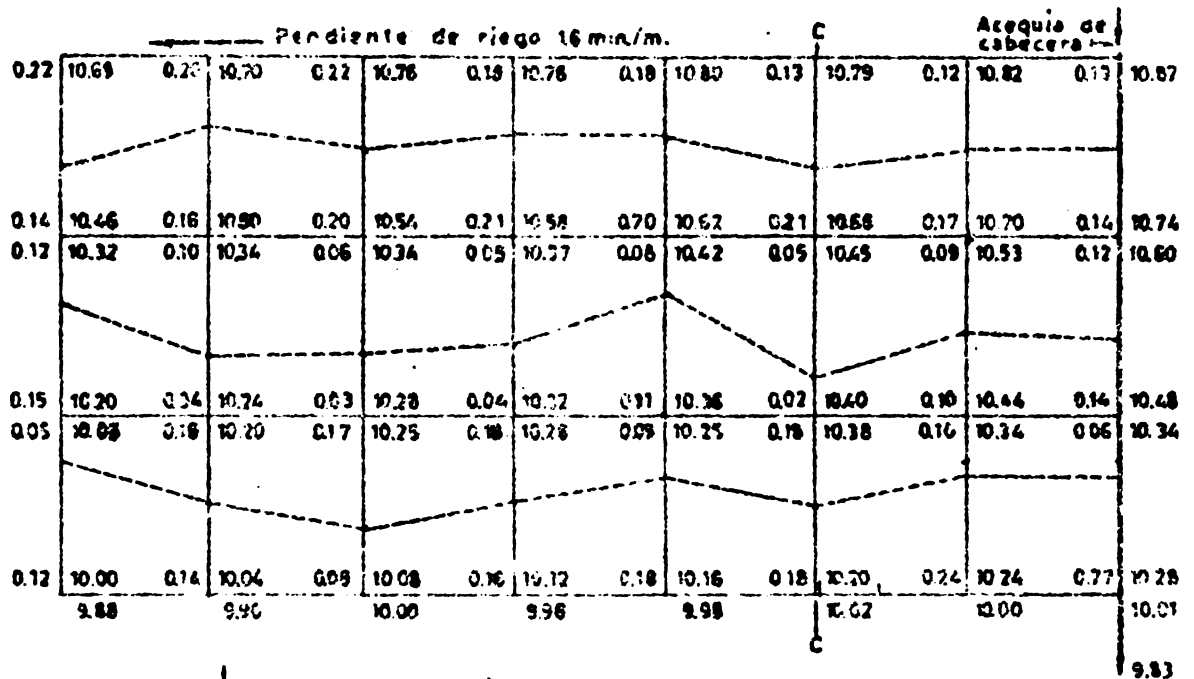


Altura del centroide = 9.48 m.

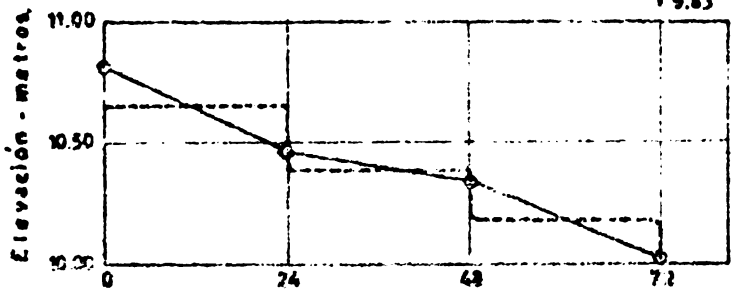
Corrída a estación B-3 : $9.48 \cdot \frac{9.60 - 9.45}{2} = 9.55$ m.

Bajado 2 cm. para asegurar mayor corte que relleno:
 $9.55 - 0.02 = 9.53$ m.

FIG N° 12. DESPLAZAMIENTO DEL CENTROIDE Y DETERMINACION DE CORTES Y RELLENOS.



Nomenclatura.



PERFIL A TRAVES DE C.C.

FIG N° 13. PORCION DE UNA NIVELACION EN TERRAZAS PARALELAS DE ANCHO UNIFORME CON LA ACEQUIA DE CABECERA NORMAL A LA DIRECCION DEL RIEGO.

Posteriormente se procede a realizar los cálculos necesarios para la nivelación de cada terraza en forma individual, como si se tratara de un área separada de nivelación.

La Fig. N° 13 ilustra una porción de un trabajo de nivelación en terrazas de ancho uniforme en donde el riego se ejecutará a lo largo de las terrazas, con una pendiente uniforme de 2 por mil. En este caso el ancho de las terrazas es de 24 metros y el terreno se dividió en cuadrículas de 20 por 24 metros. Se observará que en la línea que limita dos terrazas consecutivas, es necesario realizar cortes y rellenos, lo que introduce una ligera modificación en la nomenclatura que se sugirió en la Fig. N° 4 para la nivelación de terrenos con un solo plano. Los cortes, en este caso se indican con lápiz rojo en la parte inferior izquierda de las intersecciones y los rellenos, con lápiz azul en la porción superior izquierda de las mismas.

Marcación de las estacas.

En trabajos de precisión, en los cuales es conveniente tener estacado en cuadrículas de 20 x 20 metros todo el campo a estacar, resultará indicado marcar en cada una de las estacas, los cortes o rellenos necesarios en las mismas, de una manera convencional, clara y precisa, que sirva de orientación al operador del equipo nivelador. Una forma práctica de hacer estas marcas se indica en la Fig. N° 14. Todas las estacas, en corte o en relleno, son marcadas con una línea de referencia, colocada a 30 centímetros del nivel original del suelo, en el punto correspondiente. Las estacas colocadas en terreno de corte, se pintan de rojo en una porción de longitud igual al corte necesario, medida desde su extremidad superior; y las estacas situadas en áreas de relleno se pintan de azul en una porción de longitud igual al relleno necesario, comenzando desde el nivel original del suelo.

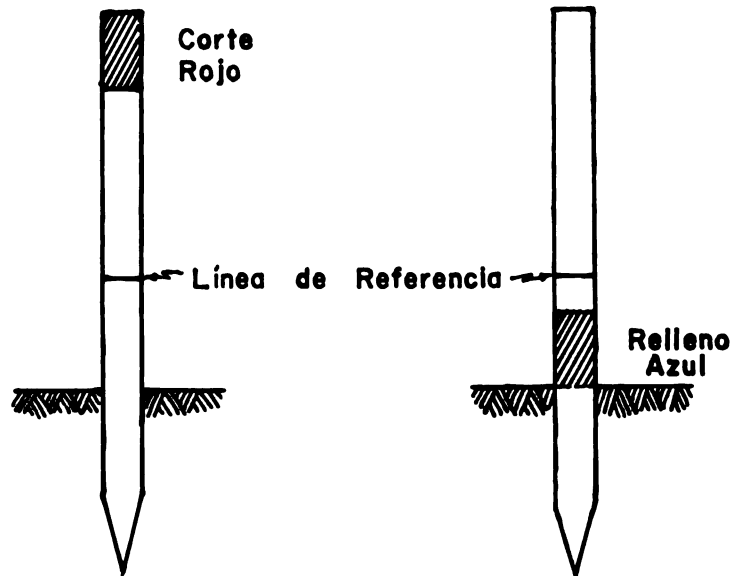


Figura N° 14

En esta forma, la profundidad de los cortes y de los rellenos, puede ser fácilmente observada por el operador, quien, además, podrá verificar el progreso del trabajo con una regla de 30 centímetros de longitud. La profundidad del plano de nivelación en las áreas de corte, con relación a la línea de referencia, será de 30 centímetros más la longitud de la banda roja marcada en la estaca. El relleno se habrá completado, por otra parte, cuando la banda azul de la estaca correspondiente haya sido apenas cubierta por la tierra. Además, la distancia entre la línea de referencia y el plano de nivelación, será la diferencia entre 30 centímetros y la profundidad del relleno correspondiente.

Existen otras formas para hacer las marcas de las estacas que el ingeniero o contratista puede seleccionar, según las conveniencias y usos locales, pero en todo caso resultará conveniente adoptar un método uniforme para guiar al operador de la máquina niveladora en su trabajo de campo.

Equipo para la Nivelación.

Hay muchos tipos de máquinas, más o menos adecuadas, para realizar el movimiento de tierras, en trabajos de nivelación. La selección de las mismas se hace según las proporciones del trabajo de nivelación deseado. Estos trabajos pueden hacerse con equipos muy livianos y sencillos, como la pequeña pala Fresno que se ilustra en la Fig. N° 15, o con equipos pesados de gran capacidad, como las traillas de 6 ó más metros cúbicos de arrastre, como se ilustra en la Fig. N° 16.

En los trabajos de gran extensión resulta más económico el empleo de traillas grandes, en cuyo caso la obra es, generalmente, ejecutada por contratistas especializados que pueden amortizar adecuadamente el alto costo inicial de esta clase de maquinaria, por razón del gran número de trabajos que ejecutan.

Las palas Fresno son, en general, máquinas de uso local, en el fundo, de operación muy lenta y aplicables a trabajos de poca extensión, o que puedan realizarse en el transcurso de varias estaciones, por etapas sucesivas.

Las traillas más grandes, en general, requieren una gran fuerza de tracción para realizar los cortes, durante el período de carga, y una vez cargadas, cuando son arrastradas por tractores rudos, pueden marchar a gran velocidad para transportar el material y depositarlo en una lámina uniforme sobre las áreas de relleno. En ocasiones estas traillas requieren un tractor adicional de orugas para empujarlas durante el proceso de carga.

Recientemente se han desarrollado en los Estados Unidos, traillas de tamaño medio provistas de mecanismos especiales de cargue, que reducen considerablemente el esfuerzo de tracción requerido en esta fase del trabajo. Dentro de este tipo de traillas pueden considerarse la de tipo rotatorio, que se ilustra en la Fig. N° 17, y la de carga gradual con transportador

de faja de la Fig. N° 18. Ambas son máquinas que pueden operarse con equipo liviano de tracción, como los tractores agrícolas corrientes. La trailla que ilustra la Fig. N° 19 es de tipo standard, pero de pequeña capacidad y puede ser arrastrada por tractores agrícolas corrientes.

La operación de nivelar se ejecuta moviendo la máquina desde las áreas de corte, donde se realiza la carga de la trailla, hacia las áreas de relleno, donde el material se deposita en capas de espesor uniforme. En este viaje la máquina marcha en línea recta entre dos hileras de estacas y regresa al área de corte en línea recta también, cuando haya depositado todo el material. Esta trayectoria, que se ilustra en la Fig. N° 20, asegurará máxima economía de operación.

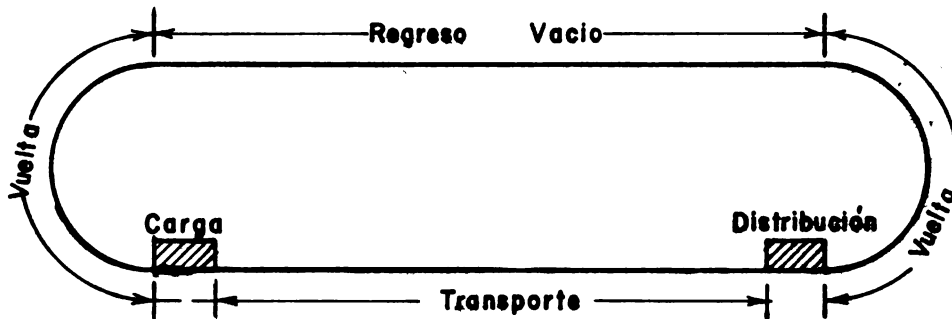


Figura N° 20. Trayectoria del equipo de nivelación

Durante el trabajo de nivelación, el operador tendrá cuidado de no tocar las estacas para que éstas sean puntos permanentes de referencia. De esta manera las estacas quedarán sobre montículos en las áreas de corte, y más enterradas en las áreas de relleno. Durante la fase final del trabajo, se eliminarán los montículos dejados en las áreas de corte.

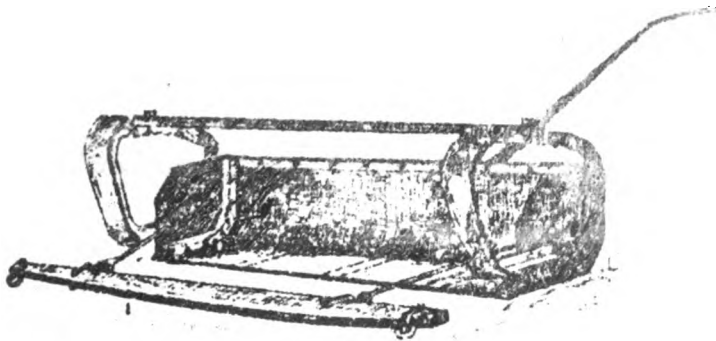


FIG. N° 15. Pala tipo freno.

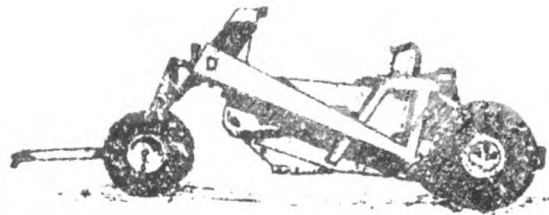


FIG. N° 16. Trailla de 78 yardas cúbicas.
Cortesía de Le Tourneau Westinghouse
Co.

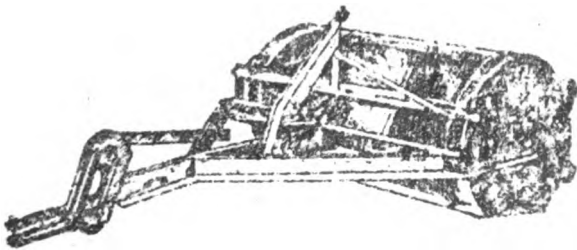


FIG. N° 17. Trailla de tipo rotatorio.
Cortesía de Central Mfg. Co.

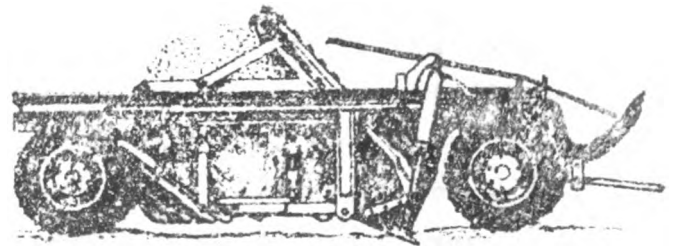


FIG N° 18.- Trailla con elevador de faja.
Cortesía de Hancock Manufacturers.

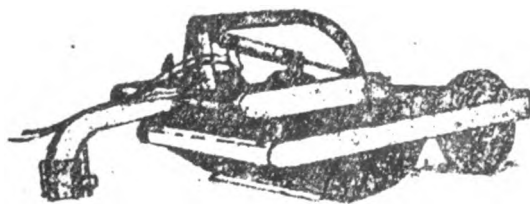


FIG. N° 19. Trailla de 5 yardas cúbicas.
Cortesía de The Gledhill Road Machinery Co.

Distancia de Arrastre y Costo Unitario.

El costo de la nivelación por metro cúbico de material, se obtiene en función de los costos fijos, como son: depreciación, intereses, impuestos y seguros; y de los costos variables, como son: combustible, grasa y aceite lubricantes, repuestos y reparaciones, llantas y salarios.

Los costos fijos se calculan, generalmente, sobre la base de 10,000 horas de operación, de tal manera que, por este concepto, el costo por metro cúbico de tierra movida será mayor mientras mayor sea el tiempo requerido para su transporte.

Los costos variables, por otra parte, serán también mayores por metro cúbico de tierra movilizada, a medida que aumenta la distancia de arrastre del material.

Como se ve, el costo unitario es sensiblemente afectado por la distancia de arrastre, y la variación del mismo ocurre, aproximadamente, según se ilustra en la Fig. N° 21. En esta figura, que corresponde a estudios realizados en California, puede observarse, además, que el trabajo realizado con traillas arrastradas por tractores de llantas neumáticas es menos costoso que el mismo trabajo ejecutado con tractores de oruga y que, a mayor capacidad del equipo, corresponde un costo menor por metro cúbico de tierra movida. Por otra parte, cuando la distancia de arrastre es menor que unos 200 metros, no existen diferencias apreciables en el costo, cuando se usan equipos más o menos grandes, o de una u otra clase.

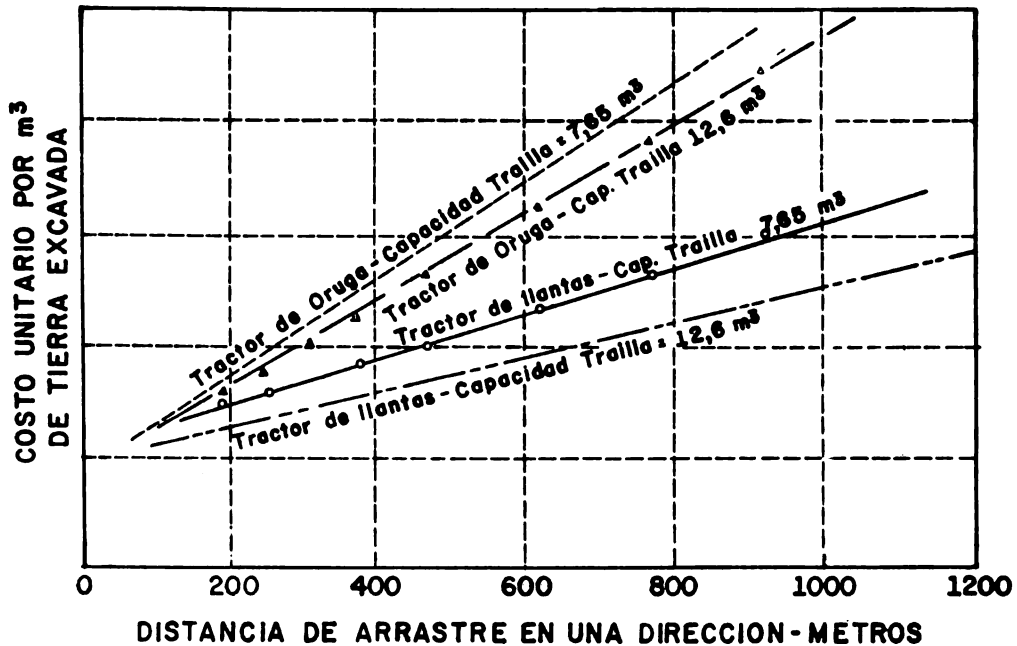


Figura N° 21

Equipo para el Acabado.

Para hacer el acabado de la nivelación se usan algunas máquinas niveladoras que se caracterizan por su gran longitud y porque están provistas de una cuchilla en el centro. Algunas de estas máquinas están montadas sobre cuatro ruedas anchas colocadas, por pares, en los extremos de la armadura de la máquina, como la que se ilustra en la Fig. N° 22. Otras llevan sólo dos ruedas al centro y van provistas de un mecanismo automático que baja o sube la cuchilla de corte, cuando ésta pasa sobre un montículo o sobre un relleno, respectivamente. Una máquina de este tipo se ilustra en la Fig. N° 23.

Estas máquinas se usan también para nivelar tierras, cuando éstas tienen una pendiente general adecuada para el riego y cuando las irregularidades del terreno son frecuentes y de poca profundidad.

En tales casos, y también para hacer el acabado de nivelación más severa, estas máquinas se operan dándole al

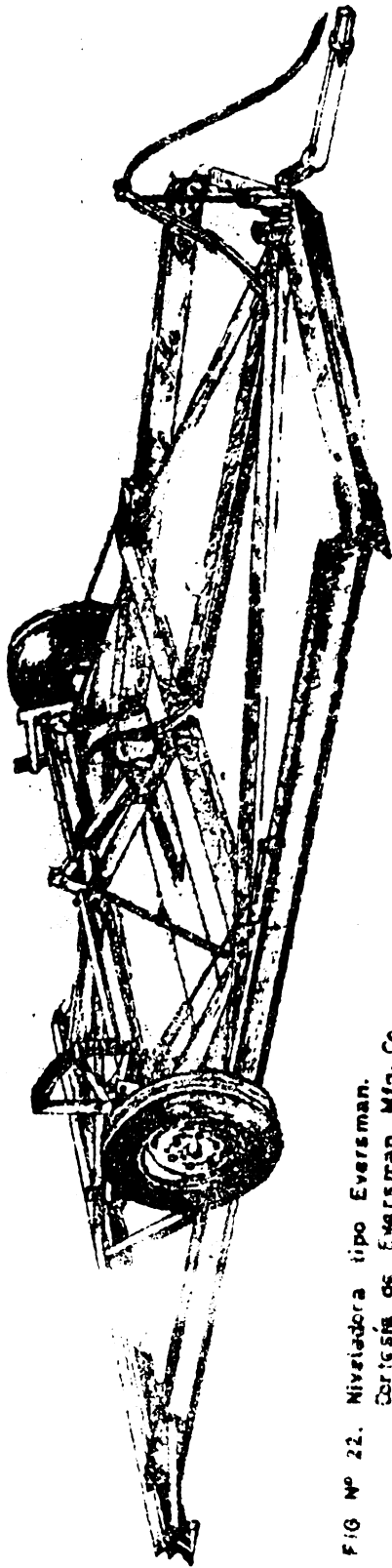


FIG Nº 22. Niveladora tipo Eversman.
Cortesía de Eversman Mfg. Co.

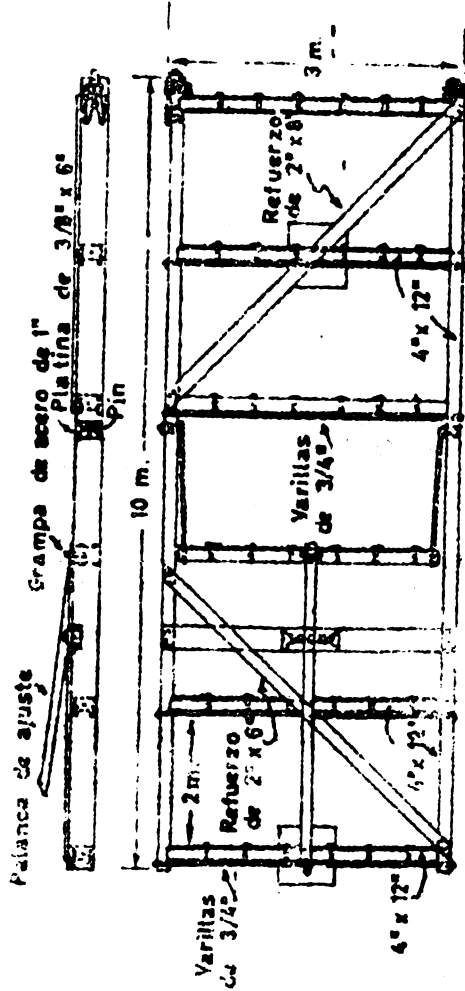


FIG. Nº 24. Niveladora de construcción rústica.
Tomado de U.S.D.A - F.B. 392.



FIG. Nº 23. Niveladora tipo Marvin.
Cortesía de Marvin Landplane Co.

campo tres pases: dos en sentido diagonal y uno final en el sentido del riego. En esta forma se obtienen los mejores resultados.

La Fig. N° 24 ilustra una máquina niveladora de tipo rústico que también resulta útil para el acabado y emparejamiento de terrazas.

R E F E R E N C I A S

- 1) BELL, R.M. Nivelación de Terrenos para Riego. Notas Sumarias y Extractos. Curso Internacional de Riegos. Ministerio de Agricultura de Chile. 1956. P. 127 - 174.
- 2) CHUGG, G.E. Calculations for Land Gradation. Agricultural Engineering 28 (10): P. 461 - 463. 1947.
- 3) FREVERT, R.K. and Others. Engineering in Soil and Water Conservation. Ann Arbor. Edwards Brothers, Inc. 1953.
- 4) GIVAN, C.V. Land Grading Calculations. Agricultural Engineering 21 (1): P. 11-12.
- 5) MARR, J.C. Grading Land for Surface Irrigation. University of California. California Agricultural Experiment Station. Circular 438. 1954. 46 P.
- 6) U.S. DEPARTMENT OF INTERIOR. Irrigation Advisers' Guide. U.S. Bureau of Reclamation. 1951. 216 P.

**TABLAS PARA LA CONVERSION DE UNIDADES DE LOS SISTEMAS METRICO
E INGLES**

UNIDADES DE LONGITUD

Conversión de a	Metros	Centímetros	Pies	Pulgadas
Metros	1	100	3.281	39.372
Centímetros	.01	1	.0328	.3937
Pies	.3048	30.48	1	12
Pulgadas	.00254	2.54	.0833	1

UNIDADES DE VOLUMEN

Conversión de a	Pies Cúbicos	Galones	Litros	Metros Cúbicos
Pies cúbicos	1	7.48	28.3	.0283
Galones	.1337	1	3.785	.0038
Litros	.0353	.2642	1	.001
Metros cúbicos	35.315	264.2	1,000	1

UNIDADES DE GASTO

Conversión de	a	Pies Cúbicos por segundo	Galones por minuto	Litros por segundo	Metros cúbicos por hora
Pies cúbicos/seg.	1	1	448.8	28.32	101.94
Galones por minuto	.00223	.00223	1	.6308	.2271
Litros por segundo	.0353	.0353	15.853	1	3.6
Metros cúbicos por hora	.0098	.0098	4.403	.278	1

AFORO DE AGUAS EN CANALES EN EL FUNDO

OBJETIVO

La finalidad de este ejercicio es estudiar en el campo varios aparatos para medir el agua de riego en los fundos y establecer los requisitos necesarios para su correcta instalación. Se tratará, asimismo, de comparar las ventajas que ofrecen unos y otros, bajo diferentes condiciones.

EQUIPO

El equipo que se usará en este ejercicio está constituido por los siguientes elementos:

1. Aforador Parshall
2. Vertedero Cipolletti
3. Vertedero rectangular
4. Vertedero triangular
5. Orificio rectangular
6. Flotador ordinario

PROCEDIMIENTO

Los distintos elementos medidores serán instalados a lo largo de un canal, de manera tal que la distancia entre uno y otro elemento permita que el remanso producido por el vertedero más bajo se prolongue hasta el vertedero inmediato superior a fin de asegurar un colchón de aguas abajo en cada vertedero.

Cuando el gasto de agua del canal se haya estabilizado, se procederá a hacer el aforo con cada uno de los aparatos instalados. En cada vertedero, además de medir la carga de agua se determinará en forma aproximada, por medio de un flotador corriente, la velocidad de aproximación del agua.

La información obtenida se registrará en un formulario como el que se incluye anexo.

RESULTADOS

Con los datos registrados se calculará el gasto en cada uno de los aparatos usados para cada condición. A continuación se insertan las fórmulas correspondientes:

$$\text{Vertedero rectangular: } Q = 0.0184 L (1 - 0.2 H) H^{1.5}$$

$$\text{Vertedero Cipolletti: } Q = 0.0187 L H^{1.5}$$

$$\text{Vertedero triangular: } Q = 0.0146 H^{2.48}$$

$$\text{Orificio rectangular: } Q = 0.027 A \sqrt{H}$$

$$\text{Aforador Parshall: } Q = KH^n$$

En estas fórmulas: Q = gasto en l/seg. .

L = long. de la cresta en cm. .

H = carga de agua en cm. .

A = área en centímetros cuadrados

K y n son coeficientes que varían con el tamaño de la canoa.

En papel logarítmico se hará un gráfico que represente la relación existente entre el gasto y la carga en el aforador Parshall.

DISCUSION

Hágase una breve discusión del ejercicio realizado, indicando cualquier dificultad ocurrida durante el trabajo. Brevemente, indíquense los requisitos necesarios para instalar correctamente un vertedero y un aforador Parshall. Indíquese, además, cómo se procedió para asegurar que la curva de remanoso producida por una compuerta se prolongará hasta la compuerta ubicada aguas arriba. Discútanse las ventajas y desventajas que ofrecen los distintos aparatos usados para medir el agua de riego en los fondos, e indíquese cómo varía el gasto con relación a la carga en cada uno de dichos aparatos.

Por medio del gráfico elaborado por el aforador Parshall determinense los valores aproximados de k y n en la fórmula:

$$Q = K H^n$$

¿En qué casos resultará mejor instalar un vertedero, cuándo un orificio, y cuándo un aforador Parshall?

Registro de los Datos

Aforador Parshall			Vertedero triangular		Vertedero rectangular		
Garganta = 6" = 15.2 cm.			90		Cresta = 1.5' = 45.6 cm.		
H_1 cmt.	H_2 cmt.	Q L/S	H cmt.	Q L/S	H cmt.	Q-L/S	V.de Aprox

Vertedero Cipolletti			Orificio rectangular	
Cresta = 1.25' = 38.1 cms.			Area	
H cms.	Q L/S	V. Aproximada	H cms.	Q L/S
		L/S		

Flotador Ordinario						
Distancia metros	Tiempo seg.	Veloc. mts/s.	A_1 mt^2	A_2 mt^2	A_m mt^2	Q L/S

ENSAYO DE UN POZO DE BOMBEO

OBJETIVO

El objetivo de este ensayo es establecer las características de rendimiento de un pozo de bombeo, o sea, la relación entre la profundidad del nivel piezométrico del pozo y el gasto del mismo. Se trata asimismo de demostrar la importancia de estos ensayos en la selección adecuada de las bombas, de acuerdo con las características de los pozos.

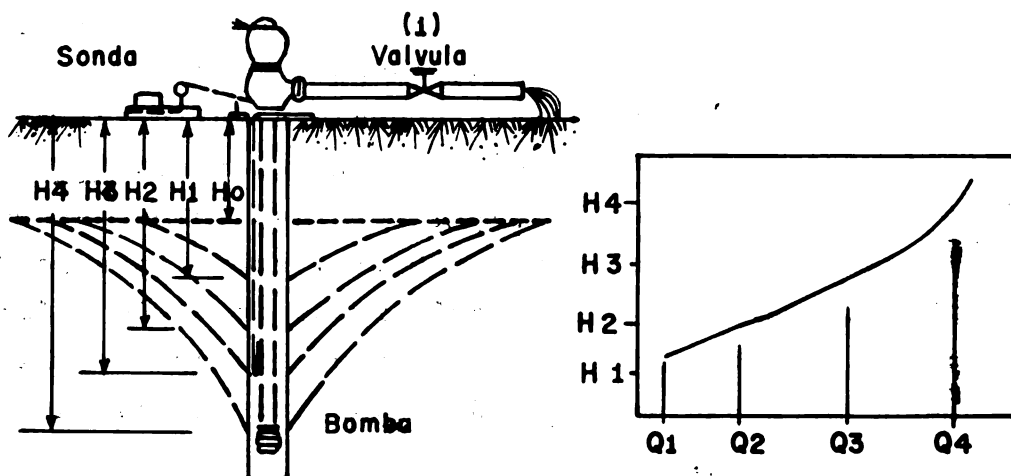
EQUIPO

El equipo que se usará en este ensayo está constituido por los siguientes elementos:

- 1) Sonda eléctrica
- 2) Orificio de descarga

PROCEDIMIENTO

El esquema que se ofrece a continuación representa un corte longitudinal del pozo. En él pueden observarse la naturaleza del ensayo que va a realizarse y las determinaciones necesarias. Cada gasto que se bombea del pozo produce una depresión en el nivel piezométrico del agua. Esta depresión aumenta a medida que se aumenta la descarga.



Por medio de la válvula de descarga (1) se fijará una descarga dada y, después de bombear por un cierto tiempo, se procede a medir el nivel piezométrico H por medio de la sonda eléctrica, y el gasto Q correspondiente, por medio del orificio de descarga.

Los datos obtenidos se tomarán en un formulario como el que se ilustra a continuación:

Registro de Datos para el Ensayo de un Pozo

Gasto	Orificio	Profundidad
Presión en metros	Gasto en L/S	del agua en metros

RESULTADOS

Una vez que se haya calculado el gasto por medio de la fórmula $Q = 0.63 A \sqrt{2gh}$, se elaborará una curva que relacione la profundidad del nivel piezométrico (H) en el eje de los "y" y al gasto (Q) en el eje de los "x", como se ilustra en el gráfico.

DISCUSION

Hágase una discusión sobre el ensayo realizado, indicando sus limitaciones y probables fuentes de error.

Indíquese cuál sería la profundidad del nivel piezométrico si se instalara una bomba con un gasto de ___ L/Seg. ¿Cuál sería, en este caso, la carga total de bombeo en metros, si se deseara elevar el agua a 20 mts. sobre la superficie del suelo, a través de una tubería recta de 4" de diámetro y de 200 mts. de longitud? ¿Qué ocurriría si se instalara una bomba con un gasto de ___ L/S. a una profundidad de ___ mts.?

ENSAYO DE UNA BOMBA CENTRIFUGA

OBJETIVO

La finalidad de este ejercicio es determinar en el campo las características de operación de una bomba centrífuga. Las características que van a determinarse son: altura de descarga; potencia consumida; potencia aprovechada; eficiencia de operación y descarga de agua; y las relaciones que existen entre estos factores diferentes cuando las bombas operan a velocidad constante. Por medio de este ensayo se trata de establecer la importancia que tiene estudiar las características de las bombas al hacer la selección de las mismas.

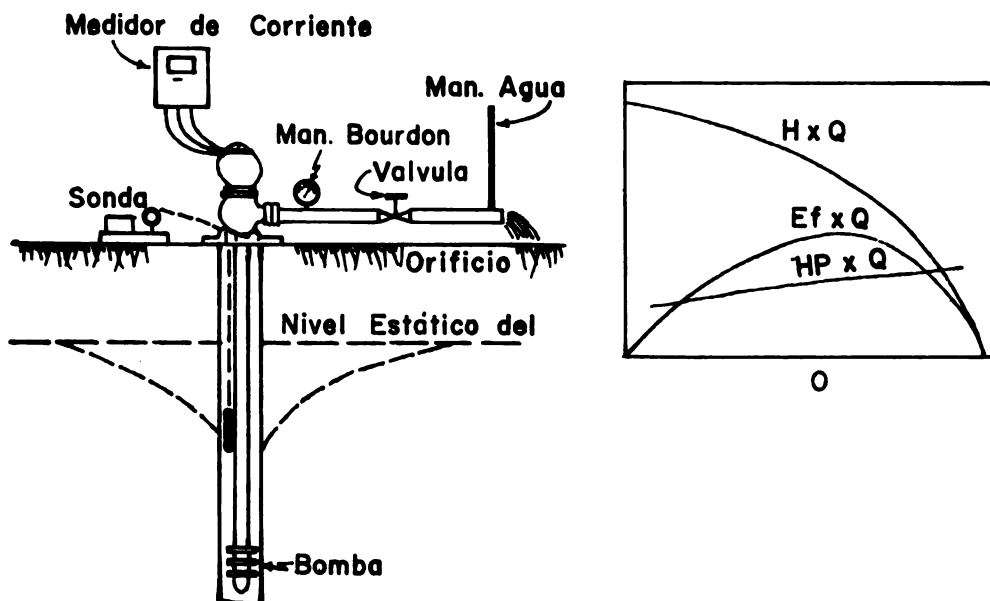
EQUIPO

El equipo que se usará en este ensayo está constituido por los siguientes elementos:

1. Medidor de corriente eléctrica.
2. Orificio de descarga.
3. Manómetro de Bourdon.
4. Sonda eléctrica.

PROCEDIMIENTO

El esquema que se presenta a continuación, indica la disposición de los aparatos indicados arriba:



Una vez que se ha fijado el gasto de la bomba por medio de la válvula de descarga (1) se procede a hacer las siguientes lecturas:

1. Número de revoluciones que da el medidor de corriente en 10 minutos.
2. Presión que registra el manómetro de agua del orificio de descarga.
3. Presión que registra el manómetro de Bourdon.
4. Profundidad del nivel piezométrico del agua en el pozo.

Tan pronto como se haya registrado la información anterior, se procede a fijar un nuevo gasto por medio de la válvula de descarga (1) y se toma la información que arrojen los instrumentos para esta nueva condición.

El procedimiento se repite para cinco o seis gastos diferentes, a fin de tener suficiente información para dibujar las curvas características de la bomba en toda su amplitud de operación.

Los registros correspondientes se harán en un formulario como el que se indica a continuación:

Registro de los Datos

Potencia Aplicada Medidor de corriente		Gasto Orificio		Carga de Bombeo		
Rev. en 10 Min.	RPM	Potencia HP	Presión en mt.	Gasto L/S	Manómetro mt. 16 s/ / 7 "	Prof. agua metros
Carga de Bombeo (continuación)				Potencia Aprovechada HP	Eficiencia %	
Fricción mts.		Total				

RESULTADOS

Con la información obtenida se procederá a calcular para cada condición, la potencia consumida por el motor en HP; el gasto de la bomba en litros por segundo; la carga total de bombeo en metros; la potencia aprovechada de la bomba en HP; y la eficiencia de operación.

Las siguientes fórmulas servirán para realizar los cálculos indicados:

$$HPc = RPM \times K$$

$$Q = 0.65 A \frac{2gh}{75}$$

$$HPa = \frac{Q \times H \times w}{75}$$

$$Ef = \frac{HPa}{HPc}$$

HPc = Potencia consumida

HPa = Potencia aprovechada

Q = Gasto

h = Carga en el orificio

H = Carga total del bombeo

K = Constante del medidor de corriente

A = Area del orificio

Ef = Eficiencia

w = Peso específico del agua

Con estos resultados se dibujarán las curvas características de las bombas, colocando al gasto en el eje de los "x", y carga total, potencia y eficiencia, en el eje de las "y". Estas curvas tendrán la apariencia general que ofrece el gráfico N° 1.

DISCUSION

Hágase una breve discusión sobre el ensayo realizado, indicando las limitaciones del mismo y las fuentes probables de error. Indíquese, además, para qué condiciones de gasto y de carga sería más aconsejable esta bomba, y cuál sería el costo de la energía eléctrica consumida para bombear un metro cúbico de agua, cuando la bomba opera a máxima eficiencia. ¿Cuál sería este costo si se opera con una eficiencia de 30%? ¿Cuánta agua descargaría esta bomba si tuviera que impulsar el agua a 10 mts. de altura sobre el nivel del suelo y a través de una tubería de 4" de diámetro y de 1000 metros de longitud? ¿Cuál sería en este caso la eficiencia de la bomba?

MÉTODOS PARA DETERMINAR EL GRADO DE HUMEDAD
DEL SUELO

OBJETIVO

El objetivo de este ejercicio es comparar varios métodos existentes para determinar el grado de humedad del suelo, y establecer familiaridad con el manejo e instalación de los distintos aparatos. El grado de humedad del suelo es de importancia fundamental para establecer el momento más oportuno para el riego.

Los métodos que van a compararse en este ejercicio son: El método directo de la estufa; los bloques de Bouyoucus; las puntas gravimétricas; los tensiómetros de mercurio; el método de la apertura de los estomas; y el método del tacto.

EQUIPO

El equipo que se usará en este ejercicio está constituido por los siguientes aparatos:

- 1) Método gravimétrico directo.
Estufa de aire (105°C.
Tubo toma-muestras de Veihmeyer, cuya construcción se describe en la Fig. N° 8 del capítulo sobre Propiedades Físicas de los Suelos.
Latas para muestras de suelos.
Balanza con aproximación de 0.1 gramo.
- 2) Método de los bloques de Bouyoucus.
Bloques de yeso de Bouyoucus.
Indicador de Bouyoucus (Fig. N° 10 del capítulo sobre Propiedades Físicas de los Suelos).
Barreno de suelos.
- 3) Método de las puntas gravimétricas
Puntas gravimétricas (Fig. N° 11 del capítulo sobre Propiedades Físicas de los Suelos).
Balanza con aproximación de 0.01 gramo.

4) Método del tensiómetro.

Tensiómetros según se describen en la Fig. N° 9 del capítulo sobre Propiedades Físicas de los Suelos.

5) Método de la apertura de los estomas.

Soluciones de Nujol y Kerosene en distintas proporciones.

Cuenta-gotas.

6. Método de campo al tacto.

Tabla N° 2 del capítulo sobre Propiedades Físicas de los Suelos.

PROCEDIMIENTO

Como la finalidad es comparar en el campo el grado de precisión posible en los distintos métodos indicados, el sitio que se seleccione para la prueba debe tener un área reducida, de tal manera que el suelo ofrezca condiciones físicas uniformes, en cuanto a su textura y a su contenido de humedad. Las muestras que se tomen y la instalación de los aparatos deben hacerse a la misma profundidad y dentro de la misma área seleccionada, a fin de que los resultados sean comparables.

El procedimiento a seguir en la instalación o ejecución de los distintos métodos mencionados, se explica a continuación:

1. Método gravimétrico directo.- Con el tubo de Veihmeyer o con otro implemento adecuado para tomar muestras representativas de suelos, se obtendrán las muestras de la profundidad deseada y se colocarán en latas adecuadas que luego se tapan para evitar la evaporación de agua. Las latas con las muestras de suelos son pesadas con aproximación de 0.1 gramo y secadas en la estufa a una temperatura de 105°C. El período de secamiento se prolongará hasta cuando las muestras acusen un peso constante, lo cual puede tomar unas 24 horas. Luego se pe

san las latas con el mismo grado de aproximación anterior, y la diferencia entre el peso original y el peso seco representa el peso de agua de la muestra. El porcentaje de humedad de la muestra se obtiene dividiendo el peso de agua perdido por el peso de suelo seco, multiplicado por 100.

Para obtener una interpretación del grado de humedad del suelo, en relación con la disponibilidad de agua para las plantas, será necesario conocer el coeficiente de marchitez y la capacidad de campo del suelo en referencia.

Si llamamos P el porcentaje total de agua en la muestra; CM , el coeficiente de marchitez y CC , la capacidad de campo, el porcentaje de agua disponible para las plantas (n) lo dará la siguiente relación:

$$n = \frac{P \times CM}{CC - CM} \times 100$$

2. **Método de los bloques de Bouyoucos.**— La instalación de los bloques de Bouyoucos se hace abriendo un hueco en el suelo, con un barreno de diámetro adecuado, hasta la profundidad deseada. Los bloques son, luego, colocados en el fondo del hueco en posición horizontal y cubiertos con una pequeña porción de suelo que se compacta suavemente sobre los bloques, para asegurar una adherencia completa entre ellos y el suelo. Posteriormente se acaba de tapar el hueco con el resto de suelo correspondiente, dejando afuera los alambres de los bloques.

Para determinar el contenido de agua disponible en el suelo, después de un tiempo adecuado para que el contenido de humedad del bloque entre en equilibrio con la humedad del suelo, el aparato indicador de Bouyoucos se ajusta a 0, apretando el interruptor (botón rojo) y haciendo girar el botón de ajuste (al centro) hasta que la aguja indicadora marque 0 por ciento de agua disponible. Luego se

conectan los electrodos; se presiona el botón de lectura (negro, a la derecha) y se lee la indicación de la aguja que corresponde al porcentaje de agua disponible (n) para las plantas.

3. Método de las puntas gravimétricas.- El cilindro es instalado en el suelo, a la profundidad deseada, como se indica en la Fig. N° 11 del capítulo sobre Propiedades Físicas del Suelo, teniendo cuidado de que el suelo quede en unión perfecta con la extremidad inferior porosa del cilindro.

Cuando la extremidad porosa haya entrado en equilibrio con la humedad del suelo, el grado de humedad del suelo se obtendrá pesando el cono o punta gravimétrica y leyendo el grado de humedad del suelo en la tabla de calibración preparada para ese suelo. La pesada debe hacerse con una balanza que aproxime 0.01 gramo.

4. Método del tensiómetro.- La primera operación necesaria, antes de usar un tensiómetro, consiste en colocar el mercurio y el agua del aparato. El mercurio necesario debe ser limpio y se usará para llenar hasta dos tercios de su profundidad el recipiente de vidrio situado en la porción inferior del manómetro. Concluida esta operación, se llenará de agua el tubo de vidrio que comunica la cápsula porosa con el tensiómetro de mercurio. En esta ocasión debe usarse agua fresca, recién hervida. Para desalojar cualquier aire que pueda existir en el sistema, el agua es presionada por medio de una jeringa que se opera sobre el tubo de agua (trampa para el aire) hasta cuando el agua del tubo llegue al depósito de mercurio libre de aire. Luego se coloca la tapa de corcho en el tubo de agua y se espera hasta cuando se obtenga una lectura de 500 ó 600 centímetros en la escala, para completar la aplicación de agua.

Luego debe ajustarse a cero la escala de lecturas. Esta operación se ejecuta colocando en agua la cápsula porosa y esperando hasta que el menisco de mercurio se haya

estabilizado, para correr la escala longitudinalmente para que el cero de la misma corresponda con la altura del menisco.

En esta forma, las lecturas que se obtengan en el campo representarán la tensión en la cápsula porosa.

La instalación del aparato se hace abriendo un hueco en el suelo, de diámetro ligeramente mayor que el diámetro de la cápsula, y con una profundidad que corresponda a la zona de suelo que quiere investigarse. Las lecturas serán más precisas mientras mayor sea el contacto entre el suelo y la cápsula porosa, por esta razón será conveniente compactar ligeramente el suelo alrededor de la cápsula por medio de una varilla delgada.

Las lecturas del monómetro darán centímetros de tensión de agua y el grado de humedad correspondiente puede interpretarse por medio de una curva o tabla de calibración correspondiente al suelo que se estudia.

5. Método de la apertura de los estomas.- La aplicación de este método implica un estudio previo de la reacción de las plantas, en cuanto al grado de apertura de los estomas en relación con el grado de humedad del suelo. Este método está aún en el proceso de investigación, pero se han obtenido ya resultados satisfactorios con algunas plantas investigadas.

Cuando las relaciones arriba indicadas, han sido establecidas, el procedimiento a seguir en el campo, consiste en aplicar sobre el haz o en el envés de las hojas, según la planta, gotas de soluciones cada vez más viscosas (Nujol + Kerosene) hasta observar cuál solución no pasa a través de los estomas de las hojas. La viscosidad de la solución que pasa, o sea, el grado de concentración de Nujol, está asociada con el grado de apertura de los estomas, lo que a su turno guarda relación con el grado de humedad del suelo.

Este grado de humedad se establece con la curva de calibración correspondiente que se haya elaborado previamente para la planta en referencia.

6. Método del tacto.- Este es un método rústico para estimar el grado de humedad del suelo y que tiene gran valor práctico en el campo. Consiste en tomar un puñado del suelo que se desea investigar y apretarlo en la mano para observar su apariencia externa y su grado de estabilidad. La interpretación del grado de humedad se hace con base en la tabla N° 2 del capítulo correspondiente a Propiedades Físicas de los Suelos.

Los datos obtenidos durante este ejercicio, se registrarán en un formulario como el que se indica en la hoja anexa.

RESULTADOS

Los resultados se insertarán en las columnas correspondientes del formulario anterior, indicando cualquier dificultad que se hubiera observado para la obtención de los mismos.

DISCUSION

Hágase una discusión sobre el ejercicio realizado, indicando las limitaciones y ventajas de los distintos métodos ensayados. Para hacer esta discusión, todos los métodos deben compararse con el método gravimétrico directo.

FORMULARIO DE REGISTRO

Método gravimétrico directo				Método de Bouyoucos		Método de las puntas gravimétricas		
Peso de la muestra húmeda	Peso de la muestra seca	Peso del agua	% Humedad	% de Agua disponible	% de Agua disponible	Peso de la punta	% Agua disponible	% Humedad

Método del tensiómetro		Método de estomas		Método del tacto		
% Agua disponible	% de humedad	N° de succión	% de Agua disponible	Textura del suelo	% de Agua disponible	% de Humedad

DETERMINACION DE LA HUMEDAD EQUIVALENTE

OBJETIVO

El objetivo de este ejercicio es determinar la humedad equivalente de un suelo, para establecer la relación entre este valor y el valor de la capacidad de campo del mismo suelo, medida en el campo. El ejercicio persigue, además, ilustrar el procedimiento necesario para determinar la humedad equivalente, incluyendo el manipuleo previo de la muestra y la operación de la centrífuga.

EQUIPO

El equipo necesario para este ejercicio está constituido por los siguientes elementos:

- Centrífuga provista de reostato para controlar la velocidad.
- Cápsulas rectangulares metálicas de 5 cm x 5 cm. x 2 cm., provistas de malla metálica en el fondo.
- Muestra uniforme del suelo.
- Papel de filtro y recipiente para poner las muestras en saturación.

PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir para determinar la humedad equivalente, consiste en pesar para cada cápsula rectangular una muestra de 30 g. de suelo desmenuzado y secado al aire. Las muestras son colocadas en cada una de las cápsulas, en el fondo de las cuales se ha colocado previamente un papel de filtro. Estas muestras se ponen, entonces, en un recipiente con agua y se dejan allí durante una noche para que se saturen completamente. Al día siguiente las cápsulas con las muestras de suelos son colocadas en la centrífuga, que se pondrá luego a operar con una velocidad de 2,440 r.p.m.

En esta forma se obtendrá una fuerza igual a 1,000 veces la fuerza producida por la aceleración de la gravedad, lo cual constituye un requisito indispensable, ya que la humedad equivalente es un coeficiente arbitrario que debe determinarse de acuerdo con los procedimientos originales que lo definen. La centrífuga se mantiene a una velocidad constante durante un período de 30 minutos, al cabo de los cuales las muestras se sacan, se pesan, se ponen a secar a 105°C en la estufa, y se vuelven a pesar, cuando observen un peso constante, para determinar el porcentaje de humedad que quedó en dichas muestras. Este porcentaje representa la humedad equivalente del suelo que se considera. Las pesadas deben hacerse con aproximación de 0.01 g..

Operación de la Centrífuga

Para operar la centrífuga, una vez que las muestras de suelo han sido colocadas en su lugar, se procede en la forma siguiente:

1. Obsérvese que la aguja indicadora del reostato esté en cero.
2. Colóquese el switch del freno (brake) en la posición N° 1.
3. Póngase el switch del regulador de velocidad (governor) en la posición ON.
4. Colóquese el switch de contacto en la posición ON.
5. Hágase girar, luego, la aguja indicadora del reostato, en forma gradual, hasta la posición 35 aproximadamente, observando entonces el bombillo piloto.
6. Cuando el bombillo piloto se haya encendido, hágase girar la aguja indicadora del reostato hasta la posición 20 o 24, aproximadamente. La posición de la aguja del reostato puede desplazarse hacia atrás o hacia adelante, hasta asegurarse de que la velocidad alcanzada por la centrífuga corresponde a las 2,440 r.p.m. que son necesarias.

Quando el governor está operando, el bombillo piloto se enciende y se apaga periódicamente. La velocidad de la centrífuga debe verificarse frecuentemente, a fin de ajustar el resorte del mecanismo que controla la velo

ciudad (governor), en caso de que la velocidad alcanzada no corresponda a las 2,440 r.p.m. indicadas. La velocidad de la centrifuga se observa en el tacómetro que está localizado sobre la tapa de la centrifuga.

RESULTADOS

En un formulario como el que se ilustra a continuación, se hará el registro de los datos correspondientes a los 4 suelos diferentes que se usarán en este ejercicio. En el mismo formulario se registrarán los valores correspondientes a la capacidad de campo de dichos suelos, previamente determinadas en un ejercicio anterior.

Formulario de Registro

Peso muestra húmeda	Peso muestra seca	Agua evaporada	Humedad equivalente	Capacidad de campo	C.C./H.E.

DISCUSION

Hágase una comparación entre los valores de la humedad equivalente y de la capacidad de campo, estableciendo la relación entre los mismos para los 4 tipos de suelo que se han utilizado. Indíquese, además, cómo varía la relación entre la humedad equivalente y la capacidad de campo con la textura del suelo. Calcúlese también el valor de la capacidad de campo por medio de la fórmula siguiente:

$$C.C. = 0.865 (H.E.) + 2.62$$

Establézcase la relación entre el valor así calculado y la capacidad de campo real del suelo.

DETERMINACION DE LA LONGITUD Y ESPACIAMIENTO DE LOS SURCOS DE RIEGO Y GASTO DE AGUA REQUERIDO EN CADA SURCO

OBJETIVOS

La finalidad de este ejercicio es determinar en el campo, la longitud y el espaciamiento que debe darse a los surcos de riego y establecer el gasto de agua requerido en cada uno. Por medio de este trabajo se trata también de estudiar los varios factores que afectan el planeamiento de un sistema de riego por surcos, tales como: grado de infiltración del suelo, capacidad de retención de agua, pendiente, erodabilidad, etc., y el valor relativo de cada uno de estos factores en el diseño adecuado del sistema.

PRINCIPIOS GENERALES

Los principios generales que se han tenido en consideración para desarrollar el método de trabajo que aquí se describe, pueden sintetizarse en la forma siguiente:

- A. El riego por surcos ofrece dos periodos característicos y diferentes. Durante el primer periodo se trata de aplicar el gasto máximo que no produzca erosión objetable del suelo, a fin de que el agua llegue al final del surco en una cuarta o quinta parte del tiempo total requerido para el riego. Una vez que el agua haya llegado a la parte terminal del surco, el gasto debe reducirse, a fin de evitar pérdidas de agua por escorrentía. Aquí se inicia el segundo periodo del riego, durante el cual el gasto debe reducirse de manera tal que sólo satisfaga la infiltración del suelo en toda la longitud del surco considerado.
- B. El grado de erosión de un suelo aumenta con la pendiente del terreno, con el caudal de agua y con la erodabilidad del suelo. Los suelos más pesados y menos erodables admiten una mayor pendiente y un mayor caudal de agua durante

el primer período, y los suelos con mayor grado de infiltración admiten un caudal de agua mayor en el segundo período de riego.

Los suelos de textura pesada son menos susceptibles de erodarse y tienen también un menor grado de infiltración. Por la primera condición admiten mayores caudales de agua en el primer período, pero debido a la segunda condición requieren caudales menores en el segundo período.

- C. La longitud de un surco debe ser la máxima posible, con un caudal de agua que no produzca erosión del suelo y que permita la llegada del agua al final del surco en un tiempo relativamente corto, para asegurar uniformidad en la distribución del agua.

Los suelos con mayor pendiente y de textura pesada admiten surcos más largos, porque permiten una mayor velocidad del agua sin que ocurra erosión. Estas mismas condiciones admiten caudales mayores.

- D. El espaciamiento máximo entre los surcos será aquél que permita una adecuada y uniforme distribución lateral del agua en el suelo, o aquél que imponga el cultivo cuando se trata de plantaciones en surcos.

En resumen, los factores que afectan el gasto de agua en los surcos y la longitud y el espaciamiento de los mismos son: el grado de infiltración y la erodabilidad del suelo, factores éstos que están relacionados con la textura y también la pendiente del terreno y la clase de cultivo.

EQUIPO

Para la realización de este trabajo se usará el siguiente equipo:

1. Canaletas de derivación.
2. Canaletas de aplicación.
3. Palas.
4. Nivel de precisión, mira y cinta métrica.
5. Recipiente de aforo.
6. Cronómetro.
7. Estacas.
8. Barreno para suelos.

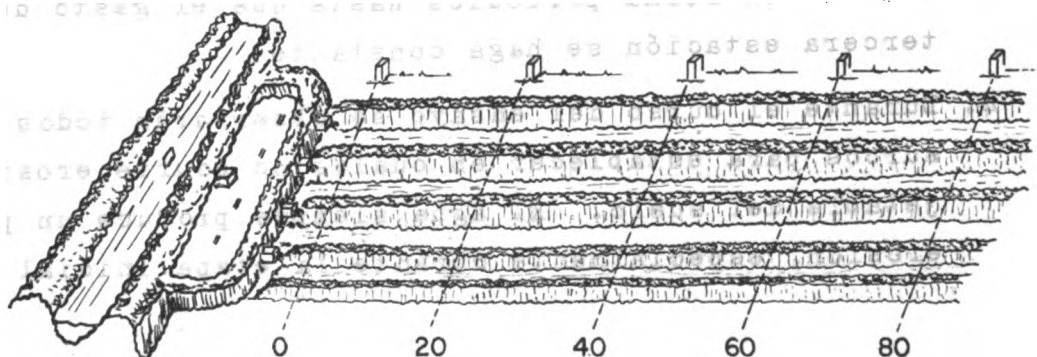
PROCEDIMIENTO

Para la realización de este ensayo se procederá en la forma siguiente:

A. Antes de aplicar agua a los surcos:

1. Construcción de 6 o más surcos.
2. Construcción de una zanja uniformadora en la cabecera de los surcos.
3. Colocación de una canaleta de aplicación en cada surco.
4. Colocación de una o dos canaletas de derivación entre la acequia de abastecimiento y la zanja uniformadora.
5. Colocación de estacas cada 20 metros, a lo largo de los surcos.
6. Determinación de la cota del terreno en cada una de las estacas.
7. Determinación del contenido de humedad del suelo para estimar la cantidad de agua necesaria para llevarlo hasta la capacidad del campo.

El esquema anexo ilustra la disposición general del área de trabajo.



B. Al aplicar el agua en los surcos:

1. Fijación de gastos diferentes en cada uno de los surcos, por medio de las canaletas de aplicación. Esto se hace aforando con un recipiente adecuado el gasto correspondiente. En el surco de un lado se tratará de poner un gasto máximo que produzca erosión del suelo, en tanto que en el otro surco lateral se colocará un gasto mínimo que apenas satisfaga el grado de infiltración del suelo en una longitud inferior a los 60 metros. En los otros surcos se pondrán gastos intermedios escalonados entre los gastos mínimo y máximo indicados.

El gasto promedio requerido puede estimarse por medio de la siguiente relación:

$$Q = 38/S$$

En donde:

Q = Gasto medio en litros por minuto.

S = Pendiente en porcentaje.

2. Se tomará la hora en que el agua comienza a fluir en cada surco y se determinará, luego, la hora en que el agua de cada surco llega a cada una de las estaciones marcadas con las estacas.
3. Uno de los surcos se usará para medir el grado de infiltración del suelo. Se aforará el agua en la estación 0 de dicho surco y también en la tercera estación colocada a 60 metros de la primera. Los aforos deben realizarse en forma periódica, hasta que el gasto de la tercera estación se haga constante.
4. Durante el curso del ensayo se observarán todos los surcos para establecer en cuáles no ocurre erosión objetable del suelo. El agua siempre produce un poco de erosión, especialmente durante la etapa inicial de riego.

go. Esto no debe objetarse, pero después de cinco minutos no debe ocurrir erosión en las paredes ni en el fondo del surco.

5. Dos días después de completados los trabajos anteriores, se cortará una zanja a través de uno de los surcos para observar la distribución del agua en el suelo.
6. Los datos requeridos se registrarán en formularios como los que se ilustran a continuación:

FORMULARIO N° 1

**FORMULARIO PARA REGISTRAR LA VELOCIDAD DE AVANCE
DEL AGUA EN SURCOS DE RIEGO**

Estación m	Cota m	Surco N°		Surco N°		Surco N°	
		Hora	Tiempo	Hora	Tiempo	Hora	Tiempo

FORMULARIO N° 2

FORMULARIO PARA REGISTRAR INFILTRACION EN SURCOS DE RIEGO

N° del surco	Aforo en Estación 0		Aforo en Estación 60		Infiltración	
	Hora	Gasto L/min	Hora	Gasto L/min	l/min/60m.	cm./Hora

RESULTADOS

Con los datos del formulario N° 1 se computará el tiempo acumulado empleado por el agua para avanzar a lo largo de los surcos hasta cada una de las estaciones marcadas por las estacas. Con esta información se elaborará para cada surco una curva que relacione el tiempo empleado por el agua en su proceso de avance, con la distancia recorrida por la misma. Las curvas correspondientes tendrán una forma similar a la que indica el gráfico N° 1 de estas instrucciones.

GRAFICO N° 1

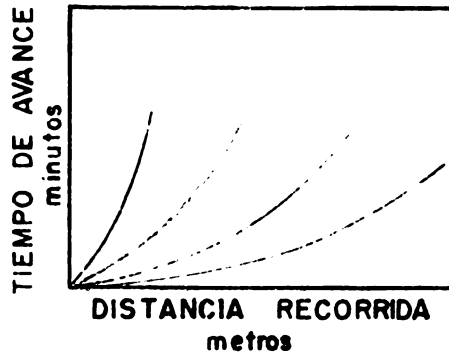
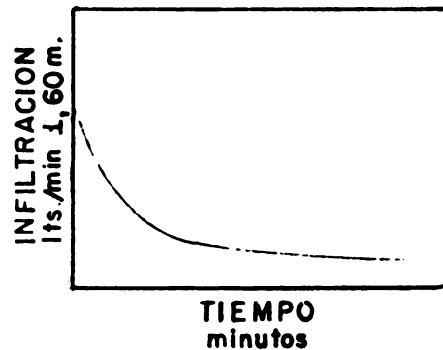


GRAFICO N° 2



Con los datos del formulario N° 2 se calculará el grado de infiltración para cada aforo que se hubiere hecho en la estación tercera del surco correspondiente. Esta infiltración se expresará en litros por minuto por cada 20 metros de longitud de surco y también en centímetros por hora. Las siguientes relaciones facilitarán estos cálculos:

- Q_e = Agua que entra al surco en litros por minuto.
- Q_s = Agua que sale al final de los 60 m. en litros por minuto.
- Q_i = $Q_e - Q_s$ = Agua que se infiltra en litros por minuto por 60 m.
- Q_{20} = $Q_i/3$ = Agua que se infiltra en litros por minuto por 20 m.
- E = Espaciamiento entre surcos en metros
- I = Infiltración en centímetros por hora.

$$\frac{E \times 20 \times I}{100} = \frac{Q_{20} \times 60}{1000}$$

$$I = \frac{0.3 Q_{20}}{E}$$

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de este ensayo se analizarán en la forma siguiente:

- A. Determinación del gasto necesario. El gasto más conveniente para las condiciones del ensayo realizado será el gasto máximo que no produjo erosión objetable del suelo.
- B. Determinación del tiempo necesario para el riego. El volumen total de agua necesario para un riego, lo dará la siguiente relación:

$$D_a = \frac{C.C. \times C.H.}{100} \times G_s \times D_s$$

- En donde:
- C.C. = Capacidad de campo en porcentaje.
 - C.H. = Contenido de humedad del suelo al tiempo del riego.
 - G_s = Densidad aparente del suelo.
 - D_s = Profundidad del suelo que se desea humedecer, en centímetros.
 - D_a = Espesor de la lámina de agua que debe aplicarse, en cm.

En el gráfico N° 2 se observará el grado de infiltración del suelo, cuando la infiltración se hace constante (porción horizontal de la curva). Con esta información podrá calcularse el tiempo necesario para el riego, por medio de la siguiente relación:

$$T = D_a / I$$

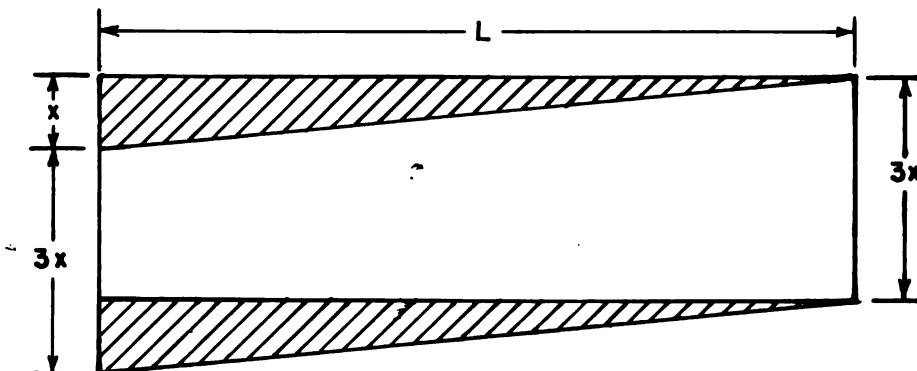
En donde: T = Tiempo necesario para el riego, en horas.

C. Determinación de la longitud máxima del surco. Por razones prácticas, el tiempo en que el agua debe llegar al final del surco se estima igual a una cuarta o quinta parte del tiempo total requerido para el riego.

Con esta información, que se justificará más adelante, se puede localizar en la vertical del gráfico N° 1, el tiempo necesario para que el agua llegue al final del surco, y desplazándose hacia la derecha en sentido horizontal se interceptará la curva correspondiente al gasto que no produjo erosión.

Bajando verticalmente desde este punto podrá encontrarse la longitud deseada para el surco.

Se justificará la conveniencia de que el agua llegue al final del surco en una cuarta o quinta parte del tiempo total necesario para el riego, a fin de obtener una máxima eficiencia en la aplicación del agua, como se demuestra por las relaciones siguientes:



Humedad aprovechada en zona de raíces = H_a

$$H_a = \frac{4x + 3x}{2} \times L = \frac{7x \cdot L}{2}$$

Humedad perdida por percolación = H_p

Porcentaje de agua perdida por percolación.

$$\frac{H_p}{H_a} \times 100 = \frac{\frac{x \cdot L}{2}}{\frac{7x \cdot L}{2}} \times 100 = \frac{xL}{7x \cdot L} \times 100 = \frac{100}{7} = 14.2\%$$

Ajuste del tiempo necesario para el riego y fijación del gasto para el segundo período.

- D. Como se indicó inicialmente, el riego por surcos ofrece dos etapas diferentes. Durante la primera se trata de aplicar el gasto máximo que no produzca erosión objetable en el suelo, a fin de que el agua llegue al final del surco tan rápidamente como sea posible. Si este mismo gasto se dejara hasta completar el riego, se perdería un exceso de agua por escorrentía al final del surco. Por esta razón durante la segunda etapa, que comienza cuando el agua ha llegado al final del surco, el gasto debe reducirse de tal manera que éste satisfaga solamente el grado de infiltración del suelo en toda la longitud del surco, con un ligero margen de aumento como prevención por las posibles diferencias físicas del suelo.

Resultará, entonces, necesario hacer un ajuste en el tiempo total de riego que se estimó antes, con base en las consideraciones anteriores y determinar asimismo, el gasto necesario durante la segunda etapa del riego.

Para esto se calculará el agua que ha penetrado en el suelo durante el primer período, cuya duración es conocida. El gasto de la segunda etapa puede calcularse con

base en el grado que caracteriza este período. El tiempo adicional necesario para completar el riego podrá calcularse en función de la diferencia entre el volumen total de agua que debe aplicarse y el volumen aplicado durante la primera etapa.

Hágase un análisis completo de los resultados obtenidos y establézcase los siguientes elementos:

1. Volumen total de agua que debe aplicarse en cada riego.
2. Longitud que debe darse a los surcos.
3. Gasto conveniente durante la primera etapa de riego.
4. Gasto conveniente durante la segunda etapa de riego.
5. Duración de la primera y de la segunda etapa y tiempo total requerido para el riego.
6. Considerando las pérdidas ocurridas por infiltración profunda y asumiendo un 10% de pérdidas por escorrentía al final del surco, calcúlese la eficiencia probable de aplicación, en un sistema de riego planeado de acuerdo con la información obtenida.

DISCUSION

Hágase una discusión general sobre el método estudiado, haciendo las observaciones que se estime convenientes, en cuanto a las limitaciones y deficiencias del trabajo realizado, y dando algunas sugerencias en cuanto a los procedimientos que podrían introducirse para mejorarlo.

Hágase también una discusión sobre los distintos factores que afectan la longitud y el espaciamiento de los surcos que gobiernan el gasto deseable durante los dos períodos que caracterizan este método de riego. Trátese de establecer la relación que existe entre los diversos factores y el valor relativo de los mismos.

EVALUACION DEL METODO DE RIEGO POR MELGAS; DETERMINACION DE LA LONGITUD Y EL GASTO QUE DEBE DARSE A LAS PLATABANDAS

OBJETIVO

El objetivo de este ejercicio es hacer una evaluación del método de riegos por melgas, y estudiar los factores que afectan la longitud y el ancho de las platabandas y el gasto que debe darse a cada una para obtener máxima eficiencia de aplicación.

EQUIPO

El equipo para este ejercicio está constituido por los siguientes elementos:

1. Nivel de precisión, mira y cinta métrica.
2. Estacas.
3. Cronómetro.
4. Palas.
5. Barreno agrológico.
6. Algún aparato aforador para medir el gasto que entra y que sale de la platabanda.
7. Infiltrómetro.

PROCEDIMIENTO.

Inicialmente se determinará el coeficiente de infiltración básico y la capacidad de retención de agua del suelo, operación que debe realizarse cuando el suelo está próximo al coeficiente de marchitez.

Posteriormente, antes de aplicar el agua a la platabanda, se procederá en la forma siguiente:

1. Escójase una platabanda y mídase el ancho de la misma.
2. Colóquense, luego, estacas cada 20 metros a lo largo de la platabanda y determínese la cota del terreno

en los puntos marcados.

3. Instálense los aparatos aforadores en la cabecera y al final de la platabanda.
4. Determínese la profundidad de la zona de raíces correspondiente al cultivo que se prospecta y hágase un estimativo de la cantidad de agua necesaria para humedecer esta zona hasta su capacidad de campo.
5. Por medio del gráfico () de la página hágase un estimativo del caudal de agua necesario y aplíquese este caudal a la platabanda. Una vez aplicada el agua a la platabanda, se tomarán los siguientes datos:
 - a. Hora en que el agua comienza a entrar en la platabanda y hora en que la lámina de agua llega a cada una de las estaciones.
 - b. Una vez que el agua ha llegado al final de la platabanda se aforará el agua que salga de ésta, en caso de que haya escurrimiento. Este aforo se hará en forma periódica hasta cuando concluya el flujo de agua.
 - c. El flujo de agua que entra a la platabanda se cortará después de transcurridas unas 3 o 4 horas. Se registrará la hora en que se suspende la entrada de agua y la hora en que la lámina de agua desaparece en frente de cada estación.
 - d. Compruébese la eficacia del riego explorando el perfil del suelo en varios puntos, por medio del barreno.

La información anterior se registrará en un formulario como el que se inserta a continuación:

FORMULARIO N° 1

REGISTROS SOBRE INFILTRACION

Hora de Observación	Tiempo transcurrido		Distancia del agua al punto de referencia		Agua infiltrada en c/. período		Infiltración acumulada	
	Entre Observ	Desde el comienzo	Antes llenar	Después llenar	Total	En cm/Hora	Total	En cm/Hora

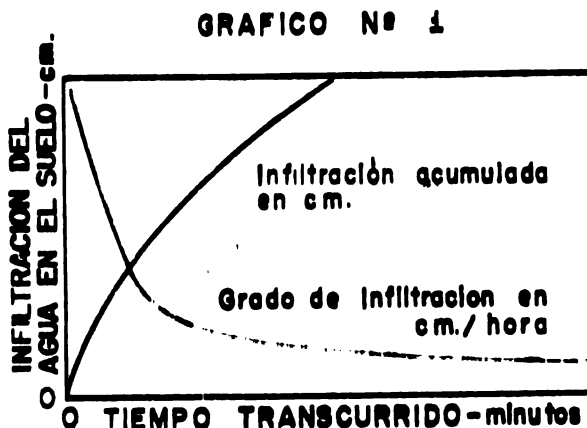
FORMULARIO N° 2REGISTRO DE LA VELOCIDAD DE AVANCE Y RECESION DEL AGUA
EN EL RIEGO POR "MELGAS"

Estación	Cota	Tiempo en que el agua permanece en el terreno				Aforo del Agua			
		Avance del Agua		Recesión del Agua		Estación Inicial 0 + 00		Estación de Salida	
		Hora	Tiempo	Hora	Tiempo	Hora	Gasto L/S	Hora	Gasto L/S

RESULTADOS

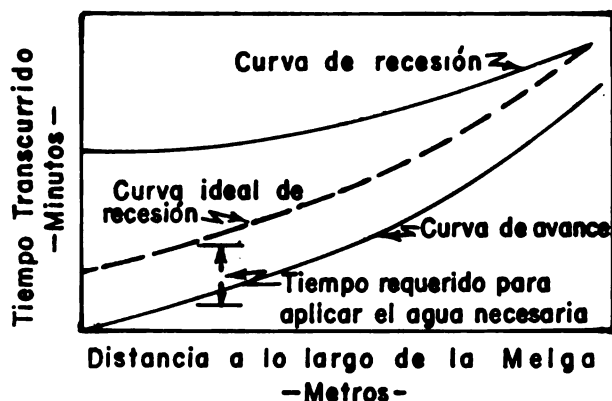
Una vez hechos los cálculos necesarios para completar los formularios de registro, se elaborarán dos gráficos, en la forma siguiente:

1. El gráfico N° 1 elaborado con la información del formulario N° 1, presentará la relación encontrada entre el grado de infiltración y el tiempo transcurrido. En este mismo gráfico se incluirá la curva de la infiltración acumulada contra el tiempo transcurrido. Las curvas en mención tendrán la apariencia general que se indica a continuación:



2. El gráfico N° 2 representará la velocidad de avance del agua en la melga y la velocidad de recesión de la lámina de agua. Las curvas correspondientes tendrán la apariencia general que se indica a continuación:

Gráfico N° 2



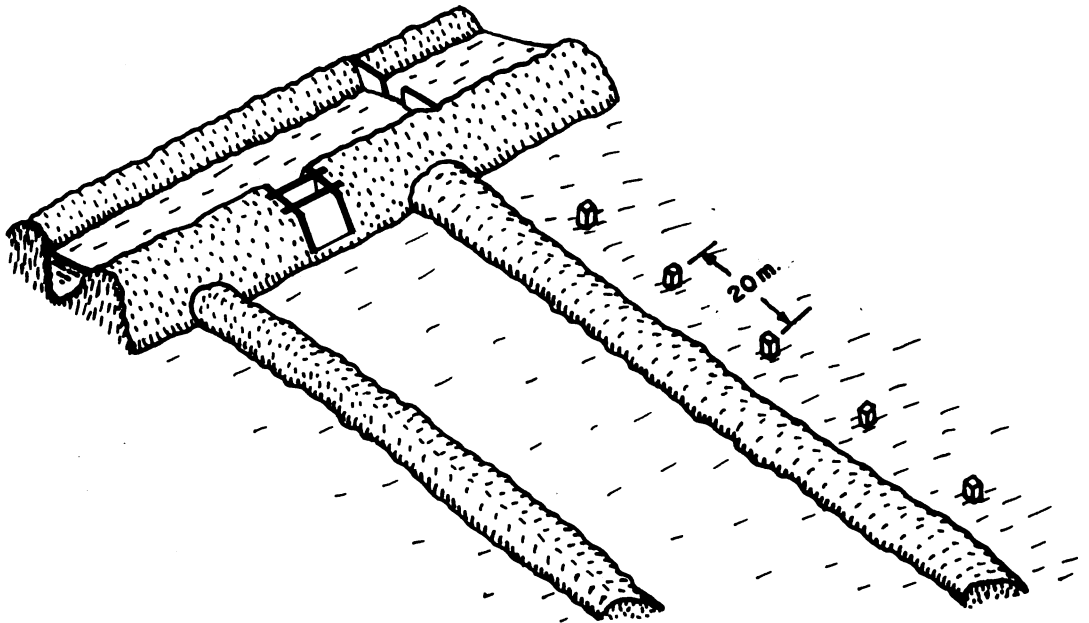
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para analizar estos resultados se procederá a calcular el espesor promedio de la lámina de agua aplicada a la platabanda, que será igual al volumen total de agua aplicada dividido por el área de la platabanda.

El espesor de la lámina de agua necesaria para el riego dividido por el espesor de la lámina aplicada, dará la eficiencia de aplicación del sistema. Una baja eficiencia de aplicación indicará que el sistema no es adecuado. Esta apreciación puede hacerse también observando el gráfico N° 2. En este gráfico la distancia vertical que media entre la curva de avance y la curva de recesión, representa el tiempo durante el cual el agua tuvo oportunidad de infiltrarse en el suelo. Para obtener un riego ideal, la distancia vertical entre ellos debiera ser uniforme e igual al tiempo necesario para que se infiltre el agua requerida para humedecer hasta su capacidad de campo el espe-

sor de suelo ocupado por la zona de raíces. Puede así dibujarse en el mismo gráfico la curva ideal de recesión, obteniendo la distancia vertical entre ésta y la curva de avance, con los datos sobre infiltración acumulada que aparecen en el gráfico N° 1.

El dibujo anexo indica la disposición general del campo de trabajo.



Para aproximarse a la curva de recesión ideal se puede variar el gasto de agua en la melga o la longitud de ésta, o ambos factores. Cuando se haya tomado una decisión en este sentido, se procederá a repetir el ensayo con los dos nuevos elementos seleccionados, en otra melga del mismo campo.

Para hacer la selección de los dos nuevos elementos se rá conveniente considerar las reglas siguientes :

1. Un gasto alto de agua aumenta la velocidad de ésta, lo que permitirá un avance más rápido del agua y una reducción en la distancia vertical entre las curvas de avance y recesión.
2. El gasto máximo será aquel que no produce erosión del suelo y que no provoque el desbordamiento del agua sobre los bordes que limitan la melga.
3. Un mayor coeficiente de infiltración admite gastos mayores.
4. Una melga corta requiere poco tiempo para la aplicación del agua, lo cual tiende a reducir la distancia vertical entre las curvas de avance y de receso, en su parte inicial.
5. Una eficiencia de aplicación próxima a 80% resulta satisfactoria.

Sobre la base de la explicación anterior, hágase un análisis completo de los resultados obtenidos, indicando la eficiencia de aplicación en el ensayo realizado y las posibles variaciones que sería necesario introducir en el gasto de agua y en la longitud de la melga, para asegurar una mayor eficiencia de aplicación y una mayor de distribución del agua.

DISCUSION

Hágase una discusión general sobre el trabajo realizado, haciendo las observaciones que se estime convenientes, en cuanto a las limitaciones y deficiencias del mismo. Indíquense algunas sugerencias en cuanto a los procedimientos que podrían introducirse para mejorar el método empleado.

Explíquese cuáles son los factores que entran en juego para proporcionar en forma adecuada el largo de las platabandas y el gasto correspondiente, en el riego por melgas, y cuál es la importancia relativa de estos factores.

EVALUACION DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSION

OBJETIVO.

Un buen sistema de riego por aspersión debe ajustarse a las condiciones de suelo, de clima y de cosecha para los cuales fué diseñado, y debe operarse en consonancia con estos factores.

Los principales elementos que caracterizan un buen diseño y una buena operación, pueden resumirse en la forma siguiente:

1. El grado de aplicación del sistema debe ser tal que no sobrepase la capacidad de infiltración del suelo.
2. El volumen total de agua aplicado en cada riego debe ser suficiente para humedecer el suelo hasta una profundidad igual a la profundidad de la zona de absorción radicular de la planta. Se justifican volúmenes mayores cuando el suelo requiere el lavado de sales nocivas.
3. La capacidad del sistema debe ser tal que permita reemplazar la humedad del suelo, por lo menos con la misma rapidez con que la planta consume agua en el período de máximo consumo.
4. El agua debe aplicarse al suelo de manera tal que asegure una distribución uniforme. Los factores que afectan la uniformidad de aplicación son: la distancia entre los laterales y los rociadores, y la presencia de vientos fuertes con dirección variable. La distribución se considera adecuada cuando la zona de mínima aplicación recibe un 80% del promedio aplicado en el área regada.
5. La pérdida de agua por evaporación o por transporte eólico no debe ser mayor de 10 o 15% de la capacidad total del sistema. Los factores controlables que afectan esta pérdida son, principalmente, el tamaño de los gastos de agua y el grado de aplicación de los rociadores.

6. El diámetro de las cañerías de distribución debe ser tal que produzca un balance económico entre el costo de los tubos y el costo de la potencia necesaria para bombear el agua.
7. El agua debe aplicarse de tal manera que no produzca daños físicos sobre la cosecha.

EQUIPO.

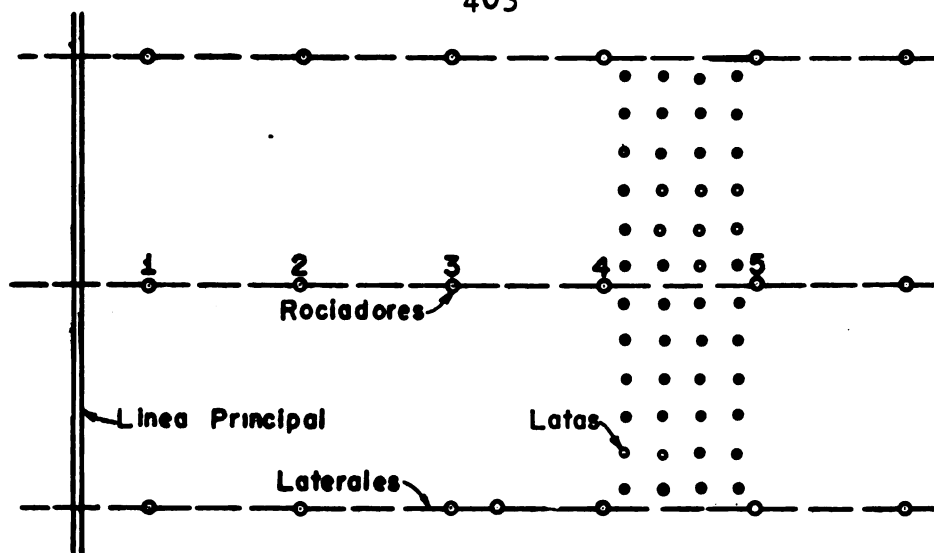
En este ejercicio se usarán los siguientes elementos:

1. Tubo de Pitot con su manómetro de presión.
2. Barreno de suelos y pala.
3. Cronómetro.
4. Recipiente calibrado con capacidad para dos galones.
5. Dos porciones de manguera de goma de 1.5 m. de longitud.
6. 50 latas con capacidad aproximada de un litro, cada una.
7. Probeta de 500 cc. de capacidad.
8. Cinta métrica.

PROCEDIMIENTO.

1. Con el barreno se observará el suelo hasta una profundidad igual a la profundidad de riego deseada y se estimará la cantidad de agua necesaria para llevar este suelo hasta su capacidad de campo.

2. Una vez que haya sido instalado por lo menos uno de los laterales del sistema, se procederá a colocar las latas de un litro en la forma indicada por el esquema de la página siguiente:



Si el suelo está desnudo, las latas deben enterrarse unos 4 cm. en el suelo para evitar que se vuelquen. Si el suelo está cubierto de vegetación baja, entonces serán sostenidos por medio de una estaca.

3. Los rociadores que cubren el área de estudio serán cubiertos con chuspas, para evitar que apliquen agua a esa área antes de que el sistema alcance la presión adecuada.

4. Luego se procede a medir la presión en los rociadores 4 y 5, usando el Tubo de Pitot y a continuación se aforará la descarga de dichos rociadores usando la lata de dos galones.

5. Se quitarán, entonces, las chuspas y se tomará la hora en que los rociadores comienzan a descargar agua sobre el área de estudio. El sistema continuará operando hasta cuando las latas de captación hayan recibido una precipitación de 5 cms. en promedio, o un poco más.

6. Mientras esto ocurre, se tomará la presión de los rociadores primero y último del lateral o laterales que se estudian,

y se harán las siguientes observaciones:

- a. Presión en la bomba si ésta tiene un manómetro en su tubo de descarga.
- b. Grado de infiltración del agua en relación con el grado de aplicación. El agua no debe empozarse.
- c. Daño físico causado en las plantas o en el suelo. Estos daños pueden ser caída de flores, Hojas o frutas, producida, por el impacto del chorro, o compactación del suelo por las gotas.
- d. Dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa.

7. Luego se cortará el suministro de agua y dos días después se observará con el barreno la distribución y penetración de agua en el suelo.

8. Posteriormente se procederá a medir la precipitación caída en cada una de las latas de captación. Para esto se usará la probeta graduada.

La información obtenida se registrará en formularios similares a los que se ilustran en las páginas siguientes:

FORMULARIO N° 1. CONDICIONES DE OPERACION

Hora inicial del ensayo _____ Hora final _____

Duración del ensayo _____

Dirección del viento _____ Velocidad viento _____

Temperatura _____ Humedad relativa _____

Presión de la línea principal: en la bomba _____ al final
de la línea _____

Observación sobre grado de aplicación de agua _____

GASTO DE LOS ROCIADORES

Rociador N°			Rociador N°		
P lbs/pulg ²	Tiempo pa ra llenar recipien- te. Segs.	Gasto gal/min.	P lbs/pulg ²	Tiempo pa ra llenar recipien- te.segs.	Gasto gal/min.

FORMULARIO N° 2. GRADO DE APLICACION EN CADA LATA

	a	b	c	d	Total
N	1				<input type="text"/>
	2				
	3				Promedio del Total
	4				<input type="text"/>
	5				
	6				
S	1	⊖		⊖	Promedio del 25% con mínima aplicación
	2				
	3				
	4				
	5				<input type="text"/>
	6				

FORMULARIO N° 3. INFORMACION GENERAL SOBRE EQUIPO Y OPERACION

Rociadores: Marca _____ Modelo _____ N° de boquillas _____

Tamaño boquillas _____ Gasto _____ Presión _____

Laterales: N° de laterales _____ N° de rociadores/lateral _____

Espaciamiento entre rociadores _____ Espaciamiento

entre laterales _____ Altura de los rociadores _____

Longitud _____ Diámetro _____

Principal: N° de válvulas de salida _____ Espaciamiento entre

válvulas _____ Longitud _____ Diámetro _____

Bomba: Marca _____ Modelo _____ Capacidad _____

Carga _____ Motor _____ Potencia _____

Agua: Fuente de abastecimiento _____ Gasto Disponible _____

Operación: Número de posiciones de los laterales para cubrir todo el campo _____ No. de posiciones por día _____
 No. de laterales que operan simultáneamente _____
 No. de horas que los laterales operan por día _____
 Tiempo destinado para mover lateralmente _____
 No. de rociadores que operan simultáneamente _____

RESULTADOS.

Una vez que se hayan realizado los cálculos necesarios para completar el formulario N° 2 se tendrán todos los resultados de esta prueba.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

El análisis de los resultados se hará para valorar el sistema de riego estudiado, sobre la base de los siguientes factores:

1. Frecuencia de los riegos.

El número de días que transcurre entre dos riegos sucesivos lo dará la relación entre el volumen de agua que el suelo puede retener y el consumo de agua durante la época de máximo uso.

2. Uniformidad de Aplicación.

A fin de obtener la precipitación real aplicada en cada punto del área estudiada, los volúmenes de agua captados por las latas colocadas al sur del lateral B deben sumarse en el orden correspondiente a los volúmenes captados por las latas al norte de dicho lateral. En esta forma se asume que los rociadores 4 y 5 descargan hacia el sur la misma cantidad de agua cuando el lateral se mueva de la posición B a la posición A. La suma de las precipitaciones captadas en todas las latas, dividi-

do por la mitad del número de éstas dará la precipitación promedio sobre el área que se estudia.

Para determinar el grado de uniformidad en la distribución se obtendrá el promedio de la precipitación captada en el 25% de las latas que tuvieron la menor precipitación. Este promedio, dividido por el promedio total de aplicación, dará una medida del grado de uniformidad obtenido. Una uniformidad del 80% es satisfactoria.

3. Pérdidas de Agua.

El agua que descargan los rociadores, expresada en pulgadas de profundidad, da la siguiente relación:

$$P = \frac{96.3 \times Q \times T}{Er \times El}$$

Donde: Q = Descarga de un rociador en gal/min.

T = Tiempo de operación en horas.

Er = Distancia entre rociadores en pies.

El = Distancia entre laterales en pies.

P = Espesor de la lámina aplicada sobre el área de estudio en pulgadas.

La diferencia entre el espesor de la lámina aplicada y el espesor promedio de la lámina captada por las latas, representa el agua perdida por evaporación o por transporte del viento.

4. Eficiencia de Aplicación.

La eficiencia de aplicación es la relación entre la precipitación promedio captada por el 25% de las latas que recibieron menor cantidad de agua y la precipitación promedio aplicada por los rociadores.

5. Eficiencia de distribución del lateral.

La relación entre el promedio de la precipitación del 25% de las latas con precipitación mínima y el promedio de aplica-

ción de todo el lateral, representa la eficiencia de distribución del lateral.

La aplicación promedio del lateral se obtiene sustrayendo a la descarga del primer rociador, $3/4$ de la diferencia entre la descarga del primero y del último rociador del lateral.

6. Tiempo requerido para cada posición del lateral.

El volumen que se requiere en cada riego, dividido por el volumen aplicado por hora, dará el número de horas que el lateral debe permanecer en cada posición.

7. Número de movimientos del lateral por día.

Divídase 24 horas por el número de horas requerido para cada posición del lateral, por el producto entre el número de movimientos diarios del lateral y el número de laterales.

8. Capacidad del sistema.

Multiplíquese el gasto promedio de cada rociador por el número total de rociadores que operan simultáneamente.

9. Carga total sobre la bomba.

La presión obtenida en el tubo de descarga de la bomba más la profundidad del agua en el pozo o acequia, dará la carga total sobre la bomba.

DISCUSION.

Sobre la base del análisis realizado hágase una discusión general del trabajo, anotando las deficiencias del sistema de riego que se ha estudiado e indicando cómo podrían subsanarse dichas deficiencias.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS
de la Organización de los Estados Americanos
ZONA ANDINA
PROYECTO 39 - PROGRAMA DE COOPERACION TECNICA
LIMA - PERU

LISTA DEL EQUIPO UTILIZADO DURANTE LAS PRACTICAS EJECUTADAS
EN EL CURSO INTERNACIONAL DE RIEGOS Y AVENAMIENTOS, 1957

Dirección: Kern & Co. Ltd., Aarau, Suiza

<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio Aproximado</u>	
		<u>en US \$</u>	
		<u>Unitario</u>	<u>Total</u>
4	Teodolitos Kern DK2 con trípode	495.00	1980.00
4	Niveles Kern NK2 con trípode	220.00	880.00
4	Winches metálicos de 25 m.	7.90	31.60
16	Jalones	4.20	67.40

National Agricultural Supply, Fort Atkinson, Wisconsin, USA., o

Nebraska Plastics, Cozad 2B Nebraska, USA

10	Sifones de 1½" de diámetro	1.55	15.50
20	Sifones de 1" de diámetro	0.90	18.00

Irrigation Engineering Co., 3018 Foothill Blvd. Pasadena, California, USA.

2	Tensiómetros de 2' con indicador de mercurio	24.00	48.00
2	Tensiómetros de 1' con indicador de mercurio	20.00	40.00
2	Tensiómetros de 6" con indicador de mercurio	18.00	36.00

Industrial Instruments Inc., 89 Commerce Road, Cedar Grove, Essex County, New Jersey, USA.

1	Determinador de humedad de Bouyoucus	125.00	125.00
30	Bloques de yeso con sus alambres	1.25	37.50

Dirección: Robert McNairn Machine Works, 1431 2nd St.
Sacramento, California, USA.

<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio Aproximado</u>	
		<u>en US \$</u>	
		<u>Unitario</u>	<u>Total</u>
2	Tubos toma-muestras para suelos, del tipo Veihmeyer, con sus puntas y cabezas de percusión	11.00	22.00
1	Martillo para la percusión	8.00	8.00
<u>National Rainbird Sales, 627 North St. Gabriel, Azusa, California, USA.</u>			
2	Tubos de Pitot para aforo de rociadores	0.80	1.60
2	Manómetros de Bourdon con amplitud de 0-100 lb/ \square " y rosca de acople a tubos de Pitot	4.00	8.00
<u>Equipo para adquisición local.</u>			
4	Tableros de dibujo de 0.45 x 0.65 cm.	3.50	14.00
4	Reglas T de 0.70 cm.	3.50	14.00
4	Escuadras de 45°	0.50	2.00
4	Escuadras de 60°	1.20	4.80
1	Medidor de corriente con capacidad suficiente para el equipo de bombeo que vaya a utilizarse	25.00	25.00
1	Trozo de manguera de goma de 2 m. de long. y $1\frac{1}{2}$ " de diám.	1.00	1.00
2	Trozos de manguera de 1 m. de longitud y de 1" de diámetro	0.50	1.00
4	Latas vacías de 5 lt. de capacidad	0.25	1.00
48	Latas vacías de 1 lt. de capacidad	0.01	0.48
20	Tubos de vidrio de 2 ó 4 cm. de diámetro y de 0.60 cm. de long.	0.30	6.00
200	Latas con capacidad para 650 g. de suelo y provistas con tapa de ajuste perfecto.	0.05	10.00

Equipo para Construcción local

<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio Aproximado</u>	
		<u>en USA \$</u>	
		<u>Unitario</u>	<u>Total</u>
1	Aforador Parshall construido de madera	8.00	8.00
1	Orificio rectangular para aforo de agua en canales, de 15 x 30 cm..construido de madera	2.00	2.00
1	Vertedero rectangular con cresta de 45 cm..construido de madera	2.00	2.00
1	Vertedero triangular (90°) con profundidad del vértice de 45 cm.. construido de madera	2.00	2.00
1	Vertedero Cipolletti con cresta de 40 cm..construido de madera	2.00	2.00
500	Estacas de madera de 1.20 m.de longitud para trabajos de nivelación	0.05	25.00
2	Canaletas de riego con sección de 15 x 15 cm..y longitud de 1 m. y compuerta reguladora de lámina galvanizada	2.50	5.00
8	Canaletas de riego de sección de 6 x 6 cm..y longitud de 0.60 m.	1.00	8.00
1	Tranca de lona de 2,5 x 1,8 m. con su tubo de soporte de 1" diám.	12.00	12.00
2	Varillas para determinar penetración de agua de 1.20 m.de long. y 1½" de diám.provistas con manija en forma de T.	0.50	1.00
1	Sonda eléctrica con batería de 6 voltios, bombilla y 50 m.de cable revestido de caucho N° 20	10.00	10.00
1	Orificio circular de 2" de diám. para aforo de agua en tuberías.	6.00	6.00
2	Infiltrómetros de anillo doble de 25 cm de diám.y exterior de 45 cm.construido de lámina de fierro galvanizado N° 20	2.50	5.00
2	Cajas aforadoras de 10 m.de capacidad construidas de lámina de fierro galvanizado N° 20	2.50	5.00

Cualquier casa fabricante de equipo de laboratorio como las que se indican en la lista anexa

<u>Cantidad</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio Aproximado</u>	
		<u>en US \$</u>	
		<u>Unitario</u>	<u>Total</u>
1	Balanza de platillos de aproximación de 0.01 g. y caja de pesas de 0.01 a 200 g.	30.00	30.00
1	Estufa para determinación de humedad de suelos (temperatura 105°C)	180.00	180.00

ELEMENTOS DE HIDROLOGIA

Hidrología es la ciencia que estudia la distribución del agua en la naturaleza, ya sea en las capas superiores de la atmósfera, o en la superficie de la tierra o en los estratos subterráneos, y los métodos o sistemas disponibles para valorar en forma cualitativa o cuantitativa la magnitud de los fenómenos físicos asociados con el movimiento y distribución de estas aguas.

EL CICLO HIDROLOGICO

Toda el agua presente en la naturaleza está en continuo movimiento. De los océanos o grandes masas de agua hacia la atmósfera, en forma de vapor; de la atmósfera hacia la tierra, en forma de lluvias, y de la tierra hacia los océanos en forma de escorrentía. Considerado el globo terráqueo todo como una unidad, la lluvia y la evaporación son exactamente iguales. Este proceso rotativo del agua en la naturaleza se denomina el ciclo hidrológico. La figura N° 1 ilustra todos los fenómenos físicos y biológicos que intervienen en el desarrollo de este ciclo. Estos fenómenos pueden agruparse en cuatro grandes grupos: Precipitación, evaporación, infiltración y escorrentía.

LA PRECIPITACION

La precipitación o lluvia es un fenómeno atmosférico por virtud del cual el vapor de agua acumulado en la atmósfera, en forma de nubes, se condensa y cae a la superficie de la tierra en forma líquida o sólida. Para que se produzca la precipitación es necesario que una masa de aire caliente y cargado de humedad sufra un proceso de enfriamiento, que haga posible la condensación. Según la naturaleza del fenómeno que produzca el enfriamiento, las precipitaciones se clasifican en

tres tipos principales: 1) tormentas debidas al contacto entre una masa de aire tibia y húmeda con otra fría y relativamente seca. 2) Tormentas debidas al ascenso por convección de grandes masas de vapor de agua que se enfrían en las capas superiores de la atmósfera y 3) tormentas debidas al enfriamiento de las masas húmedas de aire cuando ascienden sobre las montañas.

Las leyes meteorológicas que regulan la distribución de las lluvias son realmente complejas y no han podido aún establecerse con exactitud. Los siguientes factores determinan en mayor o menor grado la precipitación en un área determinada: 1) la proximidad a los océanos o a los lagos, 2) la presencia de cordilleras que interceptan el paso de los vientos húmedos y 3) la localización geográfica del área considerada, en la ruta de las tormentas ciclónicas (Ref. 11).

En los estudios hidrológicos la información más corrientemente necesaria en cuanto hace relación a la precipitación en una localidad dada, puede resumirse en la forma siguiente:

1. Precipitación anual total.
2. Distribución de la precipitación por estaciones, meses o semanas.
3. Intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones máximas.

Medida de la Precipitación

La precipitación se mide en milímetros o en pulgadas de agua que en un tiempo determinado han caído sobre un área dada. El aparato usado para medir la precipitación se denomina pluviómetro, cuyo tipo "standard" está constituido por un cilindro metálico de 8 pulgadas de diámetro y 24 pulgadas de longitud, dentro del cual se ajusta un embudo que descarga en un cilindro interior con diámetro de 2.53 pulgadas. De esta manera, el área del cilindro interior es 10 veces menor que el área superior del embudo y, en consecuencia, se multiplica por

lo el espesor de la lámina de agua recogida. La profundidad del agua en el cilindro se mide con una regla graduada en milímetros. La figura 2 ilustra la construcción de un pluviómetro de tipo "standard". En la práctica, los registros pluviométricos deben hacerse diariamente y a una misma hora.

Cuando se desea obtener datos sobre la intensidad y duración de las tormentas, será necesario instalar un pluviómetro registrador o pluviógrafo. Este aparato está provisto de una aguja accionada por un flotador u otro tipo de mecanismo, el cual registra la manera como se desarrolla la tormenta, en un papel enrollado a un cilindro movido por un reloj. La figura N° 3 ilustra el registro de una tormenta obtenido con un pluviógrafo de tipo gravimétrico.

Precipitación Anual

La precipitación anual representa el volumen total de agua que cae anualmente sobre una región o localidad dada. Este volumen total de precipitación varía considerablemente de un año para otro, por lo cual el dato correspondiente tiene una importancia limitada, a menos que los registros se hayan tomado durante un número considerable de años y la información se haya analizado para determinar los límites de desviación correspondientes. La Tabla N° 1 indica la desviación probable entre el promedio de varios períodos de registro y el promedio total de 30 años en Huancayo. El grado de desviación probable aumenta considerablemente, a medida que disminuye la duración del período de registros. Las precipitaciones máximas y mínimas pueden variar en un 50 o un 60% por encima o por debajo del promedio total (Ref. 11).

La precipitación total permite una clasificación muy general de las distintas regiones del mundo en zonas húmedas, subhúmedas y desérticas, y ofrece una idea general en cuanto a la ne-

cesidad del riego y el valor promedio de la escorrentía en una zona determinada.

Tabla 1

Desviación de la precipitación media anual con relación al promedio de 30 años según la duración de los registros, en el área de Huancayo. (Promedio de 30 años, 1922-1952: 723 mm.)

N° de años	Desviación Standard
1	+ 113
5	+ 48
10	+ 17
20	+ 2
30	0

Precipitación Promedio sobre un Area

Para obtener la precipitación promedio de un área determinada, generalmente es necesario instalar varios pluviómetros, distribuidos en dicha área. En tales casos, para obtener el promedio ponderado de la precipitación se procede a determinar el área de influencia de cada pluviómetro, por medio de los polígonos de Theisen, o se construyen curvas isohietas similares a las curvas de nivel en topografía, las cuales ofrecen una representación gráfica de la forma como se distribuye la precipitación dentro del área.

Polígonos de Theisen

Para determinar la precipitación promedio sobre un área con el uso de los polígonos de Theisen, se asume que la precipitación caída sobre un punto cualquiera del área, es igual a la precipitación recogida en el pluviómetro más próximo a dicho

punto. Los polígonos se construyen como se ilustra en la figura 4, uniendo por medio de líneas rectas los puntos de localización de los pluviómetros y trazando luego normales a dichas líneas. El área total quedará así dividida en áreas menores, cada una de las cuales representa la zona de influencia del pluviómetro que contiene. La precipitación promedio del área total lo dará la siguiente relación:

$$P_p = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + \dots + P_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Curvas Isohietas

Las curvas isohietas se construyen como las curvas de nivel en topografía, asumiendo que la precipitación entre dos pluviómetros varía en proporción con la distancia, lo cual permite interpolar las curvas. La figura 5 ilustra este método. La precipitación promedio será obtenida, como en el caso anterior, sumando el producto de las áreas influenciadas por cada curva, por el valor de la precipitación correspondiente y dividiendo por el área total.

Las curvas isohietas se emplean también para mostrar cómo se distribuye la precipitación anual en un país o departamento. Los mapas así producidos permiten una apreciación general del fenómeno de la precipitación en la región considerada.

Precipitación Estacional o Mensual

Una información sobre la distribución estacional o mensual de las lluvias permite diferenciar los períodos húmedos de los períodos secos. Puede, establecerse así el régimen de las lluvias durante las diferentes épocas del ciclo anual y establecerse, en consecuencia, los probables requerimientos de riego o de drenaje durante los períodos considerados. Debe considerarse también aquí que la precipitación mensual también varía considerablemente para un mismo mes en años diferentes, de tal mane-

ra que cualquier predicción que vaya a hacerse en este sentido será sólo aproximada y sujeta a la desviación del promedio que se haya calculado con base en muchos años de registro. Las lluvias promedio mensuales en el área de Huancayo se indican en la Tabla 2, calculada con base en los registros de 32 años. En esta tabla puede observarse la tremenda desviación del promedio que debe esperarse en los meses lluviosos del año.

Tabla 2

Precipitación media mensual y desviación standard para un periodo de 32-33 años en el área de Huayao, Perú (Ref. 10).

Meses	N° de años	Precip. Media mm.	Desviación Standard
Enero	32	131.5	37.1
Febrero	33	111.0	32.8
Marzo	33	114.2	44.6
Abril	33	52.7	22.8
Mayo	33	25.9	20.9
Junio	33	10.1	7.8
Julio	32	7.5	7.6
Agosto	32	14.8	12.1
Septiembre	32	46.6	22.5
Octubre	32	63.9	19.9
Noviembre	32	73.0	30.2
Diciembre	32	88.0	34.4

Intensidad, Duración y Frecuencia de las Lluvias

La intensidad de las lluvias representa la razón de caída de agua y, generalmente, se expresa en milímetros por hora. La duración es el tiempo transcurrido entre la iniciación y el término de una intensidad que se asume uniforme, y se expresa en minutos. La frecuencia representa el número de veces que un fenómeno determinado puede ocurrir dentro de un lapso conocido y usualmente, se expresa en porcentaje. El intervalo de ocurrencia expresa el número probable de años que debe trans

currir para que ocurra un evento de intensidad o magnitud igual o mayor que la estudiada.

La intensidad, la duración y la frecuencia de las lluvias, constituyen valores importantes para establecer los elementos de diseño de las obras de riego y de drenaje, y para el control de erosión e inundaciones.

Aún cuando no existen relaciones fijas entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las lluvias, las siguientes reglas generales han podido establecerse con base en la experiencia: 1. Las lluvias con alta intensidad cubren, en general, áreas relativamente pequeñas y son de corta duración; 2. Las lluvias de larga duración cubren áreas relativamente grandes y caen con una baja intensidad; 3. La magnitud y la intensidad de las lluvias son inversamente proporcionales a la frecuencia con que ocurren; 4. No existe una relación constante entre el volumen total de la precipitación anual y la intensidad, magnitud o número de aguaceros que cae, en una localidad dada; 5. La precipitación anual media es un índice aproximado de la escorrentía total; 6. En las tormentas con menos de una hora de duración, del 65 al 95% de la lluvia cae en el período de máxima intensidad, el cual dura entre el 20 y el 40% de la duración total. En esta forma, en el período más recio de la tormenta la intensidad es de 1.6 a 4.75 el valor de la intensidad media (Ref. 11).

En las obras de ingeniería hidráulica el ingeniero está interesado en conocer la frecuencia con que ocurren las tormentas con máxima intensidad en un período de duración determinada o períodos de duración diferentes. La selección del intervalo de la ocurrencia dependerá de la magnitud e importancia de la obra y de la naturaleza del peligro que su falla produciría.

Con base en los registros de un pluviógrafo resulta posible analizar una tormenta dada, estableciendo la intensidad de

la precipitación para distintos periodos de duración y, cuando sea necesario, elaborando el diagrama de masas correspondiente. Las figuras 6 y 7 representan las curvas de masa y de intensidad de la precipitación, correspondientes a la tormenta registrada en la carta pluviométrica de la figura 3. El diagrama de masas representa la curva acumulativa de la precipitación e indica el volumen total de agua caída en periodos consecutivos de tiempo hasta el final de la tormenta. El histograma de intensidad muestra cómo ha variado la intensidad de la precipitación a través de toda la tormenta.

Para la preparación de estos gráficos conviene tabular la información suministrada por la carta pluviométrica. Para esto, se selecciona en la carta pluviométrica los puntos en que varía la intensidad de la precipitación, lo cual no ofrece dificultad porque la pendiente de la curva es directamente proporcional a la intensidad de la precipitación. Luego se tabularán los registros y los cálculos como se indica en la tabla 3.

Tabla 3

Análisis de una Tormenta

Hora	Intervalo Tiempo min.	Tiempo Acumul. min.	Lluvia Interv. mm.	Lluvia Acumul. mm.	Intensidad Interv. mm/hora
4:05	<u>25</u>	25	<u>10</u>	10	24
4:30	40	65	13	23	19.5
5:10	25	90	16	39	38.4
5:35	10	100	17	56	102.0
5:45	15	115	14	70	56
6:00	10	125	13	83	78
6:10	55	170	17	100	18.6
7:05	95	265	10	110	6.3
8:00					

Cuando sea necesario calcular las intensidades máximas para diferentes períodos definidos de duración, se procederá a calcular primero la intensidad máxima ocurrida en cada duración considerada. Las intensidades máximas para diferentes períodos de duración, correspondientes a la tormenta analizada en la tabla 3, se ofrecen en la tabla 4.

Tabla 4

Intensidades máximas para diferentes períodos de duración

Duración (min.)	5	15	30	60	120	240	480
Intens. (mm/hora)	102	87	76	60	41	27	14

Determinación de la Frecuencia

Si un análisis como el que se ha indicado anteriormente, se realiza para todas las tormentas caídas en un año, será posible obtener las intensidades máximas de la precipitación para distintos períodos de duración en ese año. Y si este mismo análisis se ejecuta para todos los años de registro disponible, será entonces posible estimar la frecuencia probable de las intensidades máximas para los varios períodos de duración considerados. La frecuencia la dará la siguiente relación:

$$F = \left(\frac{n}{N} \right) 100 \quad \text{y} \quad T = \left(\frac{1}{f} \right) 100$$

- Donde:
- f = porcentaje de años durante los cuales ocurrirá un evento igual o mayor que el evento señalado por el ordinal n.
 - n = Número de orden correspondiente al evento cuya frecuencia se desea. Este número representa la magnitud relativa del evento.
 - N = Número total de eventos que se estudian.
 - T = Intervalo de ocurrencia para un evento con frecuencia f.

Con el análisis que se ha esbozado pueden obtenerse tablas que relacionen la intensidad de la precipitación con la duración y la frecuencia para una localidad o área determinada. La tabla 5 ofrece las intensidades máximas de la precipitación para la zona sur del Estado de Louisiana en los Estados Unidos,

donde se han registrado las intensidades de precipitación más altas para ese país.

Tabla 5

Intensidades máximas de la precipitación en mm/hora para duraciones e intervalos de ocurrencia diferentes, en la región al sur del Estado de Louisiana, U.S.A. (Preparada con datos de referencias 12 y 5).

Frecuencia en años	Intensidades máximas en mm/hora						
	Duración en minutos						
	5	15	30	60	120	240	480
2	188	132	99	63	38	23	11
5	213	155	114	76	46	28	13
10	224	165	124	81	51	30	16
25	246	183	137	94	63	36	19
50	259	190	147	102	69	41	22
100	277	208	162	114	81	46	26

La figura 8 representa las intensidades máximas de la precipitación para los períodos de duración diferente y para intervalo de ocurrencia de 5 años en las proximidades de Manizales, Colombia (Ref. 8).

La intensidad de la precipitación para una localidad determinada, en la cual se hayan realizado estos estudios, puede expresarse en función de la duración considerada por medio de una fórmula general para cada frecuencia, que tiene la forma siguiente:

$$I = \frac{a}{t + b}$$

Donde: I = Intensidad máxima de la precipitación en mm. para una duración t.

t = Período de duración considerado en minutos.
a y b son constantes que varían según la localidad.

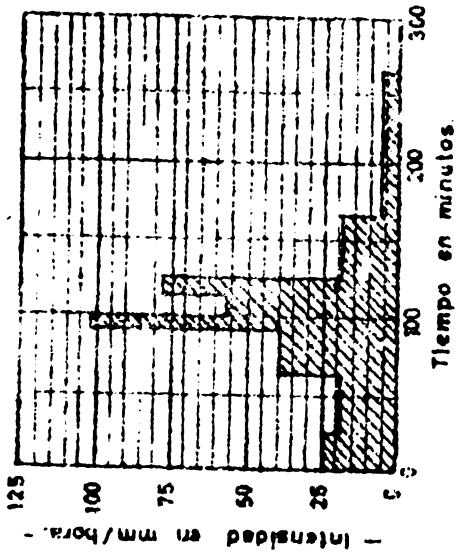


Fig No 6 - Mistrograma de la intensidad.

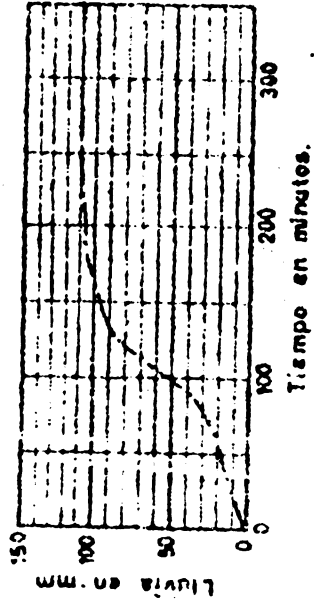


Fig. No 7 - Diagrama de masas.

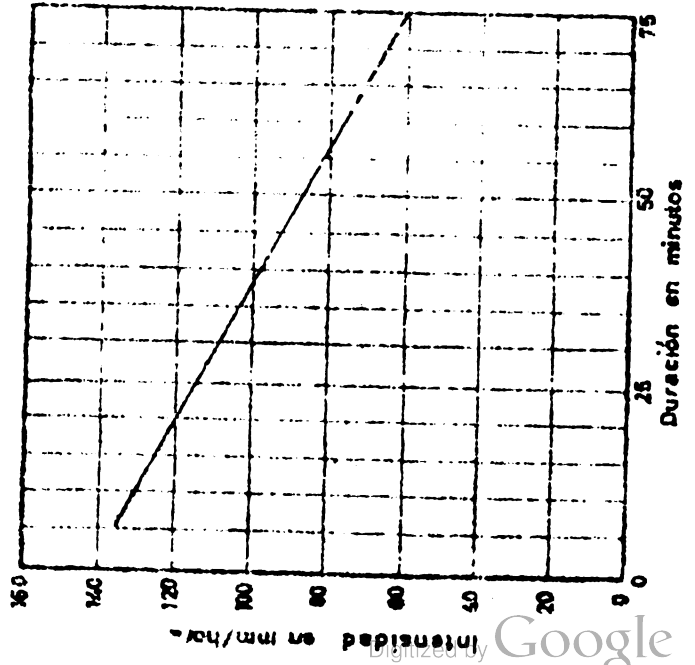


Fig. No 8 - Intensidades máximas de la precipitación para periodos de duración diferente y frecuencia de 5 años, en Chanchiná, Col.

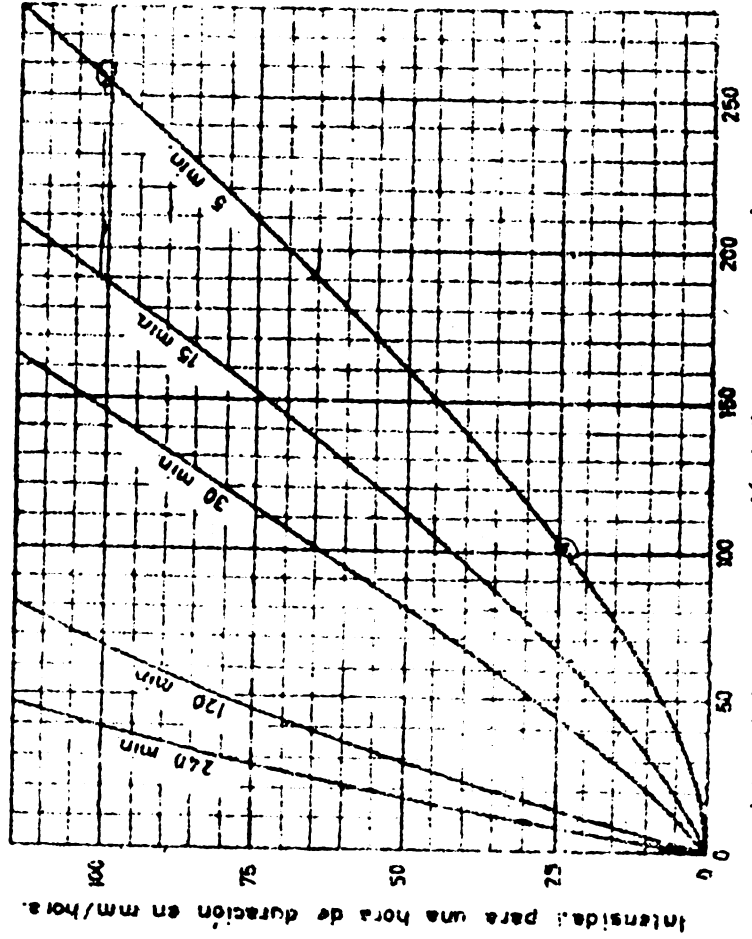


Fig. No 9 - Intensidad para la duración indicada por el parámetro - mm/hr

Para frecuencia de 2 años, los valores de a y b, en la fórmula anterior, correspondientes al Sur de Louisiana, U.S. A., son aproximadamente de 5500 y 25, respectivamente y los mismos valores para una frecuencia de 5 años en Chinchiná, Colombia, son de 9750 y 66.8. Estos valores se han calculado con los datos de la tabla 5 y de la figura 8, respectivamente.

Cuando se tiene la intensidad máxima de la precipitación para una duración determinada y se desea obtener la intensidad máxima de la precipitación para otra duración, Hathaway (5) ha desarrollado el gráfico de la figura 9. Así, si la intensidad máxima de la precipitación en una localidad fuera de 76 mm. por hora, para una duración de una hora, la intensidad máxima para una duración de 15 minutos sería de 155 mm/hora.

LA EVAPORACION

La evaporación es un fenómeno físico por virtud del cual el agua pasa a la atmósfera en estado de vapor. Los factores que afectan la evaporación son: la naturaleza de la superficie de evaporación y la diferencia de presión del vapor, que está a su turno determinada por la temperatura, la velocidad del viento, la presión atmosférica y el grado de salinidad del agua.

Según la naturaleza de la superficie de evaporación pueden distinguirse: la evaporación que ocurre en una superficie de agua libre, como en los reservorios, los lagos y los océanos, y aquella que se produce en el suelo.

La evaporación de una superficie libre de agua puede estimarse por medio de algunas fórmulas propuestas para este fin.

Una de éstas es la fórmula de Meyer, que se ofrece a continuación:

$$E = C (V - v) \left(1 + \frac{W}{16} \right)$$

- Donde:
- E = Evaporación en mm/24 horas.
 - V = Presión del vapor saturado a la temperatura del agua en mm. de mercurio.
 - v = Presión del vapor saturado a la temperatura del aire a una altura de 8 m. en mm. de mercurio.
 - W = Velocidad del viento a una altura de 8 metros sobre la superficie en Km/hora.
 - C = Constante que varía entre 0.36 para reservorios profundos de más de 10 m. de profundidad y 0.5 para reservorios o lagos de escasa profundidad.

Debido a las instalaciones que son necesarias para determinar los valores que entran en esta fórmula, su uso es bastante limitado.

La evaporación se mide también por medio de recipientes de dimensiones y características uniformes, como el evaporímetro de la Oficina Meteorológica de los Estados Unidos. Este evaporímetro está constituido por un recipiente circular de lámina de fierro galvanizado, el cual tiene un diámetro de 4 pies y una profundidad de 10 pulgadas. Su instalación debe hacerse de tal manera que el fondo quede a una altura de 6 pulgadas sobre el suelo para que el aire circule libremente por la parte inferior del recipiente. La profundidad del agua en el recipiente debe mantenerse entre 7 y 8 pulgadas.

Para estimar la evaporación de un reservorio con base en los datos suministrados por un evaporímetro como el que se ha descrito arriba, es necesario introducir un coeficiente de corrección que varía entre 0.65 y 0.95, según las características de la localidad en el mes considerado.

La evaporación de agua del suelo está regulada por los mismos factores discutidos arriba, pero es afectada, además, por el contenido de agua del suelo. La cantidad de agua evaporada del

suelo puede estimarse en forma aproximada por medio del gráfico de Meyer, que da la evaporación de grandes áreas de tierra en función de la temperatura y de la precipitación, figura 10. Los valores de la evaporación obtenidos con este gráfico deben multiplicarse por un coeficiente que varía entre 1.25 y 0.6, según la topografía, las propiedades físicas del suelo y las características de humedad y velocidad media del aire en el área considerada.

LA TRANSPIRACION

La transpiración es el proceso de emisión de agua a través de las hojas de las plantas. Este proceso es afectado por los mismos factores que afectan la evaporación y también por la cantidad de luz solar disponible y por la densidad de la cobertura vegetal. Los capítulos relacionados con los "Requisitos de Agua de las Plantas" y la "Economía del Agua de las plantas" ofrecen una discusión más amplia sobre este importante proceso.

LA EVAPOTRANSPIRACION

El concepto de evapotranspiración, que involucra los fenómenos de evaporación y transpiración de manera conjunta, ha sido introducido debido a la dificultad que existe para separar con precisión los dos valores y por la conveniencia de usar este concepto que representa el consumo de agua en una plantación dada.

Varios métodos han sido propuestos para calcular la evapotranspiración o consumo de agua en una localidad dada. Estos métodos y las fórmulas correspondientes están principalmente basadas en datos meteorológicos, tomando la temperatura como factor principal. Aún cuando se reconoce que estos métodos no son rigurosamente exactos, los valores aproximados que es posible

calcular con ellos y la relativa facilidad con que pueden obtenerse los datos básicos necesarios para el cálculo, hacen de dichos métodos un instrumento muy útil.

En el capítulo relacionado con los "Requisitos de Agua de las Plantas" se discute el método desarrollado por Blanney y Criddle (2). En esta sección nos ocuparemos del método propuesto por Thornthwaite (9) para estimar la evapotranspiración potencial.

Método de Thornthwaite

La evapotranspiración potencial representa el volumen de agua que las plantas consumirían en una localidad dada si dicho volumen de agua estuviera disponible en el suelo.

La fórmula de Thornthwaite para la evapotranspiración potencial, es la siguiente:

$$e = 1.6 \left(10 \frac{t}{I} \right)^a$$

- Donde:
- e = Evapotranspiración potencial en cm. para el mes considerado (meses de 30 días).
 - t = Temperatura media mensual en grados centígrados.
 - I = Índice anual de calor, el cual tiene la siguiente expresión:

$$I = \sum i = \sum \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

- i = Índice mensual de calor, dado por la siguiente expresión:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

- a = Un exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad y que tiene la siguiente expresión:

$$a = 0.0000006751 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.01792 I + 0.49239$$

Los valores de "e" que se obtengan con la fórmula anterior son para meses de 30 días, considerando 12 horas diarias de sol. Por esta razón, los valores así obtenidos, deben multiplicarse por medio de un factor de corrección que depende del número de días del mes considerado y de la latitud del lugar, la cual determina el número de horas diarias de sol en dicha localidad.

La naturaleza compleja de estas fórmulas impone el empleo de tablas y gráficos que faciliten su aplicación.

El procedimiento a seguir para la determinación de "e" se explica a continuación:

1) Determínese el índice anual de calor, I, para la localidad considerada. Este índice está constituido por la suma de los índices mensuales, (i), los cuales varían en función de la temperatura media mensual. La tabla 6 da los valores de i para temperaturas que varían entre 0 y 40 grados centígrados.

Tabla 6

Indices mensuales de calor (i) para distintas temperaturas medias mensuales (t) (Ref. 9)

t	i	t	i	t	i	t	i
1	0.09	11	3.30	21	8.78	31	15.84
2	0.25	12	3.76	22	9.42	32	16.62
3	0.46	13	4.25	23	10.08	33	17.41
4	0.71	14	4.75	24	10.75	34	18.22
5	1.00	15	5.28	25	11.44	35	19.03
6	1.32	16	5.82	26	12.13	36	19.86
7	1.66	17	6.38	27	12.85	37	20.70
8	2.04	18	6.95	28	13.58	38	21.56
9	2.44	19	7.55	29	14.32	39	22.42
10	2.86	20	8.16	30	15.07	40	23.30

2) Determínese para cada mes la evapotranspiración potencial por medio del nomograma que se presenta en la figura 11 o usando la tabla anexa a dicho nomograma, cuando la temperatura

Duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días con 12 horas de sol cada una (Ref. 9)

Lat.	E.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
10	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
5	1.00	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
0	1.02	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.04	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
45	1.31	1.10	1.07	0.91	0.81	0.71	0.78	0.90	0.99	1.17	1.26	1.36
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

Ejemplo: Determinese la evapotranspiración potencial en el valle del Rimac por medio del método de Thornthwaite.

Solución:

t°C	E.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Año
20.7	22.5	21.7	18.8	17.2	17.0	16.7	15.8	15.1	14.9	16.3	19.1		
i	8.6	9.7	9.2	7.3	6.5	6.4	6.2	5.7	5.2	6.0	7.6		83.7
e(30d-12h)	8.2	9.0	8.5	7.1	6.2	6.1	5.3	4.7	4.0	6.0	8.0		77.3
e(neh)	8.9	8.7	8.8	7.0	6.2	5.9	5.3	4.7	4.2	6.3	8.8		79.0

(*) Nota de los reeditores: Debe revisarse esta tabla.

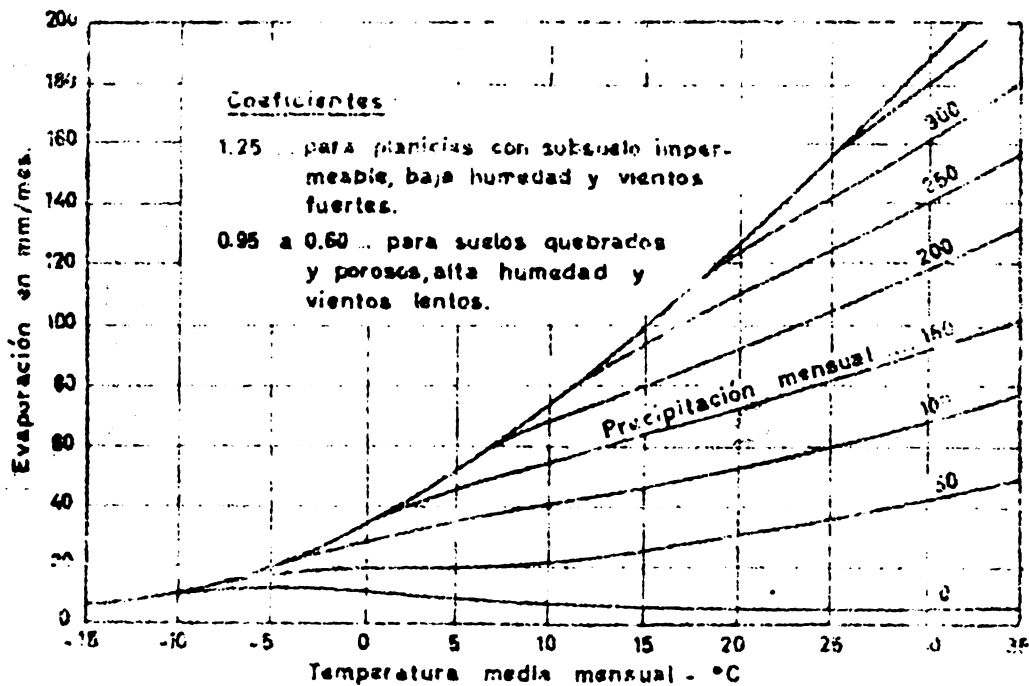
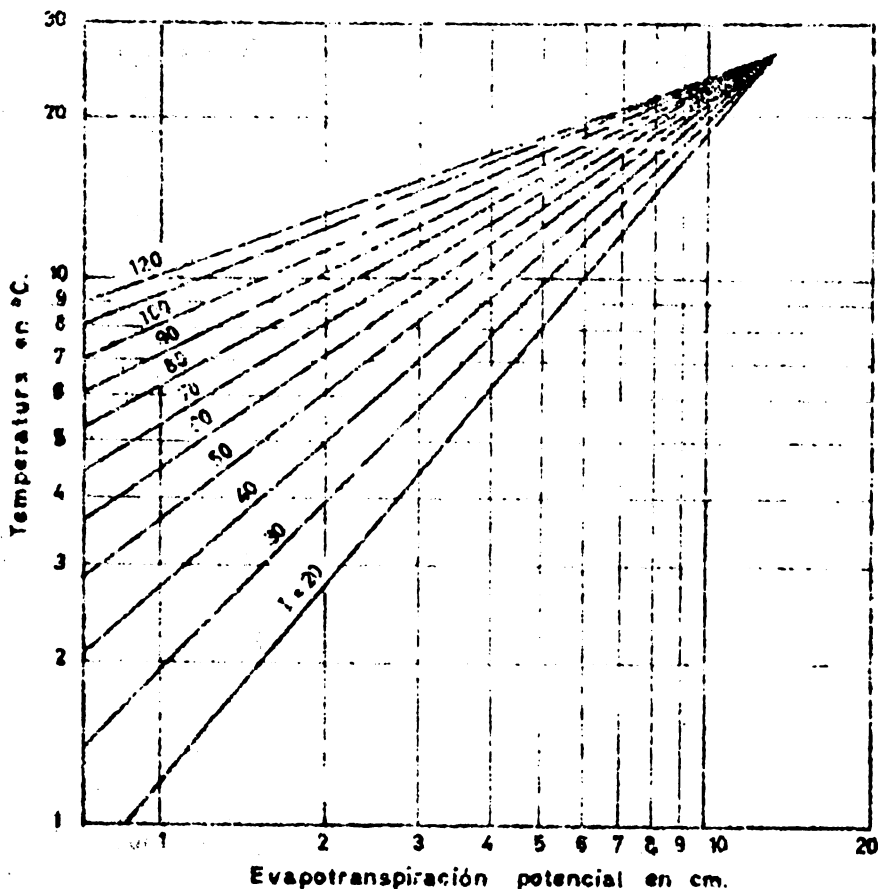


Fig. N° 10. - Evaporación del suelo.



T °C	P.E.
27.0	13.95
27.5	14.37
28.0	14.78
28.5	15.17
29.0	15.54
29.5	15.89
30.0	16.21
30.5	16.52
31.0	16.80
31.5	17.07
32.0	17.31
32.5	17.53
33.0	17.72
33.5	17.90
34.0	18.05
34.5	18.18
35.0	18.29
35.5	18.37
36.0	18.43
36.5	18.47
37.0	18.49
37.5	18.50
38.0	18.50

Fig. N° 11. - Nomograma y tabla para determinar evapotranspiración potencial.

media mensual sea mayor que 26.5°C . Los valores de "e" obtenidos con este gráfico corresponden a meses de 30 días con 12 horas de sol cada uno.

3) Corrijanse los valores de "e" obtenidos arriba, según la duración real de cada mes y de cada día, para lo cual, dichos valores deben multiplicarse por un factor de ajuste que se obtiene en la tabla 7.

LA INFILTRACION

La infiltración es el proceso de penetración de agua en el suelo y se mide, lo mismo que la precipitación, en mm/hora. Los factores que afectan este proceso son muy numerosos y de naturaleza muy compleja, lo cual dificulta la determinación de la infiltración en un área o cuenca determinada. Los factores principales que afectan la infiltración son: el contenido de humedad del suelo, el tipo y la densidad de la cobertura vegetal, la altura de la napa freática, el desarrollo de microorganismos en el suelo, los procesos de lixiviación que pueden, en ciertos casos, formar un "hardpan" de escasa permeabilidad, etc.

Debido a los muchos factores que afectan la capacidad de infiltración, resulta difícil estimar con algún grado de precisión su verdadero valor, a menos que el estimativo se haga con base en determinaciones directas.

Varios métodos se usan para determinar la capacidad de infiltración de un suelo o de una cuenca determinada. Estos métodos pueden agruparse en dos grandes grupos: aquellos basados en medidas directas por medio de infiltrómetros y aquellos que se basan en el análisis de los registros de precipitación y de escorrentía en una cuenca natural.

Hay, en general, dos tipos de infiltrómetros: los de tipo de anillo, como el que se ilustra en la figura 12, en los cuales la razón de infiltración se establece midiendo periódicamente el

descenso del nivel del agua puesta en un cilindro previamente forzado en el suelo, y los que usan rociadores. Estos últimos se aplican principalmente en trabajos de conservación de suelos. El método consiste en limitar, por medio de barreras metálicas, un área de terreno que varía entre 1 y 50 metros cuadrados sobre el cual se aplica una precipitación simulada por medio de rociadores especialmente diseñados para el caso. La razón de aplicación se determina primero, recogiendo la precipitación sobre una cubierta impermeable, obteniendo así toda la lluvia como escorrentía total. Posteriormente, se retira la cubierta impermeable y se mide periódicamente la escorrentía que produce el área considerada. En esta forma, por diferencia, se obtiene el grado de infiltración del área bajo estudio.

La capacidad promedio de infiltración en una cuenca, puede establecerse analizando los registros de precipitación y de escorrentía de dicha cuenca. El método consiste esencialmente en sustraer la razón de escorrentía de la razón de precipitación y corregir esta diferencia en función de la detención que sufre el agua en la superficie del terreno o en los cauces, hasta producir una carga que produzca el flujo del agua.

LA ESCORRENTIA

Dentro del ciclo hidrológico, la escorrentía es la cantidad de agua que fluye sobre la superficie del terreno o a través de los cauces subterráneos hacia los cauces naturales y finalmente hacia los océanos.

La determinación de las escorrentías máxima o mínima, según el caso y la frecuencia de las mismas, así como el volumen total de la escorrentía, tiene importancia especial en las obras de riego y drenaje, porque de ellas depende el tamaño de los canales y de las estructuras en las obras de desagüe y en los embalses para riego o para control de inundaciones y porque esta-

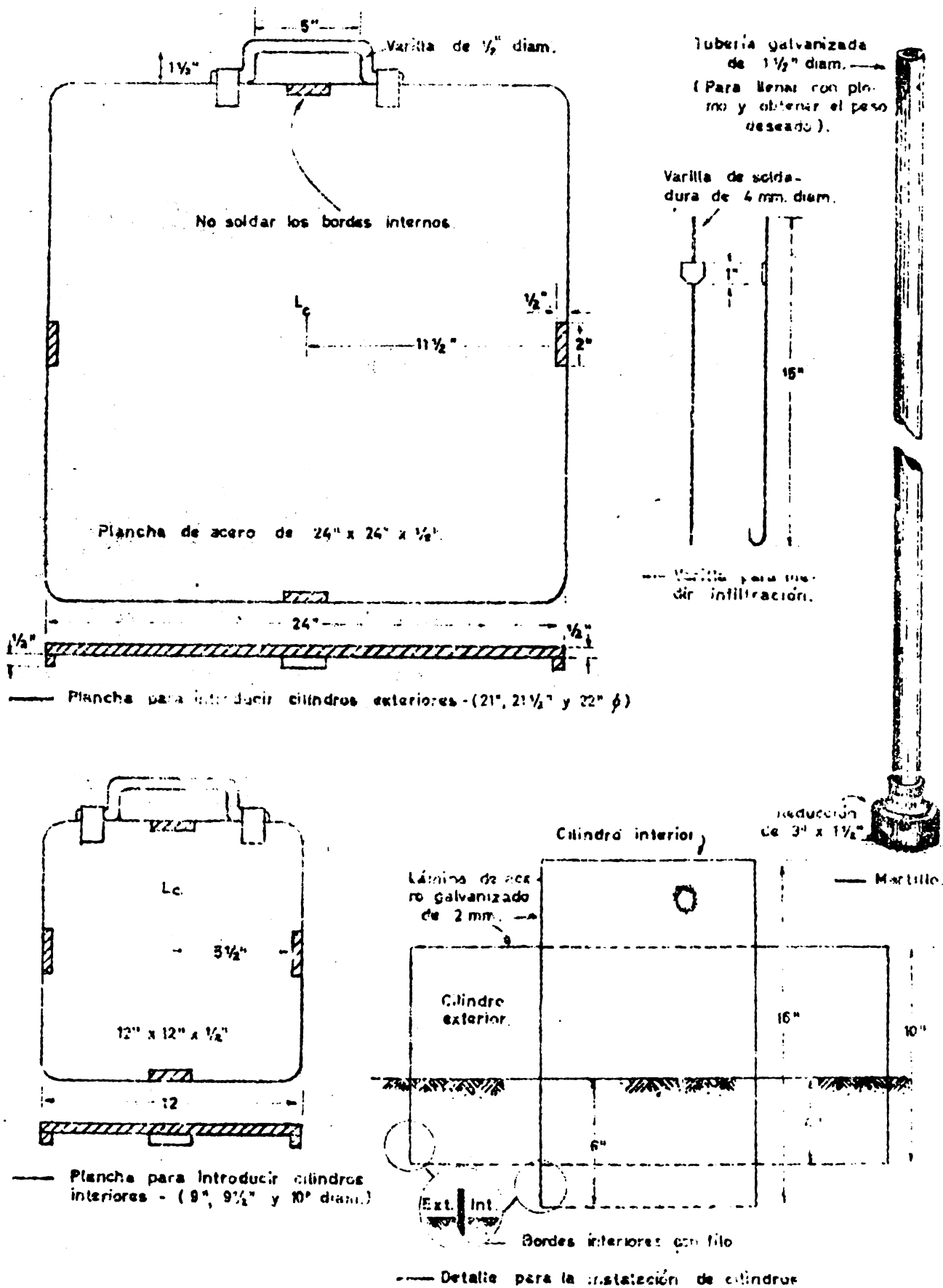


FIG. N° 12.- EQUIPO PARA PRUEBAS DE INFILTRACION CON CILINDROS INFILTROMETROS

blece la disponibilidad de agua y, en consecuencia, el área regable dentro de un proyecto de riego que se estudie. La escorrentía se mide directamente por medio de estaciones de aforo establecidos en los cauces, ya sea por medio de vertederos o estableciendo una curva de calibración para la sección del cauce considerado. Esta curva de calibración, que relaciona la altura del nivel del agua en la sección con el caudal de agua correspondiente, (ver figura 11 del capítulo sobre aforo), se elabora por medio de aforos periódicos, a medida que varía el caudal en el cauce. Conviene que la sección escogida sea estable y de fácil acceso, lo cual explica por qué muchas de las estaciones de aforo en cauces naturales están localizadas cerca de los puentes. Los aforos se ejecutan usualmente con un corrientómetro o molinete, como se explica en el capítulo sobre "Aforo de Aguas". Una vez establecida la curva de calibración, para obtener el caudal en un momento dado será necesario medir la altura del nivel del agua en la sección, para lo cual se colocará a un lado del cauce, una mira permanente que permita lecturas rápidas o un mecanismo que registre en forma continua el nivel del agua.

Los registros obtenidos por medio de estas estaciones de aforo pueden analizarse siguiendo los mismos métodos empleados para el análisis de la precipitación. En virtud de estos datos pueden obtenerse los caudales máximos y los caudales mínimos, y establecerse la frecuencia con que ocurren.

Muy frecuentemente no se cuenta con los registros de escorrentía necesarios para hacer un análisis confiable que permita la obtención de valores para usar en el diseño. En estos casos cuando se trate de grandes proyectos, convendrá proceder a la instalación de las estaciones de aforo necesarias en el cauce y de varios pluviómetros o pluviógrafos en la cuenca bajo estudio.

En proyectos más pequeños, que son los que más directamente encajan dentro del enfoque de este manual, la escorrentía puede estimarse con base en los análisis de la precipitación, empleando luego alguno de los métodos propuestos para este fin, como el llamado "método racional".

El Método Racional

Este método permite hacer estimativos de los caudales máximos de escorrentía con base en las intensidades máximas de la precipitación.

Para elaborar la ecuación fundamental de este método se ha asumido que el caudal máximo de escorrentía, Q , es directamente proporcional a la intensidad máxima de la precipitación (I) en el tiempo de concentración, y al área de la cuenca. El "tiempo de contracción" representa el tiempo que demora una partícula de agua para trasladarse desde el punto más remoto de la cuenca hasta el punto de desagüe. Cuando haya transcurrido este tiempo, toda la cuenca estará contribuyendo simultáneamente a formar el caudal de la escorrentía y ésta tendrá, en consecuencia, un valor máximo. El coeficiente de proporcionalidad (C) se ha denominado coeficiente de escorrentía, y representa la relación entre la escorrentía y la precipitación. Este coeficiente varía según las características físicas y topográficas de la cuenca y según la cobertura vegetal de la misma.

La ecuación tendría, así, la forma siguiente:

$$Q = C I A$$

En el cual Q resultaría en m^3 por hora, I se expresaría en metros por hora y A en metros cuadrados.

Para que Q resulte en metros cúbicos por segundo, expresando I en milímetros por hora y A en hectáreas, es necesario hacer un balance dimensional que produce la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C I A}{360}$$

En esta ecuación se asume que la precipitación ocurre con una intensidad uniforme durante un período igual o mayor que el tiempo de concentración, y que la intensidad de la precipitación es uniforme sobre toda el área de la cuenca. Estas premisas no son exactamente válidas, por lo cual el uso del "método racional" se ha limitado a cuencas no mayores de unas 1500 hectáreas.

La tabla 8 ofrece distintos valores de "C", según las características topográficas de la cuenca y según la naturaleza de la cobertura vegetal existente.

Tabla 8

Valores de "C" en la fórmula del "método racional" (Ref.6)

Características de la cuenca	
Vertientes onduladas (Pendiente de 5 a 10%)	
Cultivos generales	0.60
Cultivos de pastos	0.36
Cultivos de bosques	0.18
Áreas desnudas	0.80
Vertientes inclinadas (Pendiente de 10 a 30%)	
Cultivos generales	0.72
Cultivos de pastos	0.42
Cultivos de bosques	0.21
Áreas desnudas	0.90

El "tiempo de concentración" puede calcularse por medio de las fórmulas siguientes:

$$T_c = 0.0256 K^{0.77}$$

$$K = \frac{L}{\sqrt{S}} = \sqrt{\frac{L^3}{H}} \quad (\text{ref. 7})$$

- Donde: T_c = Tiempo de concentración en minutos.
 L = Longitud máxima de recorrido del agua en metros.
 S = Pendiente general = $\frac{H}{L}$
 H = Diferencia de altura entre el punto más remoto y el punto de desagüe, en metros.

La intensidad, I , de la precipitación que se usa en la ecuación fundamental, será la intensidad máxima que ocurra con una duración igual al tiempo de concentración. La frecuencia de esta intensidad máxima se tomará teniendo en cuenta la finalidad de la estructura que va a proyectarse y los riesgos que implicaría una posible falla de dicha estructura. Para obtener los valores de I será necesario hacer un análisis de la precipitación en el área bajo estudio, siguiendo los métodos indicados anteriormente, cuando se discutió la precipitación.

Ejemplo: Determinése la escorrentía máxima que ocurrirá con una frecuencia de 5 años, en el área de Chinchiná, Colombia, en una cuenca como la que se ofrece en la figura 13, cubierta de bosques.

Solución: Con planímetro se determina sobre el plano el área de la cuenca = 735 Ha. El valor de C para una cobertura de bosques y una pendiente general de 3%, es, aproximadamente, igual a 0.18.

El máximo recorrido de una gota de agua desde el punto más remoto de la cuenca hasta el punto de desagüe es igual a 4800 m. y la diferencia de elevación entre estos dos puntos es igual a 32m. En esta forma $S = 0.0067$ y el valor de K se obtendrá como se indica enseguida:

$$K = \frac{4.800}{\sqrt{0.0068}} = 58650$$

El tiempo de concentración será, entonces:

$$T_c = 0.0256 (58650)^{0.77} = 120 \text{ minutos}$$

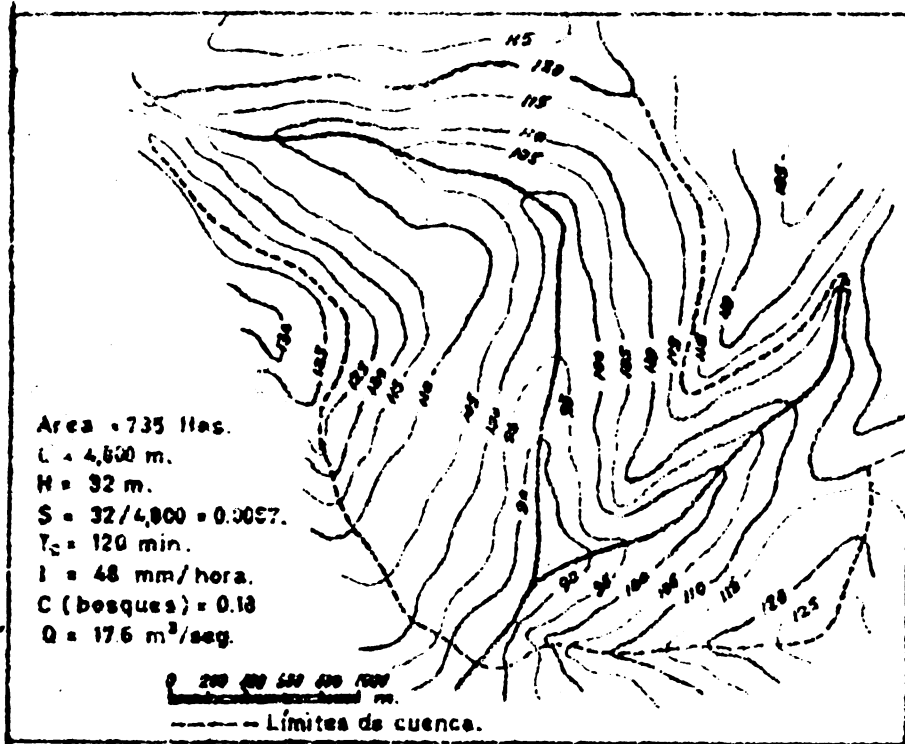


Fig N° 13.- Plano topográfico de una cuenca Ejemplo 2.

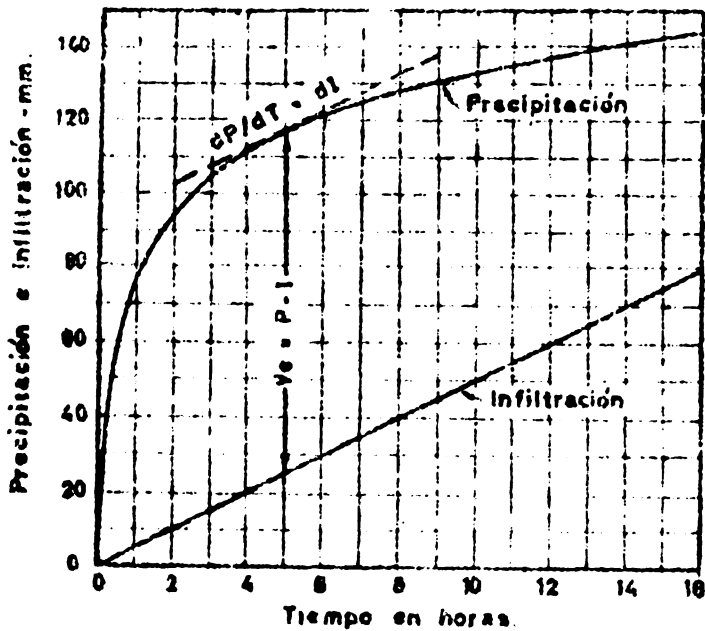


Fig N° 14.- Determinación del volumen máximo de escorrentía.

Como el nomograma para la intensidad de la precipitación en Chinchiná no ofrece información sobre la intensidad para una duración de 120 minutos, se obtiene la intensidad para una duración de 60 minutos, que es igual a 77 mm. por hora, y por medio del nomograma de la figura 9 se obtiene la intensidad de la precipitación para una duración de 120 minutos, la cual resulta igual a 48 mm/hora. El caudal máximo de escorrentía se buscará, entonces, aplicando la fórmula del método racional.

$$Q = \frac{0.18 \times 735 \times 48}{360} = 17.64 \text{ m}^3/\text{seg}$$

En algunas estructuras resulta necesario estimar el volumen total máximo de escorrentía que puede producirse en una cuenca, con una determinada frecuencia. En los embalses, este máximo volumen de escorrentía permitiría estimar el volumen de almacenamiento posible, por encima de la cresta del aliviadero. El volumen máximo de escorrentía que es susceptible de ocurrir con una frecuencia determinada, puede establecerse por medio de un análisis de los registros de la escorrentía, cuando tales registros existan.

Cuando no se disponga de esta información, el volumen máximo de escorrentía puede estimarse por medio de un análisis que establezca la diferencia acumulada entre la precipitación con intensidad máxima susceptible de caer con la frecuencia escogida, y la infiltración efectiva mínima en la cuenca considerada. La figura 14 presenta las curvas de lluvia e infiltración acumuladas para la cuenca del ejemplo anterior. Para la elaboración de la curva de precipitación se ha procedido en la forma siguiente: en la figura 8 se ha determinado la intensidad máxima de la precipitación en una hora, que es de 77 mm.

por hora. Luego, con la ayuda de la figura 9, se han determinado las intensidades máximas de la precipitación, correspondientes a períodos de diferente duración y los datos correspondientes se han tabulado como se indica a continuación:

Tiempo en min.	Tiempo en horas	Intensidad en mm/hora	Lluvia total acumulada en mm.
5	0.08	212	17.6
15	0.25	154	38.5
30	0.5	114	57.0
60	1.0	77	77.0
120	2.0	47	94.0
240	4.0	28	112.0
480	8.0	16	128.0
960	16.0	9	114.0

La línea de infiltración acumulada se ha elaborado asumiendo una razón de infiltración constante, igual a 5 mm. por hora.

En el gráfico de la figura 14 puede observarse que el volumen máximo de escorrentía, para el ejemplo que se considera, ocurrirá a las 5 horas y será igual a una lámina de agua de 92 mm. Este máximo volumen se producirá cuando la pendiente de la curva de precipitación sea igual a la pendiente de la línea de infiltración, o sea, cuando $dP/dT = dI$.

El volumen total máximo de escorrentía que puede ocurrir en la cuenca de este ejemplo, con una frecuencia de 5 años, será, entonces, de:

$$\frac{92}{1000} = 735 \times 10000 = 677000 \text{ m}^3$$

Hidrogramas de Escorrentía

Un hidrograma de escorrentía es un gráfico que relaciona el caudal de la escorrentía con el tiempo. Este caudal, al iniciarse una tormenta arranca de un mínimo, que es el caudal normal del cauce, llega a un máximo, cuando ha transcurrido el tiempo de concentración y declina nuevamente en forma progresiva, a su nivel normal.

En algunos estudios hidrológicos, conviene establecer el hidrograma correspondiente a la escorrentía máxima susceptible de ocurrir con una determinada frecuencia. La carencia de registros de escorrentía de larga duración, que hagan posible el análisis correspondiente, ha conducido al desarrollo de los llamados hidrogramas, unitarios sintéticos (Ref. 3,4,11).

Un hidrograma unitario es el gráfico de la escorrentía correspondiente a una tormenta y el hidrograma unitario sintético es un gráfico generalizado en que el caudal de escorrentía para cualquier tormenta, expresado en porcentaje del total, se relaciona con el tiempo, expresado también en porcentaje del tiempo total que dura la avenida.

La figura 15 ofrece las coordenadas del hidrograma unitario sintético. En éste el área bajo la curva representa 3300 unidades de volumen.

Para la elaboración del hidrograma real aproximado de una cuenca, con base en el hidrograma sintético, será necesario conocer el volumen máximo y el caudal máximo susceptible de ocurrir en esa cuenca con la frecuencia deseada. Será también necesario establecer las relaciones que existen entre el volumen y el caudal máximos de la escorrentía que se estudia, con el volumen y el caudal máximos del hidrograma básico.

$$U = \frac{V}{3300} = \text{m}^3/\text{unidad}$$

$$q = \frac{Q}{100} = \text{m}^3/\text{seg}/\text{unidad}$$

$$t = \frac{U}{60 q} = \text{min}/\text{unidad}$$

Donde: U = Metros cúbicos de escorrentía correspondientes a una unidad de volumen del hidrograma sintético.

V = Volumen máximo de la escorrentía en m^3 .

q = Metros cúbicos por segundo de escorrentía por cada unidad de caudal del hidrograma sintético.

Q = Caudal máximo de la escorrentía en m^3/seg .

t = Tiempo en minutos por cada unidad de tiempo del hidrograma básico.

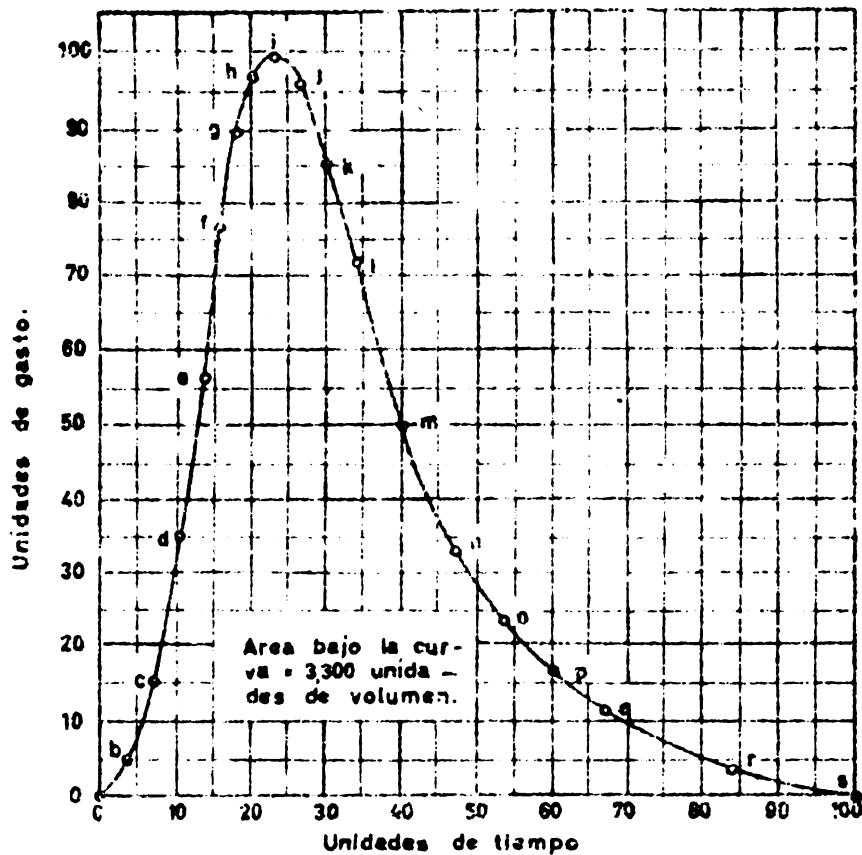
En el ejemplo que se ha venido discutiendo: $V = 677.000 \text{ m}^3$ y $Q = 17.64 \text{ m}^3/\text{seg}$. Los valores de u, q y t, se indican a continuación:

$$u = \frac{677000}{3300} = 205 \text{ m}^3/\text{unidad}$$

$$q = \frac{17.64}{100} = 0.1764 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{unidad}$$

$$t = \frac{205}{60 \times 0.1764} = 19.6 \text{ min}/\text{unidad}$$

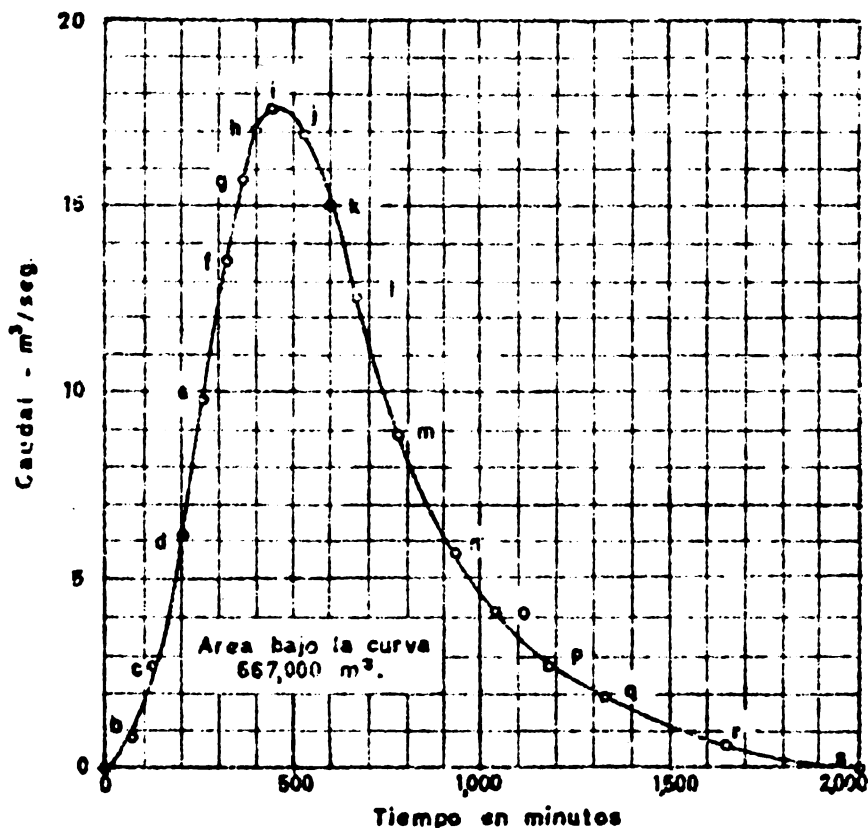
La figura 16 presenta el hidrograma de diseño elaborado para la cuenca del ejemplo considerado, con base en el hidrograma básico. Por cuanto la frecuencia que hemos usado en este ejemplo es de 5 años, se asume que las características de la escorrentía, así representadas, son susceptibles de ocurrir una vez cada 5 años.



o	t°	q°
a	0	0
b	3	5
c	7	15
d	10	35
e	13	55
f	17	77
g	18	90
h	20	97
i	23	100
j	27	98
k	30	85
l	34	72
m	40	50
n	47	33
o	53	24
p	60	16
q	67	11
r	84	4
s	100	0

* t y q en %

Fig. N° 15.- Hidrograma unitario básico



o	t°	q°
a	0	0
b	50	0.9
c	137	2.6
d	195	6.2
e	256	9.9
f	315	13.6
g	382	16.9
h	392	17.1
i	450	17.6
j	530	16.9
k	588	15.0
l	667	12.7
m	783	8.8
n	920	5.8
o	1,040	4.2
p	1,160	2.8
q	1,320	1.9
r	1,650	0.7

* t en minutos.
q en m³/seg.

Fig. N° 16.- Hidrograma desarrollado con base en el hidrograma básico.

EL CONCEPTO DE SEQUIA

En muchos climas húmedos y subhúmedos, donde prevalece una precipitación anual relativamente alta, ocurren con mayor o menor frecuencia períodos de sequía que afectan la producción agrícola. En estas zonas, la alta precipitación promedio anual, conduce a veces al concepto erróneo de que el riego no es necesario.

Muy a menudo, sin embargo, la precipitación en estas zonas no se distribuye uniformemente durante todo el año y, por el contrario, en muchas zonas tropicales y subtropicales los períodos de fuerte precipitación alternan con los períodos secos, teniendo dichos períodos una duración variable e impredecible. Las plantas, por otra parte, consumen agua de manera continua, y con una intensidad que varía con el clima y con las condiciones ambientales de la localidad. El agua que las plantas consumen procede del suelo, que tiene una capacidad limitada para almacenarla. Si los períodos secos fuesen suficientemente largos como para permitir que las plantas agoten la totalidad del agua disponible en el suelo, se produciría un período de sequía agrícola.

El concepto de sequía agrícola se vuelve, así, más complejo, y en su definición intervienen: la distribución cuantitativa anual de la precipitación, el consumo de agua de las plantas y la capacidad de los suelos para almacenar agua dentro de la zona de acceso radicular.

Con qué frecuencia ocurren estos períodos de sequía, cuál es la duración de los mismos, y cuándo son susceptibles de ocurrir, constituyen factores importantes que deben determinarse antes de establecer el grado de necesidad o la conveniencia del riego en una localidad determinada. En las zonas desérticas o semidesérticas las respuestas a las preguntas anteriores son obvias, pero en las zonas tropicales y subtropicales, don-

de el riego tiene un carácter suplementario de la precipitación natural, resulta necesario determinar los factores hidrológicos antes mencionados y someterlos a un análisis estadístico para determinar la necesidad del riego y el grado de esta necesidad.

El Método de Thornthwaite

Thornthwaite (9) ha elaborado, con fines ecológicos, un método de estudio que permite valorar y analizar en forma aproximada los factores antes indicados, para determinar la ocurrencia de las sequías.

En párrafos anteriores se discutió el método de Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial con base en datos meteorológicos. La capacidad de almacenamiento de agua de los suelos en una localidad dada, puede establecerse determinando las constantes hídricas y la profundidad de los suelos que prevalezcan en dicha localidad, o en ausencia de esta información y para áreas grandes, la capacidad de retención de agua de los suelos puede estimarse en forma aproximada a razón de 1 mm. de agua por cada centímetro de suelo, hasta una profundidad media de un metro.

Con esta información puede hacerse un balance mensual de agua en el suelo, abonándole el agua de precipitación hasta completar su capacidad de almacenamiento y cargándole el agua consumida por las plantas. La tabla 9, que presenta la disponibilidad de agua en Huayao, Perú, durante el año más seco ocurrido entre 1922 y 1953, ilustra la manera de hacer este balance.

Se han tabulado primero la evapotranspiración potencial, calculada por el método de Thornthwaite, y la precipitación registrada para cada mes del año que se estudia. Generalmente, resulta conveniente iniciar este balance con un mes en que ocurra la máxima deficiencia de agua. La diferencia entre la pre

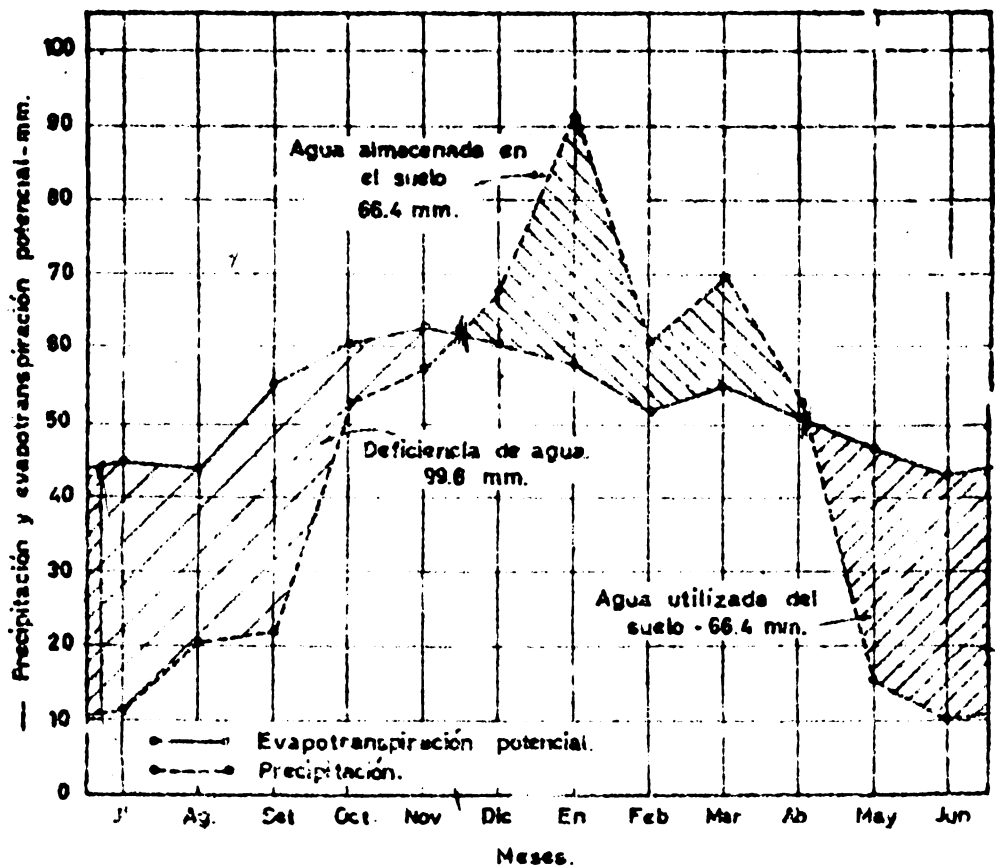


Fig. N° 17.- Relación entre precipitación y evapotranspiración potencial, y la disponibilidad de agua para las plantas en Huayao, Perú, durante el año más seco ocurrido entre 1922 y 1953.

precipitación y la evapotranspiración potencial representa el cambio en el contenido de agua del suelo. El agua almacenada en el suelo será la suma de esta diferencia con el saldo de agua dejado en el suelo en el mes inmediato anterior. En ningún caso el agua almacenada será superior a los 100 mm., ya que esta es la máxima capacidad de almacenamiento asumida para el suelo. La evapotranspiración real en el mes será igual a la precipitación ocurrida en dicho mes, más el agua almacenada en el suelo, siendo la evapotranspiración potencial el límite máximo de la evapotranspiración real. La deficiencia de agua será la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real. El exceso de agua ocurrirá cuando, habiéndose satisfecho la capacidad de almacenamiento del suelo y la evapotranspiración potencial, quede aún un remanente de agua, y se obtiene restando a la precipitación del mes el cambio de agua ocurrido en el suelo y la evapotranspiración potencial de dicho mes. La escorrentía y las pérdidas en el subsuelo se asumen igual a la mitad del exceso de agua ocurrida en el mes considerado, más la escorrentía del mes anterior. El índice de humedad se obtiene dividiendo la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial por la evapotranspiración potencial.

Esta información permite apreciar la duración probable de la sequía y los meses durante los cuales ha habido exceso de agua. En ocasiones resultará conveniente presentar esta información en la forma de un gráfico, como se ilustra en la figura 17 que corresponde, como la tabla anterior, al año más seco registrado en el Huayao, durante los últimos 35 años.

Análisis como el que se ha indicado, pueden hacerse para todos los años que cuenten con registros pluviométricos en una localidad determinada, lo cual permitirá establecer la frecuencia de las sequías con períodos de longitud diferente.

Un análisis de esta naturaleza no pretende ser perfecto, ya que la capacidad de almacenamiento del suelo se ha tomado como un gran promedio que puede tener amplios márgenes de desviación. Además, en este tipo de análisis no se considera la distribución mensual de la lluvia y de la evapotranspiración. Sin embargo, constituye un instrumento valioso para establecer la necesidad del riego en una localidad. Otros autores (1) han realizado estudios similares haciendo un balance diario de la disponibilidad de agua en el suelo, lo cual conduce a resultados más precisos.

Tabla 9

Relaciones entre la precipitación mensual y anual con la evapotranspiración potencial y su relación con la disponibilidad de agua para las plantas, para el año más seco (1947) registrado en Huayao entre 1922 y 1953 (Ref. 10)

Factor	S.	O.	N.	D.	E.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	Año
Evapo-Transp. Potencial	55	61	63	61	58	52	55	51	47	43	45	44	635
Precipit.	22.1	52.8	57.4	67.8	91.7	61.0	69.8	53.2	16.5	10.5	11.9	20.8	535.4
Cambio en cont. Agua suelo	0	0	0	6.8	33.7	9.0	14.8	2.1	-30.5	-32.5	-3.4	0	635
Agua alm. en el suelo	0	0	0	6.8	40.5	49.5	64.3	66.4	35.9	3.4	0	0	535.4
Evapo-transp. Real	22.1	52.8	57.4	61.0	58.0	52.0	55.0	51.0	47.0	43.0	15.3	20.8	535.4
Deficiencia de Agua	32.9	8.2	5.6	0	0	0	0	0	0	0	29.7	23.2	99.6
Exceso de Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escorrentía y pérd. en sub.s.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Índice de humedad	-0.60	-0.13	-0.09	+0.11	+0.58	+0.17	+0.27	+0.04	-0.65	-0.75	-0.74	-0.53	

R E F E R E N C I A S

- 1) BABEL Van, C.H.M. and F.J. VERLINDEN, Agricultural Drought in North Carolina, North Carolina Agr. Exp. St.Tech. Bull. No. 122, (1956), 60 p.
- 2) BLANNEY, H.F. and W.D. CRIDDLE, Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological Data and Irrigation Data. U.S. Dept. of Agr. SCS-TP (1950).
- 3) BUTLER, S.S., Engineering Hydrology, Englewood Cliff, Prentice-Hall Inc., (1957), 356 P.
- 4) FREVERT, R.K. y otros, Soil and Water Conservation Engineering, New York, John Wiley & Sons, (1955), 479 P.
- 5) HATHAWAY, G.A., Military Air fields - Desing of Drainage Facilities, Trans. Am. Soc. Civil Engrs. 110 (1945).
- 6) RAMSER, C.E., Journal of Agricultural Research, Vol. 34, No. 9 (1927).
- 7) ROUSE, H., Engineering Hydraulics, New York, John Wiley & Sons. Inc. (1950).
- 8) SUAREZ DE CASTRO, FERNANDO. Conservación de Suelos, Barcelona, Salvat Editores, S.A. (1956).
- 9) THORNTHWAITTE, C.W. The Determination of Potential Evapotranspiration. The Johns Hopkins University Publications in Climatology. Volume VII No. 1 (1954).
- 10) TOSI, JOSEPH A., The Climate and General Climatic Ecology of the Huancayo Demonstration Area, Inter-American Institute of Agricultural Sciences, Andean Zone (1954) (Mimeograph).
- 11) U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Stream Gaging Procedure, W.S.P.888.
- 12) YARNELL, D.L., Rainfall Intensity-Frequency Data, U.S. Dept. Agr. Misc. Publ. 204, (1935).

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
 ZONA ANDINA
 Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
 LIMA - PERU

SALINIDAD. RESUMEN DE LAS PRACTICAS EN EL LABORATORIO

por Gonzalo Villa Ruiz *

A G U A S

1. CE (conductividad eléctrica en mmhos por cm^2 a 25°C).

Tomar unos 5 a 7 ml. de muestra en un vasito, determinar su temperatura. Lavar la célula del conductímetro succionando y botando muestra una o dos veces; succionar la muestra nuevamente y graduar el aparato de modo que pueda leerse el resultado cómodamente (la aguja no debe estar muy cerca de los extremos); lavar la célula del aparato con agua destilada; secarla exteriormente con papel filtro y entonces puede hacerse otras mediciones.

La CE leída lo ha sido a una temperatura determinada, como se dice arriba, pero como nos interesa aquella a 25°C , multiplicamos por el factor (ft) de corrección de temperatura y además por la constante (K) de la célula del conductímetro, en nuestro caso $K = 1.316$ (la célula no tiene exactamente 1 cm^2 de superficie).

Ejemplo: Cond. Elec. leída a $22.6^\circ\text{C} = 1.61 \text{ mmhos.}$,
 ft 1.051
 $k = 1.316$
 $K \times \text{ft} = 1.38$ y $1.38 \times 1.61 = 2.21$
 $\text{CE} = 2.21 \text{ mmhos/cm}^2$ a 25°C .

2. PH (evaluación).

Se trabaja sobre las mismas muestras en que momentos antes se ha hecho la determinación de la CE. Poner el apa-

* Encargado del Laboratorio del Programa de Estudios de la Zona Arida Peruana de la UNESCO.

rato en posición de trabajo y esperar 5 a 10 minutos antes de ajustar su exactitud con una solución Buffer de PH conocido (por ej. 6,5); lavar electrodos con agua destilada y secarlos con papel filtro; medir el PH de las muestras siguiendo el mismo proceso; el patrón se chequea cada 5 a 6 lecturas.

Es particularmente exigente en cuidados el manipuleo de este aparato, los electrodos son muy frágiles y, además, como la fuente de energía está constituida por cuatro pilas, ellas pueden echarse a perder si se guardara el aparato con la llave en posición de trabajo. En condiciones normales las pilas duran más de un año.

3. Ca - Mg (calcio + magnesio).

Tomar un volumen de muestra que contenga unos 0.05 me. de Ca + Mg (tenemos una curva dibujada a base de los datos CE y la correspondiente cantidad de Ca + Mg de muchas aguas; así, pues, leyendo la CE en esta curva, buscamos en otro lado la cantidad de muestra que es conveniente tomar para gastar un volumen cómodo de reactivo, en este caso valoramos con versenato), agregar unas 10 gotas de A, 3 gotas de D y agua destilada hasta hacer un volumen conveniente (unos 50 ml. es suficiente y siempre trabajamos con esta cantidad para lograr el hábito de identificar el viraje con colores de intensidad conocida); valorar con F; la valoración concluye cuando el color "rojo vino" original vira a azul verdoso. La solución C sirve para producir el regreso del viraje y asegurarnos que no hemos usado exceso de F o también en cuánto nos hemos excedido, puesto que C es de normalidad conocida.

CALCULOS.

$$\frac{\text{ml. de F gastados} \times \text{normalidad de F} \times 1000}{\text{ml. de muestra}}$$

Ej.: Gasto de F = 7.35 ml.; normalidad de F=0.02 N; muestra = 10 ml.

$$\frac{1000 \times 0.02 \times 7.35}{10} = \frac{20 \times 7.35}{10} = 14.7$$

$$\text{Ca} = \text{Mg} = 14.7 \text{ me./l}$$

REACTIVOS.

- A- Solución Buffer, de hidróxido y cloruro de amonio.
- C- Solución standard de cloruro de calcio.
- D- Indicador, negro de eriocromo.
- F- Ethylenediaminetetraacetate (versenato) 0.01 N. δ 0.02 N.

4. Na (Sodio).

Sabemos que CE x 10 = suma de cationes (aproximadamente)

$$\text{O sea, CE} \times 10 = (\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{Na} + \text{K}$$

Como el K es muy pequeño en comparación con los demás, se tiene:

$$\text{CE} \times 10 = (\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{Na}$$

$$\text{Na} = (10 \text{ CE}) - (\text{Ca} + \text{Mg}), \text{ aproximadamente.}$$

Ej.: si CE = 2.21 y Ca + Mg = 14.7 me./l.

$$10 \text{ CE} = 22.1 \text{ aprox.}$$

$$\text{Na} = 22.1 - 14.7 = 7.4$$

Este dato aproximado de Na puede usarse con éxito para el cálculo y apreciación de los valores de SAR y clasificación, pero si hay medios podemos hacer una determinación más exacta; por ejemplo, si usamos nuestro fotómetro de llama procedemos así:

Como el aparato permite lecturas de Na en me./l. desde 0 hasta 2.8 y las mejores lecturas se hacen alrededor de 1 me./l., la aproximación calculada a base de la CE y el Ca-Mg nos sirve para hacer una dilución. Si lo calculado fue aproximadamente 7.4 me./l., la dilución adecuada puede ser 1/5 y la lectura en el fotómetro puede ser por ejemplo, 1.4 me./l.:

$$1.4 \times 5 \text{ (dilución)} = 7.0$$

$$\text{Na} = 7.0 \text{ me./l.}$$

5. SAR (sodium adsorption ratio).

$$\text{SAR} = \sqrt{\frac{\text{Na}}{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} \quad \text{Si Na} = 7.0 \text{ y Ca+Mg} = 14.7: \sqrt{\frac{7}{\frac{14.7}{2}}}$$

$$\text{SAR} = 2.6$$

6. CLASIFICACION.

Conocemos la CE y el SAR, con estos dos datos podemos hallar la clasificación según el cuadro que da el U.S. Dept. Agr.

Ej.: CE = 2.21 mmhos.

SAR = 2.6

CLASIFICACION = C3-S1

S U E L O S1. PREPARACION DE LA PASTA DE SATURACION.

Tomar unos 400 g. de suelo en un frasco de boca ancha; adicionar agua destilada y agitar la masa formada, con una es-
pátula; la adición de agua continúa hasta que la "pasta de
saturación" presenta sus características típicas:

- La superficie de ella brilla como un espejo cuando la aplanamos golpeando suavemente el fondo del frasco sobre la mesa (proteger con un trapo doblado), no debe aflorar agua (eso indicaría exceso de ella).
- La pasta se desliza suavemente cuando inclinamos el frasco (boca abajo).

Esperar una hora, agitando varias veces en ese lapso; filtrar, usando bomba de succión.

CALCULOS.

Ejemplo: suelo = 400 g. y agua gastada = 93 ml.
% de saturación = 31

Nota. Según el grado de exactitud deseado, puede determinarse o no la humedad del suelo con que se ha trabajado la pasta y hacer intervenir este valor en los cálculos sumándolo, como % de humedad, al agua gastada.

2. DETERMINACIONES EN EL EXTRACTO DE SATURACION.

- a- CE. 4 mmhos en el extracto de saturación es el límite superior para los llamados suelos no salinos.
- b- PH. El PH de suelos no salinos y salinos suele ser próximo a 7 y el de los llamados suelos alcalinos (sean o no salinos) llega fácilmente a alrededor de 9.

c- Ca-Mg, Na y SAR. Las determinaciones de Ca-Mg y Na en el extracto de saturación siguen igual proceso que en aguas, luego puede calcularse el SAR también en la misma forma. Los suelos con altos valores de SAR suelen tener valores altos en % de Na cambiabile.

3. CARBONATOS ALCALINO TERREOS.

Poner tierra en un crisolito de vidrio; adicionar agua destilada hasta eliminar el aire y luego HCl 1 + 3 para apreciar la efervescencia. Podemos considerar tres grados de efervescencia: pobre, media y alta. La alta es común en suelos salinos.

.4. REQUERIMIENTO DE YESO.

Poner 5 g. de suelo en un frasco, adicionar 100 ml. de solución saturada de yeso y valorada con versenato. Agitar varias veces durante 1/2 hora, filtrar, valorar el filtrado con versenato, siguiendo el procedimiento de Ca-Mg.

CALCULOS.

Requerimiento de yeso en me. por 100 g. de suelo :: (A-B).2

A :: Ca me./l. en la solución saturada de yeso

B :: Ca-Mg en el filtrado me./l.

Ej. A :: 29.0 y B :: 27.3

$$(29 - 27.3) 2 :: 3.4$$

El me. de yeso peso 0.086, por lo tanto, $3.4 \times 0.086 :: 0.29$ g. de yeso por 100 g. de suelo.

1 Ha. de suelo de densidad 1.4 a 30 cm. de profundidad pesa unas 4200 Tn.

Si 100 g. de suelo requieren 0.029 g. de yeso

4.200 Tn., es decir, 1 Ha. requiere 12.18 Tn.

.-.-.-.-.-

EQUIPO UTILIZADO EN LAS DETERMINACIONESCONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Conductivity METER CDM2

Suministrador: RADIOMATER
72 Endrupvej - Copenhagen NV
Denmark

.-.-.-.-.-.

pH

pH METER 24 Type pHM24

Suministrador: el mismo de arriba

.-.-.-.-.-.

SODIO.- POTASIO.

Direct Reading Flame Photometer

Suministrador: Beckman Instruments, Inc.
International Division
2500 Fullerton Road, Fullerton,
Calif., U.S.A.

.-.-.-.-.-.

BALANZAS

- A - METTLER Precision balance, type E7, 220 volts.
A.C. pesada máxima 800 g. lectura hasta 0.1 g.
- B - METTLER Analytis balance 220 volts máx. 200 g.
lectura hasta 1 mg.

Suministrador: E. METTLER
Pelikanstrases 19 - Zurich 1
Switzerland

.-.-.-.-.-.

METODOS DE LABORATORIO

Todos ellos han sido tomados de:

"Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils".

Agriculture Handbook N° 60.

United States Department of Agriculture.

.-.-.-.-.-.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
ZONA ANDINA
Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
Lima - Perú

EL RIEGO CON RELACION A LOS SUELOS SALINOS Y DE ALCALI

por

Matthew Drosdoff*

Origen de las Sales Solubles en los Suelos

Las sales solubles que se encuentran en los suelos se componen en su mayoría de varias proporciones de cationes, so dio, calcio y magnesia y de aniones, cloruro y sulfato. Otros constituyentes que se encuentran en pequeñas proporciones son los cationes de potasio y los aniones, bicarbonatos, carbonatos, nitratos y borato. La fuente de origen de todos los cong tituyentes salinos son los minerales primarios de los suelos y en las rocas expuestas en la corteza de la tierra. En el cuadro N° 1, tomado del Dato Geoquímico de Clarke (1) se da el porcentaje de algunos elementos en las rocas. Durante el proceso de meteorización química, lo cual implica hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonación, estos constituyentes son removidos gradualmente y se hacen solubles.

Los suelos salinos y de álcali se encuentran usualmente en regiones áridas y semi-áridas. En zonas húmedas las sales solubles originalmente presentes en los materiales del suelo y aquellas formadas por la alteración de los minerales, generalmente son llevadas a las aguas subterráneas y transportadas por los ríos al océano. Donde las precipitaciones no son suficientes, la lixiviación es incompleta y las sales solubles no pueden ser llevadas a la profundidad. El alto porcentaje de evaporación en climas secos es un factor muy importante en la concentración de sales en los suelos y en las aguas superficiales.

(*) Especialista en Suelos. Consultor de la "International Cooperation Administration". I.C.A.

Cuadro N° 1

Porcentaje de los distintos elementos que se encuentran en la corteza de la tierra (tomado del Dato Geoquímico de F. W. Clarke)

Elemento	%
Calcio (Ca)	3.64
Magnesio (Mg)	2.07
Sodio (Na)	2.75
Potasio (K)	2.58
Cloro (Cl)	.05
Azufre (S)	.06

No obstante, la meteorización de los minerales primarios es la fuente principal de casi todas las sales solubles, probablemente sólo hay pocos lugares donde se han acumulado de esta fuente suficientes sales solubles "in situ" para formar suelos salinos o de álcali. Los suelos salinos, o suelos de álcali, se forman en áreas que reciben sales de otros lugares y el agua es el principal conductor. El océano puede ser la fuente de las sales en los suelos donde la roca madre consiste en sedimentos marinos depositados durante las épocas geológicas anteriores que posteriormente han sido elevados. Ejemplos de esto se pueden ver en los característicos "tablazos" a lo largo del litoral Peruano. El mar también es fuente de sales en los suelos situados en las zonas bajas a lo largo de litoral. También se pueden ver muchos ejemplos de esto en las costas del Perú. Todas las aguas superficiales y subterráneas contienen sales solubles. La concentración de éstas depende del contenido de sal en los suelos y de los materiales geológicos con los cuales el agua ha estado en contacto.

Clasificación de los Suelos Salinos y de Alkali

Se da a continuación la terminología indicada por el Labo

ratorio de Salinidad de los Estados Unidos en Riverside, California (3) la cual es usada en muchos países del mundo. Los suelos salinos y de álcali se dividen en 3 grupos:

- 1) Suelos salinos: Son aquellos que contienen suficientes sales solubles como para reducir la productividad. Estos suelos corresponden, aproximadamente, a lo que algunos llaman suelos de "álcali blanco" o "solonchak"
- 2) Suelos de Alkali no Salinos. Son aquellos que contienen suficiente sodio cambiabile o tienen un grado muy alto de alcalinidad o ambos de tal manera que afecta la productividad. Algunos de los suelos de álcali han sido llamados suelos de "álcali negro" porque debido a su alta alcalinidad, la materia orgánica se disuelve y dispersa con la subsecuente acumulación en la superficie del suelo. Algunos tipos de suelo de álcali son llamados "solonetz"
- 3) Suelos Salinos de Alkali: Son aquellos que contienen en exceso sales solubles y una alta concentración, ya sea de sodio cambiabile o alta alcalinidad, o ambos.

Suelos Salinos

El contenido de sal en los suelos, en los cuales el crecimiento de las plantas es afectado, depende de varios factores tales como textura del suelo, distribución de la sal en el perfil, composición de la sal y de las diferentes especies de plantas. Se han hecho muchas sugerencias para distinguir los límites entre los suelos salinos y los no salinos. El Laboratorio de Salinidad en los Estados Unidos y otros Laboratorios consideran un suelo salino si la solución extraída de una pasta de suelo saturada tiene una conductividad eléctrica de 4 millimhos/cm. o más. Esto corresponde más o menos a 0.10 por ciento de sal (1000 partes por millón) en un suelo de textura franca y más o menos 0.30 por ciento de sal (3000 partes por millón) en un suelo de textura arcillosa.

Los suelos salinos se reconocen muchas veces por la presencia de costras blancas en la superficie, o vetas, capas o manchas en el perfil. Los suelos salinos pueden tener las ca-

racterísticas del perfil bien desarrolladas o puede encontrarse o presentarse el material del suelo estratificado, como en el caso de los depósitos lacustres o aluviales.

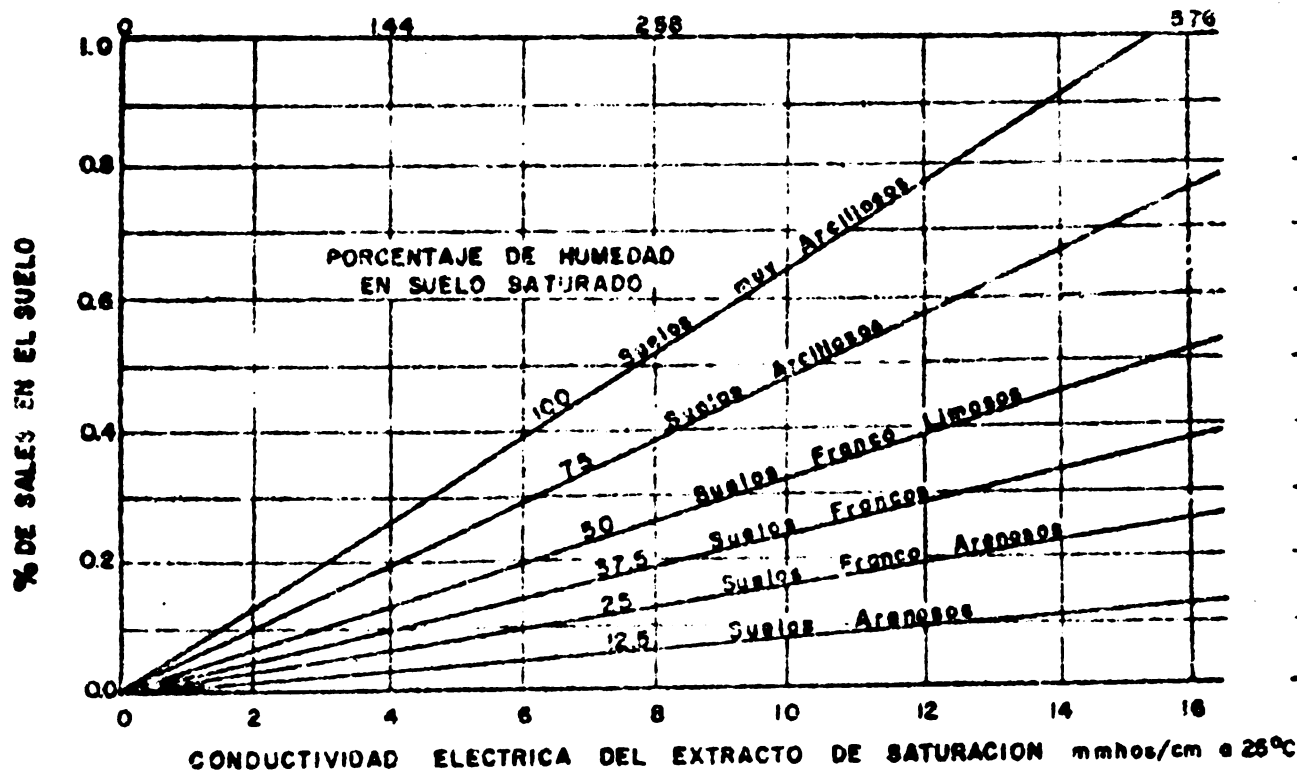
Las sales más comunes que se encuentran en los suelos salinos son casi siempre una mezcla de cationes de sodio, potasio, calcio y magnesio y aniones de cloruro y sulfato, y algunas veces, bicarbonato y nitrato. Además de sales solubles, puede haber sales de baja solubilidad, tales como sulfato de calcio (yeso), carbonatos de calcio y magnesio (cal).

Debido al exceso de sales y a la ausencia de cantidades significativas de sodio cambiante, los suelos salinos generalmente tienen una permeabilidad relativamente alta.

Un drenaje limitado es un factor que usualmente contribuye a la salinización de los suelos, ya sea debido al nivel alto de la capa freática o a la lenta permeabilidad del suelo. El drenaje de aguas, cargadas de sal, que vienen de las tierras altas, puede llevar el nivel de las aguas subterráneas a la superficie de los suelos de las tierras bajas o a usar una inundación temporal o formar lagos salinos permanentes. Bajo estas condiciones, el movimiento ascendente de las aguas salinas subterráneas o la evaporación de las aguas de la superficie, da como resultado la formación de los suelos salinos.

Los suelos no salinos pueden volverse salinos, como resultado de la irrigación. Bajo lluvias naturales los suelos pueden ser bien drenados, pero cuando se riega la tierra sin un drenaje adecuado, se pueden desarrollar problemas muy serios de salinidad. La napa de agua puede subir de una profundidad considerable y llegar a unos cuantos pies de la superficie, en muy pocos años. Durante el desarrollo de un proyecto de irrigación, el agua frecuentemente es abundante y entonces hay tendencia a usar demasiada agua. Esto acentúa el proceso de salinización si no se hace un drenaje adecuado.

PRESION OSMOTICA DEL EXTRACTO DE SATURACION EN ATMOSFERAS



CASI DESPRECIABLE	PUEDE DECRECER EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS MUY SENSIBLES	DECRECE EL RENDIMIENTO DE MUCHOS CULTIVOS	SOLO LOS CULTIVOS TOLERANTES CRECEN SATISFACTORIAMENTE	SOLO UNOS POCOS CULTIVOS MUY TOLERANTES CRECEN SATISFACTORIAMENTE
EFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE LOS CULTIVOS				

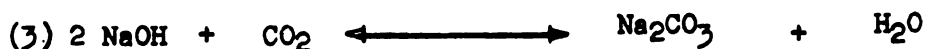
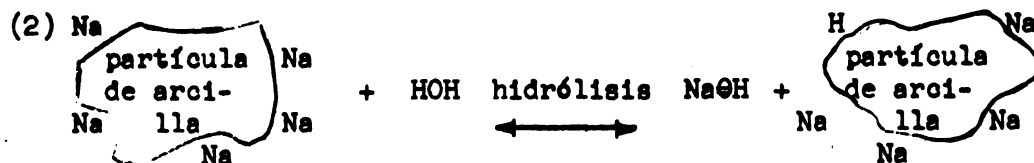
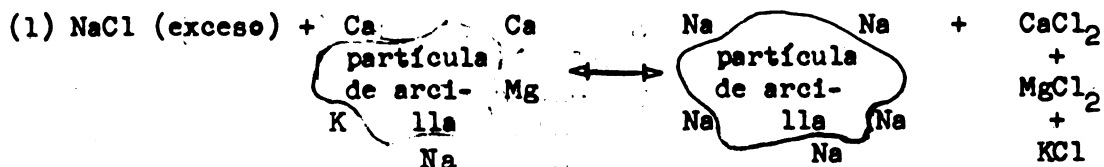
FIG N°1. GRAFICO DE LA SALINIDAD DE LOS SUELOS

Tomado de U.S. SALINITY LABORATORY STAFF

Suelos de Alkali no Salinos

Se considera suelo de álcali si el porcentaje de sodio cambiante (ESP) es más de 15.

Cuando hay una alta proporción de sales de sodio, el sodio domina sobre las bases cambiables. Cuando los excesos de sal en este caso son removidas por lixiviación, la hidrólisis de la arcilla de sodio produce el hidróxido de sodio y una fuerte reacción alcalina. El bióxido de carbono del aire del suelo se combina con el hidróxido de sodio para formar el carbonato de sodio. Esto aumenta el pH hasta más del 8.5. Las reacciones pueden presentarse esquemáticamente con las siguientes ecuaciones:



El sodio cambiante en los suelos de álcali puede tener una fuerte influencia en sus propiedades físicas y químicas. Mientras aumenta la proporción del sodio cambiante, el suelo tiende a volverse más disperso, y el pH puede aumentar hasta 10. Como resultado de todo esto, se puede desarrollar en un suelo de textura fina una capa densa de suelo de baja permeabilidad que puede tener una estructura prismática o columnar. Esta clase de suelo a veces se desarrolla debido a la irrigación. Si no hay yeso en el agua de riego, el resultado de la lixiviación de un suelo salino, alto en sales de sodio, será

un suelo alto en sodio cambiabile, duro cuando seco y de permeabilidad muy lenta.

Ocasionalmente se pueden encontrar suelos de álcali que son ligeramente ácidos, pero que contienen más del 15 por ciento de sodio cambiabile. Estos se forman debido a la acción de cambio de algún sodio cambiabile, por el hidrógeno, como resultado de la lixiviación. Sin embargo, las propiedades físicas de estos suelos, están dominadas por el sodio cambiabile y son típicas de los suelos de álcali no salinos.

Suelos de Alkali Salinos

Estos suelos se forman debido al proceso de combinado de salinización y alcalinización. La conductividad del extracto de saturación es más grande que 4 millimhos/cm y el porcentaje del sodio cambiabile es más alto que el 15 por ciento. Mientras el exceso de sales esté presente, la apariencia y propiedad de estos suelos son, generalmente, similares a los suelos salinos. Si el exceso de sales solubles es lisiviado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar en forma marcada y volverse similares a los suelos de álcali no salinos. Como la concentración de las sales en el suelo es reducida, algo del sodio cambiabile se hidroliza y forma el hidróxido de sodio. Esto cambia a carbonato de sodio por la reacción con el bióxido de carbono absorbido de la atmósfera. Debido a la lixiviación el suelo puede volverse fuertemente alcalino (pH sobre 8.5), las partículas se dispersan y el suelo se convierte en relativamente impermeable y no es favorable para la labranza. No obstante, el regreso de las sales solubles puede ocasionar la baja del pH y floccular las partículas dispersas. El manejo de los suelos de álcali salinos es difícil, a menos que el exceso de sales y el so-

dio cambiable sean eliminados y se restablezca una condición física favorable del suelo.

Muchas veces los suelos de álcali salinos contienen yeso. Cuando dichos suelos son lixiviados, el calcio se disuelve y sucede el reemplazo del sodio cambiable por el calcio, al mismo tiempo que el exceso de sales es eliminado.

Variabilidad de los Suelos de Alkali y Salinos

Los suelos de álcali y los salinos son extremadamente variables, ya sea verticalmente u horizontalmente. Las sales pueden ser localizadas en la superficie del suelo o en un horizonte inferior, o pueden estar más o menos distribuidos en todo el perfil del suelo. Diferencias ligeras en la textura, pueden dar como resultado movimientos desiguales del agua salada, trayendo como consecuencia grandes diferencias en cuanto a la acumulación de las sales. Algunos arbustos en crecimiento pueden absorber grandes cantidades de sal, trayéndolas de la profundidad a la superficie. El contenido de sal y pH, o ambos, puede variar inmensamente en el espacio de unos cuantos pies, dependiendo de las diferencias en la vegetación, así como también de las diferencias en relieve y estratigrafía. En cualquier lugar, el contenido de la sal puede fluctuar por la estación, el medio ambiente y la irrigación.

Métodos para Medir la Salinidad y la Alcalinidad

Hay varios métodos para estimar el contenido de la sal en los suelos. Un procedimiento común que se ha estado usando por largo tiempo, es medir la resistencia eléctrica de una pasta de suelo por medio de un puente electrolítico. La interpretación de la resistencia se convierte, entonces, en términos de porcentaje del total de sales en el suelo secado al aire o, en términos de conductividad, en millimhos del extracto de saturación. Con respecto a la concentración de sales, la resistencia eléctrica es afectada por el grado de disociación de las sales, contenido de humedad, clase de cationes cambiables y temperatura. Correc

ciones para la temperatura y compensación del contenido de humedad se hacen usualmente y el contenido aproximado de sal o grado de salinidad, es determinado por medio de tablas recopiladas, suponiendo la condición promedio de las proporciones relativas de las diferentes clases de sales.

El Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos recomienda la conductividad del extracto saturado como un método mejor para estimar la salinidad del suelo en relación con el crecimiento de las plantas. La ventaja principal de este método es que el porcentaje de saturación está directamente relacionado con la humedad del campo, y desde el principio que las plantas son sensibles a las concentraciones de sal de la solución del suelo, la conductividad del extracto saturado puede estar relacionada directamente con el crecimiento de las plantas. La relación entre la sensibilidad de la planta y la conductividad del extracto saturado y el porcentaje de sal en el suelo, se muestra en la figura N° 1.

Las líneas diagonales ayudan a correlacionar la conductividad del extracto saturado con el porcentaje de sal contenida para varias texturas de suelos. Por ejemplo, para una conductividad eléctrica de 4 millimhos/cm. casi todos los cultivos dan buen resultado y para un suelo arcilloso que tenga un porcentaje de saturación de 75, esto corresponde a un contenido de sal de 0.2 por ciento. Por otro lado, 0.2 por ciento en un suelo arenoso para el cual el porcentaje de saturación es de 25, correspondería a una conductividad eléctrica de 12, el cual es de masiado salino para la mayoría de las plantas, por lo tanto no se puede obtener un buen cultivo.

El procedimiento para llevar a cabo la determinación de la conductividad eléctrica de un suelo saturado, es la preparación de una pasta de suelo saturado que se va moviendo mientras se le agrega agua destilada. Después se usa un filtro de suc-

ción para obtener una cantidad suficiente del extracto para hacer las medidas de conductividad con el uso de un puente electrolítico.

BIBLIOGRAFIA

1. Clarke, F. W. The Data of Geochemistry, U.S. Geological Survey. Bul. 770, 1924.
2. Richards, L. A., Bower, C. A. and Fireman, Milton. Tests for Salinity and Sodium Status of Soil and Irrigation Water. U. S. Dept. Agr. Circular N° 982, 1956.
3. Laboratorio de Salinidad en los Estados Unidos. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, U. S. Dept. of Agric. Handbook N° 60, 1954.

•-•-•-•-

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
ZONA ANDINA
Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
Lima - Perú

EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS EN RELACIÓN A LA PRESEN-
CIA DE SALES Y DE ALCALI EN EL SUELO

por

Matthew Drosdoff*

Plantas Indicadoras en Suelos Salinos y de Alkali

Las plantas varían en su tolerancia a un suelo salino o de álcali según la especie, variedad, edad y otras condiciones de crecimiento. Muchos investigadores recomiendan el uso de ciertas plantas nativas como indicadores de la presencia de salinidad o de álcali en un suelo. Se deben tomar ciertas precauciones al usar plantas indicadoras como base para el diagnóstico de un suelo salino o de álcali.

Algunas plantas pueden tolerar grandes cantidades de sal, pero también pueden desarrollarse muy bien en suelos donde hay ausencia de sal o de álcali. Por ejemplo, Salt Grass (grama salada) (*Distichlis* spp.) es una planta común, la cual crece en áreas saladas y húmedas, en el Perú y en otros países, pero también se la encuentra en suelos que contienen pequeñas cantidades de sal. No obstante, usualmente indican suelos húmedos y fuertemente salinos con una capa freática alta. "Shadscale" (*Atriplex* sp.) es común en el Perú y usualmente indica cantidades dañinas de sal o de sodio cambiabile, pero también puede desarrollarse muy bien en suelos no salinos. Por otro lado, al Algarrobo (*Prosopis juliflora*) casi siempre se le encuentra asociado con suelos no salinos, pero bajo algunas condiciones puede crecer en áreas donde se acumula algo de sal en la superficie.

(*) Especialista en Suelos. Consultor de la "International Cooperation Administration". I.C.A.

Otras plantas que se encuentran a lo largo de la costa peruana y en otros países, y que pueden servir como plantas indicadoras de suelos salinos o de álcali son: "Alkali-heath" (*Frankenia grandifolia*), "Greasewood" (*Sarcobatus vermiculatus*), "Salt-wood o Seepweed" (*Suaeda* spp.), "Alkali Socratón o Tussockgrass" (*Sporobolus airoides*), "Sapphire o Glasswort" (*Salicornia* spp)**

Cultivos en Suelos Salinos o de Alkali

Cultivos llevados a cabo en suelos salinos o de álcali, casi siempre muestran una marcada falta de uniformidad. Se encuentran manchas desnudas en el campo y muchas de las plantas desarrollan mal (4). La extensión y frecuencia de las manchas improductivas pueden servir como indicación de la cantidad de sal que hay en el suelo. Como casi todas las plantas son más sensibles a la salinidad durante la germinación que en los estados subsecuentes de su período vegetativo, las áreas desnudas son más indicadoras del efecto y presencia de sales alrededor de las semillas durante la germinación, que su presencia en el perfil o en otras áreas no desnudas del suelo. Plantas vigorosas que crecen junto a un área desnuda pueden indicar una concentración de sal solamente en el área desnuda, pero plantas mal desarrolladas adyacentes a una mancha desnuda indica una condición salina, en general, del suelo.

Algunas veces el color de las plantas puede utilizarse como síntoma para diagnosticar la salinidad de un suelo. El color verde azulado casi siempre se asocia con la salinidad. Remolachas, col y alfalfa son algunas de las plantas que muestran el color verde azulado cuando el suelo es salino. Algunas plantas que crecen en suelos salinos, presentan áreas necróticas o "quemazones" en las márgenes y puntas de las hojas. Melocotones, manzanas, paltas y toronjas son ejemplos de las plantas que muestran estas características.

(**) Informe personal del Dr. Ramón Ferreyra H.

El Crecimiento de las Plantas y la Presión Osmótica

Los experimentos han demostrado que hay estrecha relación entre el crecimiento de la planta y la presión osmótica de la solución del suelo. En cantidades equivalentes los cloruros son más dañinos para el crecimiento de la planta que los sulfatos, pero desde el punto de vista osmótico hay pequeña diferencia. Esto indica que la concentración total de sales en solución, en vez de su naturaleza química, es la principal responsable por los efectos dañinos de las soluciones salinas en el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, hay evidencias que la naturaleza del ion específico tiene influencia en el crecimiento de la planta.

Es posible extraer la solución del suelo y determinar su presión osmótica, pero esto es un procedimiento más difícil que estimar la concentración de las sales determinando la conductividad eléctrica de un extracto de suelo saturado de agua (extracto de saturación). La conductividad eléctrica de la solución de un suelo, extractada de un suelo saturado, está relacionada directamente a su presión osmótica, como se muestra en la figura 1 obtenida del informe de Campbell y otros (1). Los valores de la presión osmótica fueron calculados de las medidas del punto de congelación. Se debe tomar nota que la presión osmótica en atmósferas es, aproximadamente, 3 veces la conductividad eléctrica expresada en millimhos/cm., por lo tanto, es sencillo estimar la presión osmótica de la solución del suelo de las medidas de conductividad.

Se ha encontrado que un aumento en la presión osmótica de la solución salina puede originar un descenso en el agua tomada por las raíces de la planta. También la absorción del agua es determinada por la tensión de humedad del suelo, esto es, la atracción molecular de las superficies de las partículas finas del suelo (arcilla y materia orgánica) por el agua. La tensión de la humedad del suelo aumenta cuando el suelo se seca

y las películas acuosas alrededor de las partículas del suelo se tornan más delgadas. Entonces, la disponibilidad de agua para la raíces de las plantas depende de 2 factores: 1) la presión osmótica de la solución del suelo y 2) la tensión de la humedad del suelo. La suma de estas dos ha sido designada "tensión total de la humedad del suelo" y los estudios han demostrado que el crecimiento de la planta es una función de la tensión total de la humedad del suelo, sin importar si esta tensión es de salinidad o de la humedad existente.

Efecto Especifico de los Iones

Aunque el crecimiento de la planta es influenciado por la concentración total de las sales solubles en la solución salina (presión osmótica), algunas sales o iones tienen un efecto tóxico específico lo cual no se puede explicar en la base de presión osmótica. Los efectos específicos de los iones varían con las diferentes especies de las plantas y, aún, con las variedades. Por eso ciertas plantas, particularmente los árboles y viñedos, son especialmente susceptibles a los cloruros, mientras que las habas, frijoles, etc., y algunos pastos, son susceptibles a los bicarbonatos.

Sodio

Se han publicado diferentes informes sobre los efectos tóxicos directos del sodio sobre las plantas, pero los datos no son uniformes. Lo decisivo es la evidencia de los efectos dañinos indirectos del sodio en las características físicas del suelo y en la absorción de otros iones, tales como calcio y magnesio. Si el complejo cambiante contiene una considerable cantidad de sodio, el suelo, especialmente si es de textura fina, puede volverse disperso, y apelmazado causando una aereación

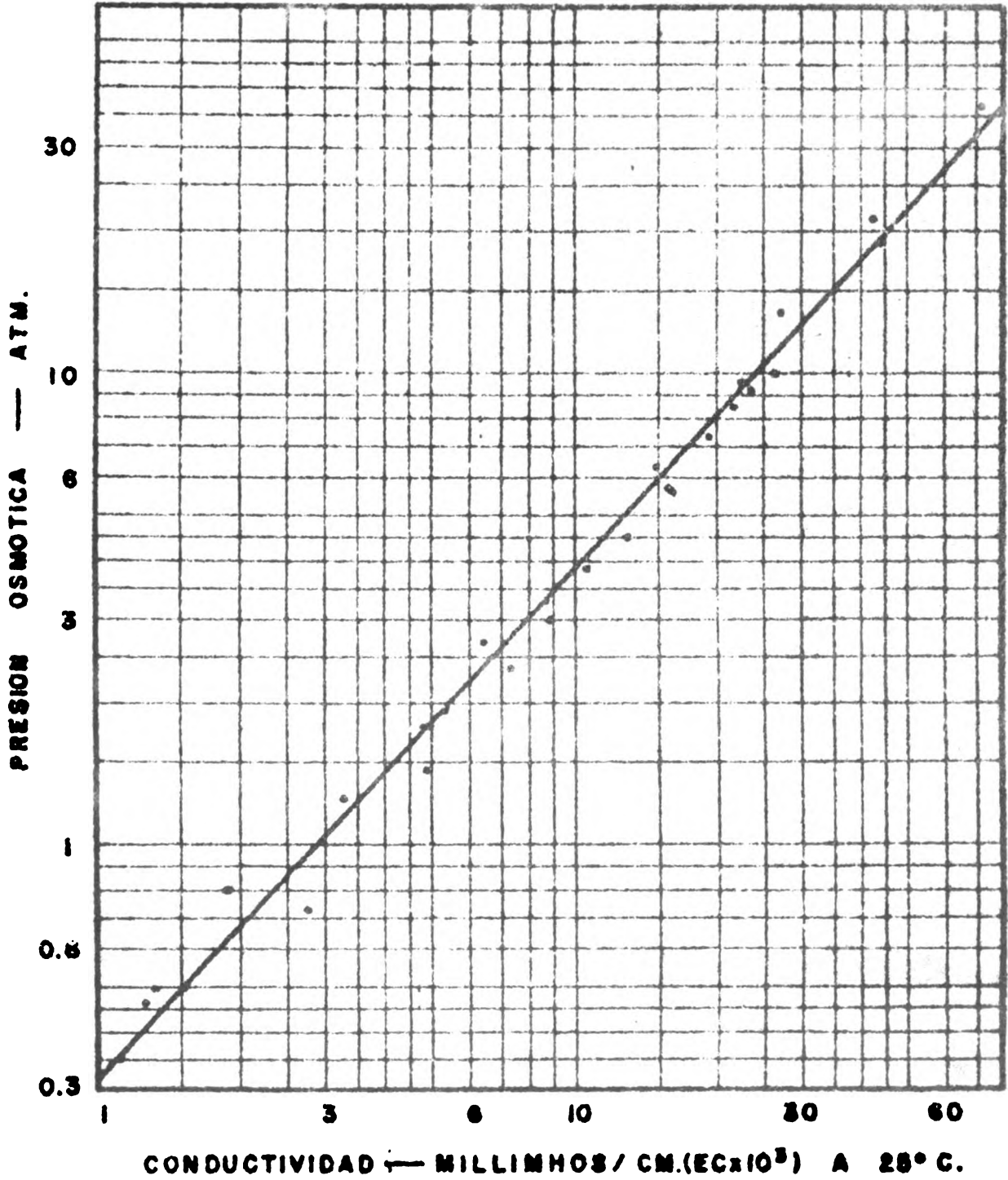


Figure 1.- PRESION OSMOTICA DE EXTRACTOS DE SUELOS SATURADOS, EN RELACION A CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.

A.L.S.

pobre y poca disponibilidad de agua. Algunos estudios recientemente efectuados por Pearson y Bernstein (3) han indicado, sin embargo, que los efectos físicos de apreciables cantidades de sodio cambiabile son insignificantes. Se encontró que la disminución productiva de varios cultivos estaba relacionada con un porcentaje de sodio cambiabile, más que con la cantidad absoluta del sodio cambiabile presente. Se observó que no había relación entre el contenido de sodio de la planta y la tolerancia al sodio cambiabile, pero en general un aumento del porcentaje de sodio cambiabile en el suelo disminuye el contenido de calcio en la planta. Este dato se encuentra en la tabla 1.

Tabla 1
Relación entre la tolerancia del sodio cambiabile y el contenido de sodio y calcio en 10 cultivos.

Cultivos	Indice de Tolerancia (% Ex. Na. cuando la producción decrece 50%)	Contenido de Sodio en la planta (% Ex. Na. (ESP) = 30 Me/100 g.	Contenido de Calcio en las plantas	
			% Ex. Na. (ESP) = 3 Me/100g.	% Ex. Na. (ESP) = 3 Me/100g.
Frijol	16	15	208	154
Clover (Trevel)	28	9	105	95
Avena	29	82	30	13
Festuca	33	99	25	13
Arroz	38	14	22	26
Trigo	43	74	24	21
Alfalfa	45	30	125	89
Cebada	49	89	39	31
Remolacha	53	365	68	26
"Tall wheat grass"	64	83	27	15

Boro

Este elemento es esencial para el crecimiento normal de las plantas, pero la concentración necesaria es muy pequeña. El boro puede dañar las plantas, aún cuando en la solución del

suelo se presente en concentraciones muy bajas. Algunos efectos del boro son la clorosis y necrosis de las hojas, incluyendo la quemazón de las puntas y márgenes de la hoja. Las distintas especies de plantas tienen una tolerancia diferentemente marcada con relación al boro. En áreas donde hay tendencia a un exceso de boro, los cultivos tolerantes a él crecerán satisfactoriamente, mientras que las plantas sensibles morirán. El Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos sugiere que el límite no dañino del boro para los cultivos sensibles es, aproximadamente, 0.7 ppm. en el extracto de un suelo saturado. En la Tabla 2 de Eaton (2) se presenta la tolerancia relativa de algunos cultivos con respecto al boro.

Tabla 2

TOLERANCIA RELATIVA DE LAS PLANTAS CON RESPECTO AL BORO

Tolerantes	Semitolerantes	Sensibles
Espárragos	Girasol	Pecanas
Palma	Papa	Nueces
Dátiles	Algodón	Alcachofa
Remolacha	Tomate	Frijol
Alfalfa	Arvejas	Ciruelo
Gladiolus	Rábano	Pero
Habas (Broadbean)	Olivo	Manzano
Cebollas	Cebada	Vid
Nabo	Trigo	Cereza
Col	Maíz	Durazno
Lechuga	Millo	Albaricoque
Zanahoria	Avena	Naranja
	Zinnia	Palta
	Zapallo	Toronja
	Pimiento	Limón
	Camote	
	(lima bean)	

Tolerancia Relativa de los Cultivos a las Sales

Al evaluar la tolerancia de sal en los distintos cultivos, el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos ha usado la base de la producción relativa de los cultivos en suelos salinos, en comparación con su producción en suelos no salinos. La Tabla 3 se ha confeccionado basándose en lo arriba expuesto. Las listas de la tolerancia a la sal están arregladas de acuerdo a los cultivos principales y, en cada división, los cultivos están agrupados en 3 partes. En cada grupo los cultivos están en el orden de tolerancia salina decreciente. La conductividad eléctrica del extracto de saturación de los suelos (ECe) que se da al principio de la columna, representa ese nivel de salinidad en el cual se espera que decrezca en un 50% la producción, en comparación con las producciones que se obtienen en suelos no salinos, bajo condiciones comparables de crecimiento. Por ejemplo: para los cultivos con una alta tolerancia salina en la división de los cultivos generales, ECe valor de 16 mmhos/cm. que se encuentra al principio de la columna y 10 mmhos/cm. al final. Esto indica que los cultivos cerca del comienzo de la columna (suelo que tenga ECe de 16 mmhos/cm.) producirán solamente el 50% de su producción normal, producción que se verifica cuando están en suelos no salinos y los cultivos cerca del final de la columna (suelo que tenga ECe de 10 mmhos/cm) producirán solamente el 50% de su producción normal, producción que se realiza cuando están en suelos no salinos. Al usar la Tabla 3 es importante tener en cuenta que los factores climáticos locales tienen gran influencia en la reacción de las plantas, con respecto a la salinidad, y ésta debe considerarse en la evaluación de la tolerancia de las plantas a las sales.

Se debe recordar que algunas plantas sensibles a las sales durante la germinación, pueden ser bastante tolerantes durante sus estados posteriores de desarrollo. Un buen ejemplo es la remolacha. Bajo las condiciones del campo es posible usar prácticas para reducir la tendencia a la acumulación de

TABLA 3TOLERANCIA RELATIVA DE LOS CULTIVOS DE LAS SALES

<u>TOLERANTES</u>	<u>SEMITOLERANTES</u>	<u>SENSIBLES</u>	
	<u>FRUTALES</u>		
Palma Datilera	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Pera Manzana Naranja Toronja Ciruelo seco Ciruelo	Almendro Damasco Durazno Fresa Limón Aguate
	<u>CULTIVOS VARIOS</u>		
Ece x 10 ³ = 16	Ece x 10 ³ = 10	Ece x 10 ³ = 4	
Cebada (grano) Remolacha azucarera Nabo Algodón	Centeno(grano) Trigo (grano) Arroz Avena (grano) Sorgo	Maíz Lino Girasol Higuerilla	Judías
Ece x 10 ³ = 10	Ece x 10 ³ = 6		
	<u>HORTALIZAS</u>		
Ece x 10 ³ = 12	Ece x 10 ³ = 10	Ece x 10 ³ = 4	
Remolacha Col rizada Espárragos Espinaca	Tomate Brócoli Col Pimiento Coliflor Lechuga Maíz dulce	Papa Zanahoria Cebolla Arvejas Calabaza Pepino	Rábano Apio Guisantes
ECE x 10 ³ = 10	Ece x 10 ³ = 4	Ece x 10 ³ = 3	
	<u>FORRAJES</u>		
Ece x 10 ³ = 18	Ece x 10 ³ = 12	Ece x 10 ³ = 3	
Alkali sacaton Saltgrass Nuttall alkaligrass Pasto Bermuda Pasto Rescue Canada Wildrye Western wheatgrass Cebada (heno) Bridsfoot	Trébol blanco dulce Trébol amarillo dulce Ryegrass Inglés Mountain brome Trébol Strawberry Pasto Dallis Pasto Sudan Trébol Hubam Alfalfa (común California) Tall fescue Centeno (heno) Trigo (heno)	Avena (heno) Pasto oville • dactilo Gramma azul Meadow fescue Reed canary Big trefoil Smooth brome Tall meadow oatgrass Cicer milkvetch Sourclover Sickle milkvetch	Trébol White Dutch Meadow foxtail Alsike clover Trébol rojo Trébol Ladino Burnet
Ece x 10 ³ = 12	Ece x 10 ³ = 4	Ece x 10 ³ = 2	

sal alrededor de la semilla y mejorar los cultivos que son sensibles a ella durante la germinación.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Campbell, R. B. Bower, C. A., and Richards, L.A. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 13:66-69. 1949.
- 2) Eaton, F. M. Boron in soils and irrigation waters and its effect on plants with particular reference to the San Joaquín Valley of California. U.S. Dept. Agric. Tech. Bul. 448. 1935.
- 3) Pearson, George, A. and Berstein, L. Influence of exchangeable sodium on yield and chemical composition of plants, I Soil Science 82:247-258. 1956. II Soil Science 86:254-261. 1958.
- 4) U.S. Salinity Laboratory Staff, Salt Problems in Irrigated Soils. U.S. Dept. of Agric. Information Bulletin N° 190. 1958.

.-.-.-.-.-.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
ZONA ANDINA
Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
Lima - Perú

LA MEJORA Y EL MANEJO DE LOS SUELOS DE ALCALI Y DE LOS
SUELOS SALINOS

por

Matthew Drosdoff*

El desarrollo y mantenimiento de un exitoso proyecto de irrigación implica no solamente el proveer de agua para irrigar, sino también el control de la salinidad y del álcali. Al establecer un proyecto de irrigación, los suelos que son salinos requieren el retiro del exceso de sales y pueden necesitar una adición de otros productos químicos, además de una adecuada irrigación. Por otro lado, los suelos que no son salinos, al principio pueden volverse improductivos si hay exceso de sales solubles, o sodio cambiante, que pueda acumularse, debido a una irrigación no adecuada, o debido al manejo o drenaje inadecuado de los suelos. Existen muchos procedimientos empleados para el mejoramiento de las tierras salinas, pero los principios fundamentales son los mismos: 1) Lixiviación o lavado de las sales del suelo y 2) promover cambios químicos benéficos, principalmente mediante el incremento del calcio cambiante. Esto implica el empleo de agua de buena calidad en grandes cantidades, mejoramiento del sistema de drenaje y en muchos casos la necesidad de aplicar materiales, como sulfato de calcio (yeso). (1)

Las sales solubles aumentan o decrecen en la zona de la raíz, dependiendo de si el movimiento descendente de la sal es menor o mayor que la sal recibida debido a la irrigación y por otras fuentes. El balance de la sal en el suelo es afectada por la cantidad y calidad del agua para irrigar; la efectividad de la lixiviación y del drenaje revisten gran importancia. Si la

(*) " Especialista en Suelos. Consultor de la "International Cooperation Administration. I. C. A.

irrigación en la agricultura debe ser un éxito, la salinidad del suelo debe ser controlada.

Lixiviación

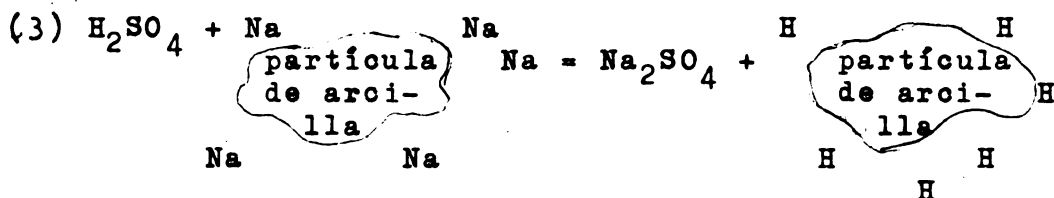
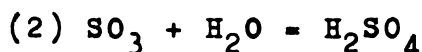
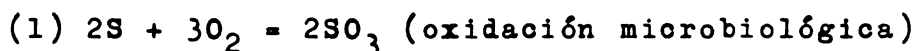
La lixiviación de las sales solubles en la zona de la raíz, es esencial en los suelos irrigables. Sin la lixiviación, las sales se acumulan en proporción directa con el contenido de la sal en el agua de riego y con la cantidad de agua aplicada. La concentración de las sales en la solución del suelo resulta principalmente de la extracción de la humedad del suelo por el proceso de evaporación y transpiración. Por ejemplo, se ha hecho un estimado que menos de dos pies de buena calidad de agua para irrigar contiene suficiente sal para cambiar, a un pie de profundidad, un suelo franco libre de sal y convertirlo en salino, si no hay lixiviación.

El requerimiento de la lixiviación puede definirse como la fracción del agua para irrigar que debe ser lixiviada a través de la zona de la raíz para controlar la salinidad del suelo. El requerimiento de la lixiviación dependerá de la concentración de la sal en el agua para irrigar y de la tolerancia del cultivo para con la sal en la solución del suelo. Se ha estimado, por ejemplo, que para aguas para irrigar con conductividad de 1, 2, y 3 millimhos/cm., respectivamente, los requerimientos de lixiviación serán cerca de 15, 25 y 40 por ciento para mantener un suelo con una conductividad eléctrica de 8 millimhos en el extracto saturado, lo que se aplica a cultivos moderadamente tolerantes a las sales (3).

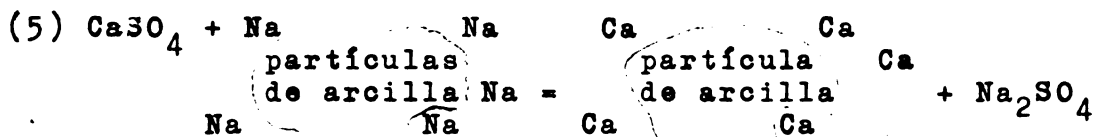
Para una lixiviación más efectiva, la irrigación debe ser uniforme en la aplicación y con un movimiento descendente del agua a través del suelo. Para esto la aplicación de agua mediante los métodos de bordes y pozas es mejor que mediante los métodos por surcos.

tos de aluminio y hierro. La cal molida tiene un uso limitado debido a su baja solubilidad, excepto en suelos ácidos que son altos en sodio cambiante.

El azufre se usa para mejorar los suelos de álcali debido a su costo relativamente bajo, pero su acción es algo lenta. Primeramente tiene que oxidarse por la acción microbiológica, para que en esta forma pueda reaccionar en el suelo. Las reacciones químicas son como siguen:



Si el carbonato de calcio está presente, el ácido sulfúrico que se ha formado reacciona con el carbonato de calcio para formar sulfato de calcio, el cual reacciona después con la arcilla de sodio, como sigue:



Bajo humedad favorable y condiciones de temperatura, se ha estimado que cerca de 2.5 toneladas de azufre por hectárea, usualmente están completamente oxidadas en 2 o 3 semanas. Grandes aplicaciones necesitan más tiempo para una oxidación completa. Sin embargo, bajo algunas condiciones, se ha encontrado que el azufre puede quedar en el suelo sin oxidarse por espacio de un año o más.

Drenaje

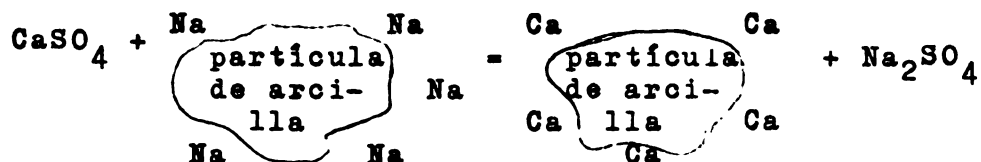
Un drenaje adecuado de las áreas irrigadas está directamente relacionado con la salinidad (2). Las sales en el agua para irrigación, en el suelo o en la napa de agua superficial, incrementan los requerimientos de drenaje. Se debe establecer una tabla de profundidad mínima de la napa de agua que permita una lixiviación adecuada, y que prevenga la concentración de las sales en la zona de la raíz por el movimiento ascendente de las mismas. Como un requerimiento mínimo, un sistema de drenaje debe ser adecuado para remover del suelo la cantidad equivalente de agua que debe pasar a través de la zona de la raíz, con el fin de mantener un balance favorable de sal. Por ejemplo, en las aguas para irrigar con una conductividad eléctrica de 0.5, 1, 2 y 4 millimhos/cm., la cantidad de agua que debe pasar a través del suelo debe ser 7, 14, 33 y 100 por ciento de la cantidad usada en la irrigación para mantener el contenido de la sal de un suelo con un extracto saturado de 8 millimhos/cm. en el cual se pueda sembrar cultivos moderadamente tolerantes a la sal (3).

Enmiendas

Para el mejoramiento de los suelos de álcali, además de lixiviación y drenaje, es muchas veces necesario considerar el uso de ciertos productos químicos, tales como yeso y azufre. La clase y cantidad a usarse de estos productos dependerá de las características del suelo, del factor tiempo y de las consideraciones económicas. El yeso y el azufre son los productos que comúnmente se usan para suelos de álcali, pero otros productos como solución de cal y azufre, cal molida, cloruro de calcio, sulfato de aluminio y hierro, ácido sulfúrico, han sido usados. La disponibilidad y costo de estos productos y la rapidez con que se desea mejorar estos suelos, determinan por sí solos los productos que deben ser usados. En general, los productos más activos son los más caros, tales como cloruro de calcio y sulfa-

El yeso es relativamente barato y es un producto efectivo para mejorar los suelos de álcali. Una desventaja del yeso es su lenta solubilidad en el agua, que es cerca de 0.25 por ciento en temperaturas ordinarias. La presencia de iones de sodio y cloruro aumenta la solubilidad del yeso, mientras que los iones de sulfato y calcio tienden a decrecer su solubilidad. Se estima que la aplicación de 3 a 4 pies de agua para irrigar es suficiente para disolver 10 toneladas por hectárea de yeso en polvo. El yeso se aplica algunas veces en el agua para irrigar. Un método muy simple es colocar una bolsa de yeso con un lado abierto, en la acequia regadora, de preferencia en la presa donde el agua tenga considerable turbulencia.

La reacción del yeso en un suelo de álcali es como sigue:



Determinaciones del sodio cambiabile y la capacidad de cambio pueden servir para estimar las cantidades de productos químicos que se necesitan para reducir el porcentaje del sodio cambiabile a niveles definitivos.

La tabla N° 1 muestra las toneladas de yeso y azufre necesitadas por hectárea para 30 cm. de suelo, en relación a los miliequivalentes de sodio en el suelo.

Tabla N° 1Cantidades de yeso y azufre requeridas para reemplazar al sodio de cambio

Sodio de cambio (miliequivalentes por 100 g. de suelo)	Yeso (CaSO ₄ · 2H ₂ O) Ton/ha/30 cm	Azufre (S) Ton/ha/30 cm
1	4.0	.75
2	8.0	1.50
3	12.0	2.25
4	16.0	3.0
5	20.0	3.75

El procedimiento para estimar la cantidad de yeso o azufre que se necesita, se ilustra en el siguiente ejemplo:

La capa de suelo de 0-30 cm. contiene 5 miliequivalentes de sodio cambiante por 100 g. y tiene una capacidad de cambio de 10 miliequivalentes por 100 g. El porcentaje de sodio cambiante es, por lo tanto, 50. Se desea reducir esto a 10. Esto necesitará el reemplazo de 4 miliequivalentes de sodio cambiante. Con referencia a la Tabla N° 1, se puede ver que se necesitarán cerca de 16 toneladas de yeso, o 3 toneladas de azufre por hectárea.

La etapa final en el mejoramiento de los suelos salinos y de álcali, después de una adecuada lixiviación, drenaje y el uso de productos químicos si fuese necesario, serían prácticas para el buen manejo del suelo. Los nutrientes de las plantas que son lixiviados del suelo, deben ser reemplazados y eso significa una buena fertilización, generalmente con nitrógeno, fósforo y potasio. Guano de corral y abonos verdes deben incorporarse en el suelo para mejorar la estructura del suelo y proveer de nutrientes. Se debe usar un buen método de labranza para recuperar y mantener la estructura del suelo.

BIBLIOGRAFIA

1. Greene, H. Using Salty Land, FAO Agricultural Studies N° 3, 1948.
2. Kelley, W. P., Laurence, B. M., y Chapman, H. D. Soil Salinity in Relation to Irrigation. Hilgardia 18: 635-665. 1949.
3. Laboratorio de Salinidad en los Estados Unidos. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S. Dept. of Agric. Handbook N° 60. 1954.

.-.-.-.-.-.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
ZONA ANDINA
Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
Lima - Perú

CALIDAD Y CLASIFICACION DE LAS AGUAS PARA EL RIEGO

por

Matthew Drosdoff*

Calidad de las Aguas para el Riego

Todas las aguas para el riego contienen sales solubles, siendo las principales los cationes de calcio, magnesio y sodio y los aniones, cloruro y sulfato. El catión potasio y los aniones bicarbonato, carbonato y nitrato están en el agua en muy pequeñas cantidades. Hay una gran variación en la cantidad de sales solubles en el agua de riego, fluctuando de agua pura que contiene menos de 100 ppm. de sales solubles, a aguas que contienen más de 3,000 ppm. de sales solubles en total. Casi todas las aguas para irrigar que han sido usadas con éxito, contienen menos de 1,500 ppm. del total de sales disueltas. Aguas con concentraciones más altas son usadas ocasionalmente, pero la producción de los cultivos, excepto bajo condiciones poco usuales, no son satisfactorias. La calidad pobre del agua subterránea, así como de las aguas de la superficie, es un factor limitante en la irrigación de muchas áreas.

Las características más importantes para determinar la calidad de agua de riego son:

- (1) Concentración total de las sales solubles.
- (2) Proporción relativa del sodio con respecto a otros cationes.
- (3) Concentraciones de boro o de otros elementos tóxicos.
- (4) Concentraciones de iones de bicarbonato con respecto al calcio más magnesio.

(*) Especialista en Suelos. Consultor de la "International Cooperation Administration". I.C.A.

Concentración de Sales Solubles

La Tabla N° 1 da la composición química de algunos ríos del Oeste de los Estados Unidos que se usan en la irrigación. Se debe notar que hay varias formas de expresar los datos de las sales disueltas. Una de las formas comunes es en términos de partes por millón, pero la forma más exacta es en términos de miliequivalentes por litro. Esta es la razón por qué un miliequivalente de un ion combina con un miliequivalente de otro ion, en vez de combinar en la base de peso. De este modo la concentración de los iones en la base de miliequivalentes da un concepto más claro de la relación entre los diferentes iones. Para expresar la concentración de las sales disueltas en las aguas para irrigar, la conductividad eléctrica es más útil, porque puede ser más fácil y determinarse con exactitud.

Usualmente la conductividad eléctrica para el agua de irrigar se expresa en micromhos/cm., el cual es igual a millimhos/cm. dividido por 1000. Para el agua de irrigación de composición promedio de diferentes sales, hay la siguiente relación entre las formas de expresar las sales disueltas.

- (1) Conductividad eléctrica en micromhos/cm x 0.01 = aproximadamente miliequivalentes por litro de los cationes. Esta relación varía según el tipo del catión. El factor con aguas altas en calcio y magnesio debe tener un factor de 0.008, en vez de 0.01.
- (2) Conductividad eléctrica en micromhos/cm. x 0.64 = aproximadamente las partes por millón (ppm).
- (3) Miliequivalentes por litro x 64 = aproximadamente partes por millón (ppm.)

Estas relaciones son solamente aproximadas, como se puede ver en la Tabla N° 1. Por ejemplo, las partes por millón de las sales disueltas del río Arkansas en La Junta, Colorado, son un poco más altas que las del río Arkansas en Ralston, Oklahoma, pero la conductividad eléctrica es mucho menor debido a la presencia de más sales de calcio y magnesio en comparación con el sodio. Ya que la conductividad eléctrica es una medida más precisa para diagnosticar y clasificar las aguas para irrigar, su uso es preferido.

Si no se dispone del equipo para determinar la conductividad eléctrica, se puede determinar la cantidad de sólidos disueltos, filtrando uno o dos litros de agua, evaporando luego el agua y pesando el residuo.

Las partes por millón de sólidos disueltos =

$$\frac{\text{gramos del residuo} \times 1,000,000}{\text{mililitros de agua}}$$

Por ejemplo, si un litro de agua contiene 0.50 gramos de residuo, entonces las partes por millón de los sólidos disueltos serán =

$$\frac{0.50 \times 1,000,000}{1,000} = 500$$

Para convertirlo a la conductividad eléctrica aproximada en micromhos/cm. multiplíquese por 1.6. En este caso, agua con 500 ppm. de sólidos disueltos tendrá una conductividad eléctrica de, aproximadamente, 800 micromhos/cm.

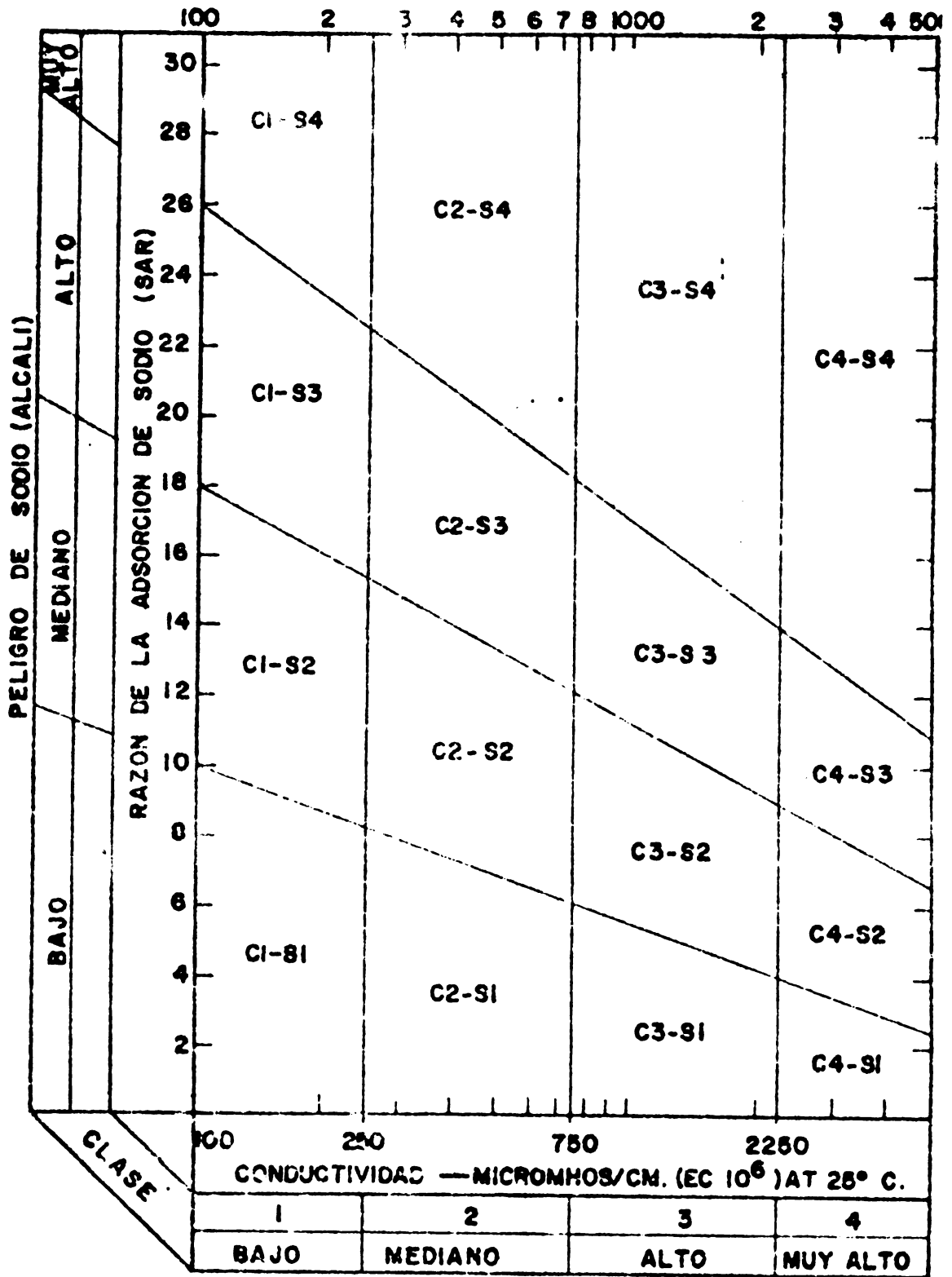
Otro método más preciso para determinar las sales solubles es determinar la concentración de constituyentes individuales en la solución y sacar el total de miliequivalentes. Esto requiere un buen análisis cuantitativo.

COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNOS RIOS USADOS EN LA IRRIGACION
EN EL OESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS

TABLA N° 1*

Localidad	Río	Sales disueltas ppm	Conductividad eléctrica micromhos cm.	Suma de cationes m.s./litro	Miliequivalentes per litro							Bere ppm
					Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	HCO ₃	
Williston, N. Dakota	Missouri	574	838	9.5	3.5	2.4	3.5	0.13	5.4	0.34	3.5	0.1
Rye Patch, Nevada	Humboldt	658	1173	11.6	1.8	1.9	7.9	--	2.2	4.5	5.2	0.6
Miles City, Montana	Yellowstone	368	548	5.7	2.3	1.2	2.1	0.11	3.0	0.15	2.4	0.1
La Junta, Colorado	Arkansas	981	1210	14.4	7.2	3.5	3.5	0.24	6.8	0.62	4.0	0.1
Falston, Oklahoma	Arkansas	967	1670	14.5	4.3	2.1	8.0	--	4.4	7.3	2.8	--
Otowi Bridge, N. México	Río Grande	227	340	3.4	1.9	0.7	0.8	--	1.5	0.14	1.8	--
Delta, Utah	Sevior	1574	2400	25.8	3.1	6.9	15.3	0.46	8.4	12.5	4.8	0.5
Carlsbad, N. México	Recos	2380	3210	38.0	17.3	9.2	11.5	--	23.1	12.0	3.2	--
Black Canyon, Idaho		60	100	0.9	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.6	

* Obtenido de la Tabla 12 U.S. Dept. Agric. Handbook N° 60, "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils".



PELIGRO DE SALINIDAD

Figure 2.— Diagrama para clasificar las aguas según su concentración total de sales y el peligro de sodio en conjunto. Se basa en el nomograma de la figura 1 (Tomado del libro de U.S. Laboratorio de Salinidad Riverside, Calif.).

Razón de la Adsorción de Sodio

Es importante saber la proporción de sodio con respecto a otros cationes, especialmente calcio y magnesio, para determinar la calidad de agua de riego. Una buena proporción de sodio en el agua de riego puede dar como resultado la formación de un suelo de álcali y causar serios descensos en la producción de los cultivos. Se ha probado que con el uso de una fórmula que da las proporciones de iones sódicos a iones de calcio y magnesio en el agua de riego, se puede predecir el porcentaje de sodio que tendrá el suelo. El porcentaje de adsorción de sodio (SAR) para las soluciones del suelo y el agua de riego, ha sido definido en la siguiente forma:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\frac{\sqrt{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}}{2}}$$

Donde Na^+ , Ca^{++} , y Mg^{++} representan las concentraciones en mili equivalentes por litro de estos iones. En la figura 1 se muestra un nomograma para estimar el valor SAR del agua de riego.

Una escala ESP (porcentaje de sodio cambiabile) se muestra paralela a la escala SAR. El porcentaje de sodio cambiabile (ESP) está relacionada al SAR por la siguiente ecuación empírica:

$$\text{ESP} = 100 \frac{(.0126 + 0.1475 \text{ SAR})}{1 + (-.0126 + .01475 \text{ SAR})}$$

Por lo tanto, es posible estimar cual será el porcentaje de sodio cambiabile (ESP) si se conoce el valor SAR del agua de riego. Bajo las condiciones de campo, la solución del suelo es, usualmente, 2 o 3 veces más concentrada que el agua de riego, debido a la evaporación y absorción del agua por las raíces de las plantas. Por consiguiente, el valor ESP de los suelos, generalmente es más alto que el valor estimado por el SAR. Esto se toma en consideración al clasificar el agua de riego en la base de peligro con la presencia de sodio.

Boro

El boro prácticamente es un constituyente de todas las aguas naturales. Es un elemento esencial para el crecimiento normal de las plantas, pero la cantidad que necesitan las plantas es muy pequeña. Una concentración relativamente baja de boro en las aguas para irrigar puede ser tóxica para las plantas. Por ejemplo, el agua de riego que contenga 1 o 2 partes por millón de boro puede ser tóxico para los cítricos. Por otro lado, otros cultivos como alfalfa, pueden tolerar más de 4 ppm de boro aplicado en el agua de riego. En consecuencia, es necesario determinar la concentración de boro en el agua de riego para una apreciación de su calidad.

Bicarbonato

Las aguas que contienen altas concentraciones de iones de bicarbonatos, y mientras más concentrada se vuelve la solución del suelo, hay tendencia a que se precipiten carbonatos del calcio y el magnesio. Bajo estas condiciones si el calcio y el magnesio se reducen a la proporción relativa del sodio, se aumenta el porcentaje de sodio cambiante en el suelo.

Clasificación de Aguas para Riego

Al clasificar las aguas para irrigar se supone que el agua será usada bajo condiciones promedio de la textura del suelo, rapidez de infiltración, drenaje, cantidad del agua usada, clima y tolerancia de sales. Grandes desviaciones de cualquier uno de estos factores, pueden cambiar la interpretación de la clasificación. En la clasificación más reciente presentada en el libro del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, N° 60, sobre Suelos de Alkali y Salinos (1) se consideran 2 factores en la clasificación del agua para riego: (a) peligro de salinidad y (b) peligro del sodio. Esta clasificación se expone en la Figura N° 2 tomada del libro de Salinidad de Riverside, California.

Para el uso del diagrama que se expone en la Figura N° 2 es necesario determinar la conductividad eléctrica y las concentraciones de sodio y calcio más magnesio en el agua de riego. Si se conoce solamente el valor del calcio más magnesio, se puede estimar el sodio como sigue:

$$\text{Na}^+ = \frac{(\text{EC} \times 10^6)}{100} - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

En el caso que se conozca solamente el sodio, se puede estimar el calcio más magnesio por la siguiente ecuación:

$$(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) = \frac{\text{EC} \times 10^6}{100} - \text{Na}^+$$

Las concentraciones iónicas se expresan en miliequivalentes por litro.

El porcentaje de adsorción del sodio se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

o estimando el nomograma de la Figura 1. Usando los valores SAR y el $\text{EC} \times 10^6$ como coordenadas, el punto correspondiente del diagrama puede ser determinado. La posición del punto determina la clasificación de calidad del agua. Esto puede ilustrarse con el análisis de la muestra de agua del río Humboldt en Rye Patch, Nevada, como se muestra en la Tabla 1. El calcio más el magnesio es igual a 3.7 miliequivalentes por litro; sodio, 7.9, y la conductividad eléctrica de 1173 micromhos/cm. El valor SAR del nomograma (Figura N° 1) es 5.9. El punto en el diagrama correspondiente a estas coordenadas ($\text{SAR} = 5.9$, $\text{EC} \times 10^6 = 1173$) clasifica el agua con C3-S1. El significado o interpretación de la escala en cuanto a calidad de clases en el diagrama, se da más abajo.

A) Peligro de Salinidad

Con respecto a la salinidad, las aguas se dividen en 4 clases en la base de conductividad eléctrica, los puntos divisorios entre clases son 250, 750, y 2,250 micromhos/cm. Estas clases fueron seleccionadas de acuerdo con la relación entre conductividad eléctrica del agua para riego y la conductividad eléctrica de los extractos saturados del suelo. Se ha encontrado que la conductividad del extracto saturado de un suelo en ausencia de acumulaciones de sal de la napa de agua, usualmente varía de 2 a 10 veces tan alto como la conductividad del agua para riego. Las 4 clases de agua para riego basadas en la conductividad eléctrica son como siguen:

1. Conductividad menor de 250 micromhos/cm.

Puede usarse en la irrigación de la mayoría de los cultivos, en casi todos los suelos, sin peligro de que se desarrolle la salinidad.

2. Conductividad entre 250 y 750 micromhos/cm.

Es considerado de salinidad media y puede ser usado si hay una moderada cantidad de lixiviación. Plantas de tolerancia moderada a la sal, pueden crecer, en la mayoría de los casos, sin prácticas especiales para el control de la salinidad.

3. Conductividad entre 750 y 2,250 micromhos/cm.

Es agua de salinidad muy alta y no es aceptable para la irrigación bajo condiciones ordinarias, pero puede ser usada bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, el agua debe aplicarse en exceso para proveer una lixiviación considerable, y se deben seleccionar cultivos muy tolerantes a la sal.

Los requerimientos de lixiviación para suelos donde no hay precipitaciones de sal están directamente relacionados con la conductividad eléctrica del agua para riego y con la conductivi-

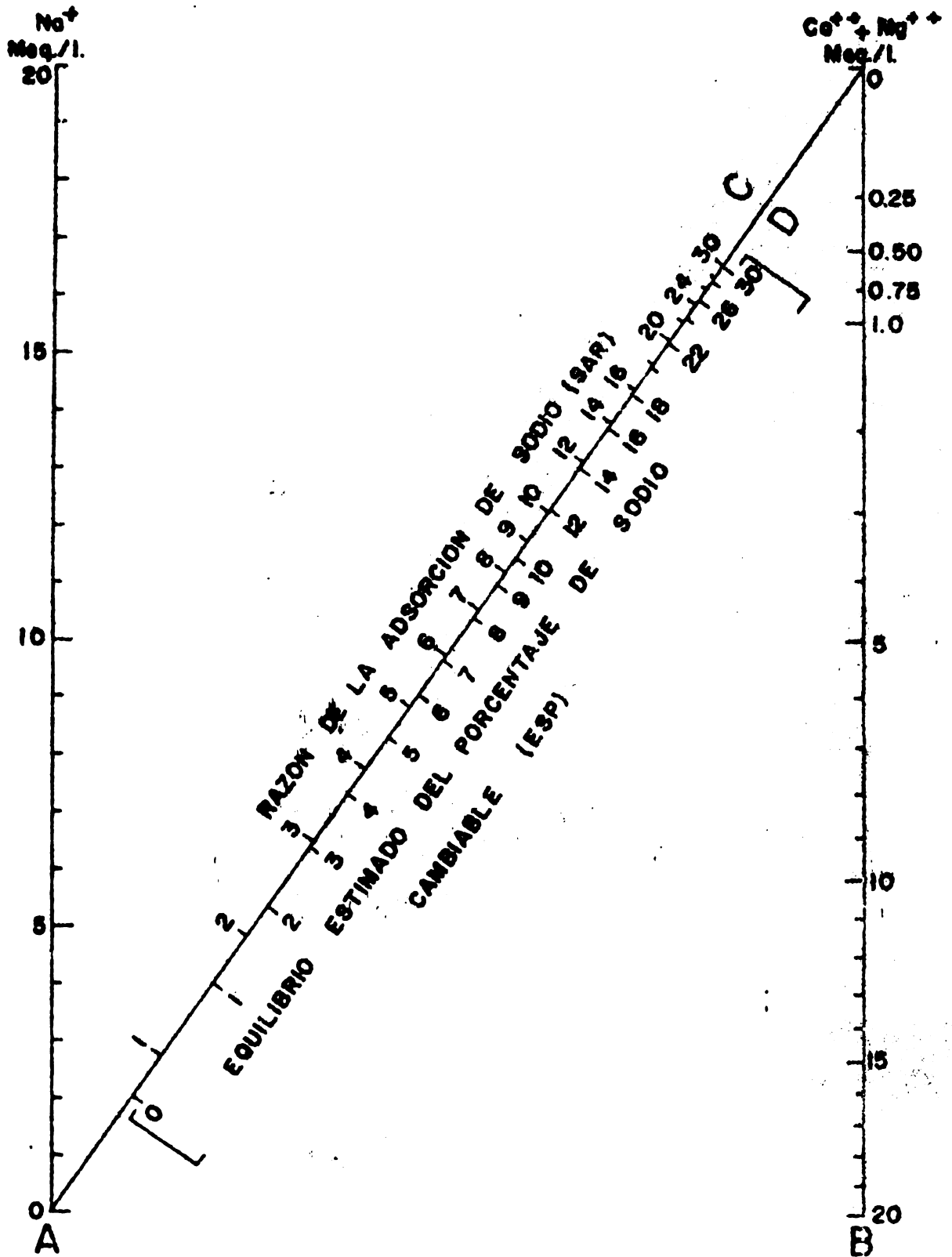


Figure 1.— Nomograma para determinar valores del agua para riesgo de SAR (Preparación de sodio adsorbido en relación de calcio y magnesio) y estimación de porcentaje de sodio cambiante (ESP)

dad permisible del agua de drenaje de la zona de la raíz. Los requerimientos de lixiviación para las diferentes conductividades eléctricas, valores de irrigación y aguas de drenaje se dan en la Tabla N° 2. Estos datos están basados en la fórmula:

Requerimientos de lixiviación =

$$\frac{\text{Conductividad eléctrica del agua para riego}}{\text{Conductividad eléctrica del agua de drenaje}}$$

Por ejemplo, si el agua para riego tiene una conductividad eléctrica de 750 y se desea mantener el agua de drenaje en la zona de la raíz a una conductividad eléctrica de 4000 millimhos/cm., entonces el 18.8 por ciento del agua para riego deberá ser lixiviada a través de la zona de la raíz ($\frac{750}{4000} \times 100 = 18.8$)

Tabla N° 2

Requerimientos de lixiviación (porcentaje del agua para riego aplicada que debe ser lixiviada a través de la zona de la raíz) relacionados con la conductividad eléctrica del agua para riego y drenaje.

Electricidad conductiva del agua para riego. micromhos/cm	Requerimiento de lixiviación para los valores máximos indicados de la conductividad del agua de drenaje en la profundidad de la zona de la raíz.			
	4	8	12	16
100	2.5	1.2	0.8	0.6
250	6.2	3.1	2.1	1.6
750	18.8	9.4	6.2	4.7
2,250	56.2	28.1	18.8	14.1
5,000		62.5	41.7	31.2

B) Peligro del Sodio

Con respecto al peligro del sodio, la clasificación del agua para riego, es más complicada que la clasificación para salinidad. Una de las formas es estimar la cantidad probable de sodio que el suelo absorberá del agua y velocidad de absorción cuando se aplica el agua. Si no hay absorción de agua por las raíces de la planta, y tampoco evaporación superficial, entonces el porcentaje de sodio cambiante (ESP) puede deducirse del valor SAR del agua que aumenta en el suelo, debido al aumento de concentración de todas las sales y la posible precipitación de las sales de calcio y magnesio, mientras que el contenido de humedad decrece por extracción de la planta y evaporación superficial. El resultado ESP es un poco más alto que lo que se deduce directamente del valor SAR del agua. Aunque el valor SAR es el mejor índice disponible del ESP del suelo en relación con el agua de riego, la concentración total de cationes es un factor adicional y está considerado en la clasificación del peligro del sodio en el agua de riego.

Las 4 clases de agua basadas en el peligro del sodio son las siguientes:

- 1) Agua de baja cantidad de sodio (S_1); se puede usar en la irrigación de casi todos los suelos con muy poco peligro de desarrollar cantidades dañinas de sodio de cambio, excepto para los cultivos sensibles.
- 2) Agua de media cantidad de sodio (S_2); será un peligro en suelos de textura fina en condiciones de lixiviación lenta, a menos que esté presente el yeso en el suelo. Esta agua puede ser usada en suelos arenosos con buena permeabilidad.
- 3) Agua con un alto contenido de sodio (S_3); puede producir cantidades dañinas de sodio cambiante en la mayoría de los suelos y necesitará un buen drenaje y una lixiviación muy intensa. Los suelos con yeso tal vez no desarrollen efectos dañinos de estas aguas.
- 4) Agua con un contenido de sodio muy alto (S_4); por lo general, no es satisfactoria para la irrigación, excepto cuando la salinidad es baja y donde el yeso está presente o donde se le agrega yeso.

Bibliografía

- (1) U.S. Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, U.S. Dpto. of Agric. Handbook N° 60, 1954.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
ZONA ANDINA
Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
Lima - Perú

METODO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE MARCHITEZ
PERMANENTE

Las instrucciones que se dan a continuación constituyen un resumen de la técnica seguida en la Universidad de California para la determinación del coeficiente de marchitez permanente.

Equipo necesario

1. Latas de una libra provistas de tapa de presión. En el centro de las tapas se perfora un orificio de un centímetro de diámetro. Cuando se hacen muchas determinaciones en forma simultánea, conviene dar a todas las latas un peso uniforme, para lo cual se emplean municiones de plomo.
2. Una cámara húmeda y oscura. Esta cámara está constituida por un tanque provisto de agua en el fondo y de un falso piso de rejilla, sobre el cual se colocarán las latas, según se indicará más adelante. Un cuñete de 53 galones partido por la mitad servirá para estos fines. La tapa puede hacerse de madera.

Método

El procedimiento a seguir en la determinación de este coeficiente es el siguiente:

1. Póngase en cada lata una muestra de suelo de 600 g. . aproximadamente. El suelo ha sido previamente sacado al aire y pasado a través de un tamiz de 2 mm., cuando contenga partículas de grava.
2. Aplíquese agua suficiente a cada lata para elevar el contenido de humedad del suelo hasta la capacidad de campo.

3. Siémbrese en cada lata 3 o 4 semillas de girasol y colóquense las latas en el invernadero.
4. Aplíquese agua a cada lata en forma periódica para reemplazar el agua que las plantas hayan consumido. Conviene que la cantidad de agua aplicada no sea mayor que la necesaria para volver el suelo a su capacidad de campo.
5. Una vez que las cuatro plantas hayan crecido unos 4 cm. del suelo selecciónese la planta más vigorosa y destrúyanse las restantes. La planta que quede se hará pasar por el orificio de la tapa.
6. Cuando esta planta haya desarrollado unos 3 o 4 pares de hojas, además de las hojas cotiledonares, se dejará de aplicar agua y se colocará un poco de algodón en el orificio y alrededor del tallo de la planta para evitar la evaporación del agua.
7. Obsérvese la planta diariamente con el fin de establecer los primeros signos de marchitez, los cuales se manifiestan por una flacidez de las hojas inferiores.
8. Cuando se presenten los primeros sistemas de marchitez se colocarán las plantas en una cámara húmeda y oscura, y después de varias horas allí, se observará si dichas plantas han recobrado o no su turgencia. Si las plantas se recuperan se vuelven a colocar en el invernadero y la observación se continúa, repitiendo la colocación de dichas plantas en la cámara húmeda hasta cuando no muestren signos de recuperación. Esto indica que la humedad en el suelo ha llegado al coeficiente de marchitez permanente.
9. Cuando esto haya ocurrido se cortará la parte aérea de las plantas a ras del suelo y se procederá a pesar las latas con su contenido de suelo y raíces, y en forma separada la parte aérea de las plantas.

10. Las latas se llevarán, entonces, en una estufa en donde la temperatura se mantendrá a 105°C o 110°C. La operación de secado dura unos dos días y, en todo caso, esta operación debe prolongarse hasta cuando el peso de las latas se haga constante.
11. Se procederá a pesar, luego, las latas con el suelo seco y se descontará de este peso el de las raíces. El peso de las raíces se estima sobre la base de que éstas pesan un 50% del peso de la porción aérea de la planta y que el contenido de humedad de la misma es de 80% de su propio peso.
12. Para facilitar los cálculos se recomienda registrar los datos en un formulario como el que se incluye en hoja anexa.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA O.E.A.
 ZONA ANDINA
 Proyecto 39 - Programa de Cooperación Técnica
 Lima - Perú

ANALISIS MECANICO DE LOS SUELOS*

La mayoría de los métodos empleados para el análisis mecánico de los suelos se desarrolla en dos etapas:

1. La dispersión de la muestra; y,
2. La separación de las partículas según su tamaño.

La Dispersión de la Muestra

La dispersión de la muestra debe realizarse en forma completa, con el fin de desintegrar los agregados del suelo e individualizar las partículas del mismo. Los factores que se oponen a esta desintegración de los agregados, pueden resumirse en la forma siguiente:

- a. Agentes Cementantes. La materia orgánica, la arcilla coloidal y los coloides deshidratados (sesquióxidos de aluminio y de hierro) tienden a producir agregados porque actúan como agentes cementantes que retienen unidas las partículas de suelo.
- b. Rehidratación de las partículas de suelo. Cuando las partículas de suelo se secan, la película de humedad que rodea a estas partículas se adelgaza progresivamente, hasta que las partículas adyacentes se juntan con una fuerza cohesiva muy fuerte. Cuando el contenido coloidal del suelo es alto, el proceso de rehidratación se realiza de manera muy lenta. Por esto el contenido de humedad del suelo en el momento en que la muestra es agitada, afecta considerablemente el grado de dispersión que pueda obtener-

(*) Resumen preparado con base en el capítulo correspondiente de Beaver: Soil Physics.

se. La conclusión práctica que puede derivarse con relación a este factor es que, mientras más seco y más pesado sea el suelo, más tiempo será necesario para producir su dispersión.

- c. El efecto de la carga eléctrica. La estabilidad de una suspensión de arcilla depende del potencial eléctrico en las partículas coloidales. Estas partículas llevan una carga eléctrica negativa y mientras más pequeño sea el potencial, menor será el grado de repulsión entre las partículas. La magnitud del potencial eléctrico depende del número de cargas por unidad de superficie y del grado de actividad de estas cargas, por lo que la naturaleza de los cationes absorbidos afecta la estabilidad de las suspensiones de arcilla. Mientras mayor sea la energía necesaria para retener los cationes absorbidos, menor será la estabilidad de las suspensiones y mayor la tendencia a la decantación. La serie de Hofmeister (Li) > Na > K = NH₄ > Rb > Cs) muestra la energía relativa con que los diferentes cationes son retenidos por las partículas coloidales.

Métodos para la Dispersión

La dispersión de las muestras de suelo puede producirse por métodos físicos o por métodos químicos. Entre los primeros pueden mencionarse la agitación, el batido, la ebullición y la trituración. Los métodos químicos se basan en tres principios fundamentales:

1. La oxidación de la materia orgánica;
2. La remoción de los iones flocculantes; y,
3. La pectización por medio de iones deflocculantes que aumenten el potencial eléctrico negativo de las partículas.

La oxidación puede producirse con algún compuesto oxidante, como H₂O₂. La remoción de los iones flocculantes tales como Ca y Mg, puede producirse por medio de ácidos diluidos o agregan

do sales de sodio. La eficiencia de los agentes pectizantes radica en la habilidad de éstos para aumentar el potencial negativo de las partículas coloidales, habilidad que aumenta con el grado de hidratación de los iones y que es mayor para los cationes monovalentes, según la serie de Hofmeister citada arriba. Inicialmente se usó el amonio como agente pectizante, debido a que podía separarse fácilmente por medio de la ebullición, pero desde hace algún tiempo se prefiere el empleo del sodio, que resulta más efectivo.

La Separación de las Partículas

La mayor parte de los métodos empleados hoy para el análisis mecánico de los suelos, se basa en la Ley de Stokes que establece que la resistencia ofrecida por un líquido al descenso de las partículas en suspensión, varía en forma directamente proporcional a 1 cuadrado del radio de las partículas. Esta ley puede escribirse así:

$$V = \frac{2}{9} \frac{(D_p - D_o) g r^2}{u}$$

En la cual V = Velocidad de descenso de las partículas.

D_p = Densidad real del suelo.

D_o = Densidad del agua.

r = Radio de las partículas.

g = Aceleración de la gravedad.

u = Viscosidad del líquido.

La Ley de Stokes asume como cierto lo siguiente:

1. Que las partículas del suelo son mayores que las moléculas del líquido, de tal manera que los movimientos Brownianos no afectan el descenso.

2. El volumen del líquido debe ser grande en comparación con el tamaño de las partículas. El descenso de las partículas no debe ser afectada por la proximidad de las paredes del recipiente o de las partículas vecinas.
3. Las partículas son rígidas y semi-redondeadas.
4. No hay deslizamiento entre las partículas y el líquido.
5. La velocidad de descenso no debe exceder ciertos valores como para que la viscosidad del líquido sea el único factor que se oponga al descenso. Las partículas de tamaño mayor que el liso no pueden separarse con precisión por medio de la ley de Stokes.

La ley de Stokes ofrece algunas limitaciones que se indican a continuación:

1. Como la velocidad de descenso varía en relación inversa a la de la viscosidad del líquido, resulta necesario mantener su temperatura uniforme durante el análisis (la velocidad a 30°C es 12% mayor que a 25°C).
2. La densidad de las partículas de suelo no es uniforme. Ella depende de la constitución química y mineralógica de dichas partículas.

Como puede observarse, la aplicabilidad de la Ley de Stokes para los análisis mecánicos ofrece limitaciones serias, por cuanto el tamaño, la forma y la densidad de las partículas de suelo son muy variables y complejas. Algunas partículas pueden ofrecer diferencias en uno o en varios de los factores mencionados y, sin embargo, pueden tener la misma velocidad de descenso. Por esta razón se ha sugerido, inclusive, la conveniencia de definir el tamaño de las partículas en términos de

su velocidad de decantación, en lugar del diámetro medio.

El Método de Bouyoucus

Este método, debido a su simplicidad, se ha generalizado notablemente. Es interesante anotar que dicho método coincide de manera muy satisfactoria con el método de la pipeta, considerado como uno de los más precisos.

Procedimiento

El método de Bouyoucus se basa en la relación que existe entre la proporción de partículas que contiene una suspensión y la densidad de dicha suspensión. De acuerdo con la ley de Stokes, las partículas de diámetro mayor se asientan más rápidamente que las partículas menores, lo que implica que la densidad de una suspensión de suelo y el tamaño de las partículas suspendidas disminuyen progresivamente en función del tiempo. El método de Bouyoucus emplea un hidrómetro para medir la densidad de la suspensión, densidad ésta que está íntimamente relacionada con el tamaño de las partículas suspendidas en el momento de la lectura.

Equipo. El equipo necesario para el análisis mecánico está constituido por los siguientes elementos:

Batidor eléctrico.

Hidrómetro de Bouyoucus.

Cilindro con capacidad para 1,130 cm³.

Termómetro.

Balanza con aproximación de 0.1 g.

Hidróxido de sodio normal.

Oxalato de sodio saturado.

Los pasos que deben tomarse para el análisis mecánico de un suelo por el método de Bouyoucos, son los siguientes:

1. El suelo que va a analizarse debe pasarse por un tamiz de 2 mm.
2. Colóquese en el vaso del agitador 50 g. de suelo seco, previamente tamizado.
3. Agréguese agua destilada hasta llenar los $\frac{2}{3}$ del vaso y pónganse en el mismo 5 cm³ de oxalato de sodio saturado y 5 cm³ de hidróxido de sodio normal.
4. Después de 5 minutos colóquese el vaso en el batidor y déjese allí entre 5 y 10 minutos (5 minutos para los suelos de textura gruesa y 10 minutos para los suelos pesados).
5. Transfiérase la suspensión al cilindro especialmente marcado, y colóquese en ésta el hidrómetro, agregando agua destilada hasta enrasar con la marca del cilindro (1130 cm³).
6. Sáquese el hidrómetro y, tapando con la mano la boca del cilindro, agítese la suspensión durante 30 segundos.
7. Colóquese el cilindro rápidamente sobre la mesa y póngase a funcionar el cronómetro, colocando nuevamente el hidrómetro dentro de la suspensión.
8. A los 40 segundos se tomará la lectura del hidrómetro y con un termómetro se registrará también la temperatura de la suspensión. En seguida debe sacarse el hidrómetro.
9. Una hora después de la primera lectura se hace la segunda lectura del hidrómetro y se vuelve a tomar la temperatura de la suspensión.

Formulario de Registro

Tiempo Transcurrido	Lectura del Hidrómetro	Temperatura	Corrección por Temperatura	Lectura corregida del Hidrómetro
40"	21.0	25°C	2.0	23.0
1H-0'-40"	4.5	24°C	1.64	6.14

Limo + Arcilla = $23 \times 2 = 46\%$

Arcilla = $6.14 \times 2 = 12.28\%$

Limo = $46.0 - 12.3 = 33.7 \%$

Arena = $100 - 46 = 54.0\%$

Denominación del Suelo: Franco-Arenoso.

Las correcciones del hidrómetro se hacen sumando algebraicamente a las lecturas originales el producto entre la temperatura original en grados Fahrenheit y 67°F , por el factor 0.2

Nota:

Puesto que la determinación de la textura por el método de Bouyoucus se hace indirectamente, estableciendo la densidad de la suspensión, los resultados que se obtienen con este método en suelos con una alta concentración de sales no son confiables, ya que las sales en solución aumentan la densidad de la suspensión en forma considerable e introducen una fuente de error apreciable. En estos casos conviene lavar las sales del suelo antes de tomar la muestra necesaria para el análisis.

.-.-.-.-.-

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

I N D I C E

	Página
<u>Información</u>	I
<u>Nota de los Reeditores</u>	II
<u>Economía del agua en las plantas</u>	1
A) Hidrología de la planta	1
B) Marchitamiento y muerte por deshidratación	4
C) Resistencia a la sequía	8
D) Efectos fisiológicos de la deficiencia de agua	11
E) Efectos fisiológicos del exceso de agua	16
F) Orientación del riego por indicadores fisiológicos	18
Referencias bibliográficas	25
<u>Propiedades físicas de los suelos</u>	27
Textura. Estructura. Gravedad específi- ca. Poros	27 - 29
El agua del suelo. Constantes de humedad ...	30
Clasificación del agua en el suelo	37
Almacenamiento del agua en el suelo	40
Profundidad de las raíces	41
Métodos para determinar humedad suelo de la estufa; resistencia eléctrica, punta gravi- métrica; estimación aproximada de campo	42
Referencias bibliográficas	50
<u>Movimiento del agua en el suelo</u>	51
Ascenso capilar	54
Evaporación del agua en la superficie del suelo	56
Movimiento del agua a las raíces, de la mesa de agua	59

Movimiento del agua en el suelo después del riego	59
Movimiento gravitacional del agua en el suelo	60
Permeámetro de altura constante	61
Permeámetro de altura variable	62
Bibliografía	65
<u>Requisito del agua de las plantas</u>	67
Consumo de agua	67
La transpiración	67
La evaporación, métodos de determinarla	68
El Uso Consuntivo, fórmulas basadas en datos climatológicos	70
Eficiencia del riego	73
" de la conducción	73
" de la aplicación	74
" del uso	75
" de la irrigación	75
Factores que reducen la eficiencia	76
Dotación de riego	77
Dotación de agua en cada riego	79
Duración del riego	79
Frecuencia de los riegos	80
Referencias bibliográficas	86
<u>Métodos de riego</u>	87
I. Métodos superficiales	87
II. " subterráneos	88
III. " de aspersión	88
Métodos superficiales	88
Riego por desbordamiento	89
Riego por melgas con bordes	90
Riego por secciones grandes de inundación	94
Nomograma para estimar el gasto unitario en el riego por melgas	95

	Página
Tabla N° 1 - Dimensiones recomendables para melgas	99
Método de riego por surcos	100
Tabla N° 2 - Longitud y caudal máximos en surcos de riegos	104
Resumen de los métodos superficiales	105
Métodos subterráneos	105
Tabla N° 3 - Adaptabilidad y limitaciones de los métodos superficiales de riego	106
Gráfico: Gasto a través de sifones pequeños .	109
" Gasto de agua a través de canaletas de aplicación	109
Métodos de riego por aspersión	111
Referencia bibliográficas	112
<u>Flujo del agua en canales</u>	113
Derivación de la fórmula básica	113
Los elementos de diseño	111
Valores de "n". La velocidad en los canales .	116
Nomograma para la solución de la fórmula de Manning (fig. 3)	117
Tabla N° 1 - Valores de "n" para las fórmulas de Manning y Kutter según Horton	120
Tabla N° 2 - Velocidades permitidas en canales	122
Forma de la sección transversal	123
Secciones con máxima eficiencia hidráulica ...	123
Sección con infiltración mínima	124
Secciones según el objetivo del canal	124
Otros factores que afectan la forma de la sección	126
Inclinación de los taludes	127
Tabla N° 3 - Taludes recomendables para canales según la naturaleza del material de excavación	128
Franco o bordo libre	128
Ancho de los bancos	128

Reglas útiles para el cálculo de canales	129
Trazado preliminar	131
Trazado definitivo y localización	132
Fig. 8 - Localización de un canal	133
Trazado y localización de canales	135
Reconocimiento general	135
Trazado preliminar	135
Tabla N° 4 - Radios mínimos recomendables según la descarga de agua del canal	136
Trazo de curvas circulares	136
Cálculo del material de escavación	137
Ejemplos sobre cálculo y localización de canales	137
Canales pequeños en el fondo	143
Tabla N° 5 - Capacidad de canales pequeños construidos en tierra, taludes 1:1; n = 0.030	145
Tabla N° 6 - Capacidad de canales pequeños construidos en tierra, taludes 1/2:1; n=0.030	146
Bibliografía	147
<u>Riego por Aspersión</u>	149
Composición del sistema	150
Fig. 1 - Elementos de un sistema de riego por aspersión	151
Tabla N° 1 - Gasto del rociador en lts/min longitud del tubo elevador en m	154
Grado de distribución del agua	154
Tabla N° 2 - Velocidad del viento en Kms/hora- Espaciamiento entre rociadores en % del diáme- tro húmedo	155
Diseño de un sistema de riego por aspersión, el agua, los factores meteorológicos, el cul- tivo, energía disponible, sistema de trabajo .	155
Fig. 3 - Tipo de rociadores	157
Fig. 4 - Distribución de agua de un rociador .	159
Fig. 5 - Distribución de agua de un rociador .	159
Fig. 6 - Distribución ideal del agua en un sistema de rociadores	159

Localización de la línea principal y de los laterales	161
Capacidad de los rociadores	162
Capacidad del sistema	164
Fig. 10 - Relación entre grado de precipitación y gasto de los rociadores	167
Tabla N° 4 - Tabla para selección de aspersores	169
Grado y volumen de aplicación	170
Tamaño del tubo principal	171
Tamaño de los laterales	171
Fig. N° 11 - Nomograma para determinar las pérdidas por fricción en los tubos principales	173
Fig. N° 12 - Nomograma para determinar las pérdidas por fricción en tubos laterales	175
Selección de la bomba y del motor	178
Usos accesorios del equipo de aspersión	178
Ejemplo del diseño de un riego de aspersión ..	179
Referencias bibliográficas	187
<u>Flujo de agua en tuberías</u>	189
Fórmulas básicas	189
Pérdidas por fricción	189
Tabla N° 1 - Valores del coeficiente de la fricción "f" para hierro y concreto en la fórmula de Darcy	190
Fórmulas de Manning	191
Fórmulas de Scobey	192
Fórmulas de Hazen-Williams	193
Pérdidas por entrada	194
Fig. N° 1 - Nomograma para la solución de la fórmula de Scobey	195
Pérdidas por salida	197
Pérdidas por ensanchamiento brusco	197
Pérdidas por ensanchamiento gradual	198
Pérdidas por contracción repentina	199
Pérdidas por obstrucciones	199

Tabla N° 4 - Tabla para determinar los valores de ko	200
Fig. N° 2 - Gráfico para determinar las pérdidas de carga producidas por válvulas y accesorios	201
Gradiente hidráulico y gradiente de energía ..	203
Determinación del diámetro más económico de una tubería	204
Fig. N° 5 - Gradientes hidráulicos y de energía	204
Fig. N° 6 - Determinación del diámetro más económico en tuberías	205
Referencias bibliográficas	212
<u>Bombas para riego y desagüe</u>	213
Tipos de bombas	214
Bombas centrífugas	214
Principios de operación	217
Clasificación	217
Tipos de rotores	217
Características de operación	218
Leyes de las bombas	218
Carga máxima	219
Altura de Succión	220
Bombas de propulsión	221
Principios de operación	221
Características de operación	221
Selección de las bombas	222
Tabla N° 1 - Características de operación de varios tipos de bombas	222
Determinación del gasto	222
Determinación de la carga	223
Curvas características	224
El bombeo de aguas subterráneas	224
Selecciones de motores para el bombeo	227
Potencia para elevar el agua	227
Potencia necesaria en el eje de la bomba	228

Potencia al eje del motor	228
Potencia de los motores eléctricos	229
Tabla N° 2 - Tamaño y eficiencia aproximada de los motores de inducción	229
Motores de combustión interna	230
Sistema de transmisión	234
Transmisiones directas con uniones flexibles ..	234
Transmisiones con bandas	234
Tabla N° 3 - Potencia transmitida por las bandas en V horizontales	236
Cajas de transmisión	236
Instalación de las bombas	236
Costo del bombeo	239
Costos fijos	239
Depreciación	240
Tabla N° 4 - Duración probable del equipo de bombeo	240
(1) Depreciación Uniforme	240
(2) Método del interés compuesto	241
(3) Método del porcentaje constante	241
(4) Estimando el valor actual de la máquina ...	242
Intereses sobre la inversión	242
Impuestos	242
Seguros	243
Repuestos y reparaciones	243
Costos de operación	243
Combustible	244
Aceite	244
Operario	244
Efecto del uso sobre el costo unitario	245
Referencias bibliográficas	248

<u>Aforo de agua</u>	249
Unidades de medida del agua	249
Dispositivos para medir el agua en canales ...	249
Orificios	249
Fig. N° 1 - Oficios para el aforo del agua ...	251
Fig. N° 2 - Vertederos o Compuertas	251
Vertederos o compuertas	254
Vertederos rectangulares	255
Vertederos triangulares	256
Vertederos de Cipolletti	257
Reglas para la instalación y operación de vertederos	257
Aforador Parshall	259
Tabla N° 1 - Valores de k y n para la fórmula del gasto en el aforador Parshall	260
Construcción del medidor Parshall	264
Instalación del aforador Parshall	264
Fig. N° 4 - Nomograma para determinar el gasto en un medidor Parshall de 0.15 m.	265
Fig. N° 5 - Idem para 0.30 m.	265
Fig. N° 6 - Idem para 0.50 m.	267
Fig. N° 7 - Idem para 0.75 m.	267
Fig. N° 8 - Idem para 1.00 m.	269
Fig. N° 9 - Nomograma para determinar la pérdi da de carga en medidores Parshall	269
Molinete o correntómetro	273
Determinación de la velocidad	274
Fig. N° 11 - Molinete y sus aplicaciones	275
Operación	277
1) Vadeo del Cauce	277
2) Cables y puentes	277
3) Botes o Canoas	278
Formularios de registros	278
Flotadores	279
Dispositivos para medir el agua en tuberías ..	279

Orificios	279
Método rústico para estimativos aproximados ..	280
Referencias bibliográficas	282
<u>Estructuras para distribución de agua en los fundos</u>	283
Cajas de división	283
Fig. N° 2 - Caja de división o compuerta de derivación	285
Fig. N° 3 - Tranca de concreto	287
Saltos	291
Localización de los saltos	292
Fig. N° 4 - Tranca de madera	293
Fig. N° 5 - Tranca portátil de lona	295
Fig. N° 6 - Tranca portátil de metal	295
Figs. N° 7 y N° 8 - Elementos de diseño para tipos de saltos	297
Fig. N° 9 - Localización de saltos en acequias	299
Estructuras combinadas	301
Materiales de construcción	301
Puentes canales	302
Fig. N° 10 - Viaducto elevado	303
Sifones invertidos	305
Tomas laterales en canales	309
Fig. N° 12 - Estructura de entrada y salida para tuberías	311
Fig. N° 13 - Obra de toma en canales	313
Referencias bibliográficas	316
<u>Nivelación de tierras para riego</u>	317
Limitaciones de la nivelación	317
Tipos de nivelación	318
Estudios preliminares	320
Método de riego que habrá que usarse	320
Tiempo propicio para la nivelación	320
Desmante o roza del terreno	321
Levantamiento Topográfico	321
1) Estacada del Campo	322
2) Acotamiento y Dibujo	323

Información sobre suelos	325
Métodos de riego y áreas de nivelación separadas	326
Diseño de la nivelación y cálculo del movimiento de tierra	327
Método de los perfiles simples	328
Método de los perfiles dobles	329
Método de las cuadrículas compensadas	330
Fig. N° 6 - Nivelación por medio de perfiles simples	331
Fig. N° 7 - Nivelación por medio de perfiles dobles	333
Fig. N° 8 - Determinación del centroide por el método de los momentos	333
Método del centroide	335
1) Localización del centroide	335
2) Determinación de la altura del centroide	336
3) Pendiente del plano	339
Fig. N° 11 - Determinación de las pendientes naturales promedias de un terreno	341
4) Altura del plano de nivelación	343
5) Determinación de los cortes y rellenos	344
6) Cálculo de los cortes y rellenos	344
Nivelación en terrazas	346
Fig. N° 12 - Desplazamiento del centroide y de terminación de cortes y rellenos	347
Fig. N° 13 - Porción de una nivelación en te- razas paralelas de ancho uniforme con la acequia de cabecera normal a la dirección del riego	347
Marcas de las estacas	349
Equipo para la nivelación	351
Fig. N° 20 - Trayectoria del equipo de nivela- ción	352
Distancia de arrastre y costo unitario	355
Equipo para el acabado	356
Referencias bibliográficas	360
Tablas para la conversión de unidades de los sistemas métricos e inglés	361 - 362

<u>Aforo de aguas en canales en el fondo</u>	363
Objetivo	363
Equipo	363
Procedimiento	363
Resultados	364
Discusión	364
Registro de los datos	365
<u>Ensayo de un pose de bombeo</u>	366
Objetivo	366
Equipo	366
Procedimiento	366
Resultados	368
Discusión	368
<u>Ensayo de una bomba Centrífuga</u>	369
Objetivo	369
Equipo	369
Procedimiento	369
Registro de los datos	371
Resultados	371
Discusión	372
<u>Métodos para determinar el grado de humedad</u> <u>del suelo</u>	373
Objetivo	373
Equipo	373
Procedimiento	374
1) Método gravimétrico directo	374
2) Método de los bloques de Bouyoucus	375
3) Métodos de las puntas gravimétricas	376
4) Método del tensiómetro	376
5) Método de la apertura de los estomas	377
6) Método del tacto	378

Resultados	378
Discusión	378
Formulario de Registros	379
<u>Determinación de la humedad equivalente</u>	381
Objetivo	381
Equipo	381
Procedimiento	381
Operación de la centrífuga	382
Resultados	383
Formulario de Registro	383
Discusión	383
<u>Determinación de la longitud y espaciamento de los surcos de riego y gasto de agua requerido en cada surco</u>	385
Objetivo	385
Principios generales	385
Equipo	386
Procedimiento	387
Formulario N° 1 - (Formulario para registrar la velocidad de avance del agua en surcos de riego)...	389
Formulario N° 2 - (Formulario para registrar infiltración en surcos de riego)	389
Resultados	390
Análisis de los resultados	391
Discusión	394
<u>Evaluación del método de riego por melgas; determinación de la longitud y el gasto que debe darse a las platabandas</u>	395
Objetivo	395
Equipo	395
Procedimiento	395
Formulario N° 1 - (Registros sobre infiltración)	396

Formulario N° 2 - (Registro de la velocidad de avance y recesión del agua en el riego por melgas) ...	397
Resultados	397
Análisis de los resultados	398
Discusión	400
<u>Evaluación de un sistema de riego por aspersión...</u>	401
Objetivo	401
Equipo	402
Procedimiento	402
Formulario N° 1 - (Condiciones de operación)..	405
Gasto de los rociadores	405
Formulario N° 2 - (Grado de aplicación en cada lata)	406
Formulario N° 3 - (Información general sobre equipo y operación)	406
Resultados	407
Análisis de los resultados	407
1) Frecuencia de los riegos	407
2) Uniformidad de aplicación	407
3) Pérdida de agua	408
4) Eficiencia de aplicación	408
5) Eficiencia de distribución lateral	408
6) Tiempo requerido para cada posición del lateral	409
7) Número de movimientos del lateral por día .	409
8) Capacidad del sistema	409
9) Carga total sobre la bomba	409
Discusión	409
<u>Lista del equipo utilizado durante las prácticas ejecutadas en el curso internacional de riegos y avenamientos, 1957.....</u>	411

Elementos de hidrología	415
El ciclo hidrológico	415
La precipitación	415
Medida de precipitación	416
Precipitación anual	419
Precipitación promedio sobre un área	420
Polígonos de Thiessen	420
Curvas isohietas	421
Precipitación estacional o mensual	421
Intensidad, duración y frecuencia de las lluvias	422
Tabla 3 - Análisis de una tormenta	424
Tabla 4 - Intensidades máximas para diferentes períodos de duración	425
Tabla 5 - Intensidades máximas de la precipita ción en mm/hóra, para duraciones e intervalos de ocurrencia diferentes	426
La evaporación	429
La transpiración	431)
La evapotranspiración	431
Método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración	432
Indices mensuales de calor (i) para distintas temperaturas medias mensuales (t)	433
Tabla 7 - Duración media de las horas de sol expresadas en unidades de 30 días con 12 ho- ras de sol cada una	434
Ejemplo de la determinación de la evapotrans- piración potencial por el método de Thornthwai te	434
La infiltración	437
La escorrentía	438
El método racional	442
Tabla 2 - Valores de "C" en la fórmula del mé- todo racional	443
Hidrogramas de escorrentía	449
El concepto de sequía	453
El método de Thornthwaite para calcular el balance precipitación-evapotranspiración- almacenamiento	454

Tabla 9 - Relaciones entre la precipitación mensual y anual con la evapotranspiración potencial y su relación con la disponibilidad de agua para las plantas	459
Referencias	460
<u>Salinidad. Resumen de las prácticas en el laboratorio</u>	461
Aguas	461
1) CE (conductividad eléctrica en mmhos/cm ² a 25°C)	461
2) pH (evaluación)	461
3) Ca - Mg (calcio + magnesio)	462
Cálculos	463
Reactivos	463
4) Na (sodio)	463
5) SAR (sodium adsorption ratio)	464
6) Clasificación	464
<u>Suelos</u>	465
1) Preparación de la pasta de saturación ..	465
Cálculos	465
2) Determinaciones en el extracto de saturación	465
a) CE	465
b) pH	465
c) Ca - Mg, Na y SAR	466
3) Carbonatos alcalinos terreos	466
4) Requerimientos de yeso	466
Cálculos	466
<u>Equipo utilizado en las determinaciones</u>	467
Conductividad eléctrica	467
pH	467
Sodio.- Potasio.-	467
Balanzas	467
<u>Métodos de laboratorio</u>	468

<u>El riego con relación a los suelos salinos y de álcali</u>	469
Origen de las sales solubles en los suelos ...	469
Cuadro N° 1 - Porcentaje de los distintos elementos que se encuentran en la corteza de la tierra	470
Clasificación de los suelos salinos y de álcali	470
1) Suelos salinos	471
Gráfico de la salinidad de los suelos ..	473
2) Suelos de álcali no salinos	475
3) Suelos salinos de álcali	476
Variabilidad de los suelos de álcali y salinos	477
Métodos para medir la salinidad y la alcalinidad	477
Bibliografía	479
<u>El crecimiento de las plantas en relación a la presencia de sales y de álcali en el suelo</u>	481
Plantas indicadoras en suelos salinos y de álcali	481
Cultivos en suelos salinos o de álcali	482
El crecimiento de las plantas y la presión osmótica	483
Efecto específico de los iones	484
Sodio	484
Fig. N° 1 - Presión osmótica de extractos de suelos saturados en relación a conductividad eléctrica	485
Tabla 1 - Relación entre la tolerancia del sodio cambiante y el contenido de sodio y calcio en 10 cultivos	487
Boro	487
Tabla 2 - Tolerancia relativa de las plantas con respecto al boro	488
Tabla 3 - Tolerancia relativa de los cultivos a las sales	490
Bibliografía	491

<u>La mejora y el manejo de los suelos de álcali y de los suelos salinos</u>	493
Lixiviación	494
Drenaje	496
Enmiendas	496
Tabla 1 - Cantidades de yeso y azufre requeridos para reemplazar el sodio de cambio	498
Bibliografía	499
<u>Calidad y clasificación de las aguas para el riego</u>	501
Calidad de las aguas para el riego	501
Concentración de sales solubles	502
Tabla 1 - Composición química de algunos ríos usados en la irrigación en el oeste de los Estados Unidos	504
Fig. N° 12 - Diagrama para clasificar las aguas según su concentración total de sales y el peligro de sodio en conjunto	505
Razón de la adsorción de sodio	507
Boro	508
Bicarbonato	508
Clasificación de aguas para riego	508
A) Peligro de Salinidad	510
1) Conductividad menos de 250 micromhos/cm	510
2) Conductividad entre 250 y 750 micromhos/cm	510
3) Conductividad entre 750 y 2,250 micromhos/cm	510
Nomograma para determinar valores del agua de riego de SAR y ESP	511
Tabla 2 - Requerimientos de lixiviación (porcentaje del agua para riego aplicada que debe ser lixiviada a través de la zona de la raíz) relacionados a la conductividad eléctrica del agua para riego y drenaje	513
B) Peligro del sodio	514
1) Agua de baja cantidad de sodio	514
2) Agua de media cantidad de sodio	514
3) Agua con un alto contenido de sodio ...	514
4) Agua con un contenido de sodio muy alto	514



11CA
631.6
B 54
c 3

278

8501

Blair, Enrique

Manual de riegos y avenamientos.

FECHA	PRESTADO A
IX-7-76	Jose F. Sierra Sanz
V-26-80	Jose F. Sierra Sanz
III-23-84	Miguel Rodriguez
III-30-84	Miguel Rodriguez
IX-3-85	Miguel Rodriguez
I-22-88	Carlos Jimenez ✓
V-29-86	Ricardo Alberto P.
XI-8/92	Ricardo Alberto P.
III-17/93	Ricardo Alberto P.
2-10-93	Julio Jimenez ✓
10-19-95	Milton W. Soza G.

