APUNTES TEÓRICO PRÁCTICOS SOBRE RIEGO

Oscar Delgadillo I., Iván del Callejo V.

CENTRO AGUA
UMSS - FCAyP

Entidad Facilitadora:

Centro Andino para la gestión y Uso del Agua

PCPP

Proyecto Cuenca Pedagógica Pucara

TEXTO DE APOYO: APUNTES TEÓRICO PRÁCTICOS SOBRE RIEGO

2017.

Autores: Oscar Delgadillo, Iván del Callejo

Diseño y diagramación: Talleres Gráficos Kipus

Este texto ha sido elaborado como material de apoyo del Curso Diplomado en Diseño de sistemas de riego tecnificado bajo gestión colectiva. Este curso ha sido desarrollado en el marco del Proyecto Cuenca Pedagógica Pucara (PCPP). El PCPP es ejecutado por el Centro AGUA en el marco del Programa lntercultural de Cuencas Pedagógicas (PICP), el cual ha sido formulado en el marco de los objetivos y lineas de acción estratégica del Plan Nacional de Cuencas II del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, y apoyado directamente por la Dirección General de Cuencas y Recursos Hídricos.

Impreso en Talleres Gráficos "Kipus" Telfs.: 4116196 – 4237448

Cochabamba-Bolivia

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 5
2. CONCEPTOS BÁSICOS.....5
2.1. Riego.....5
2.2. Sistema de riego.....7
2.3. Método de riego.....8
2.4. Tipo de riego.....9
2.5. Áreas bajo riego y a secano.....9
2.6. Calendario agrícola y cédula de cultivos.....10
3. RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA ATMÓSFERA.....11
3.1. La retención del agua en el suelo.....12
3.1.1. El suelo.....12
3.1.2. Propiedades del suelo que afectan el contenido de humedad.....14
3.1.3. Contenido de agua en el suelo.....27
3.1.4. Cálculo de la lámina de agua.....32
3.1.5. Niveles de referencia de la humedad del suelo.....31
3.1.5. La capacidad de retención de humedad del suelo y los parámetros relacionados.....33
3.1.6. Humedad Fácilmente Aprovechable.....35
3.2. Consumo de agua de las plantas.....38
3.2.1. Necesidad o requerimiento de agua de un cultivo (ET_c).....39
3.2.2. Cálculo del requerimiento de agua de los cultivos considerando las fases o estadios de desarrollo de los cultivos.....44
3.2.3. Cálculo del Requerimiento de riego de los cultivos.....45
4. BIBLIOGRAFÍA.....50

1. INTRODUCCIÓN

Tanto para programar el riego como para diseñar sistemas de riego, es necesario conocer y aplicar los fundamentos teóricos del riego, basada en la relación agua-suelo-planta-atmósfera, ya que es la base para determinar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, las características de infiltración del suelo, las demandas de agua de los cultivos, sus requerimientos de riego y el cálculo de los principales parámetros de riego (láminas, frecuencias de riego, etc.). En diseño, a la determinación de estos parámetros de riego se la considera dentro el diseño agronómico, ya que es la base para calcular varios parámetros de riego y tomar varias decisiones importantes (largo de surco, ancho de melga, selección de emisores, láminas de riego a aplicar, frecuencias de riego, caudal requerido del sistema, etc.).

En el marco del Proyecto Cuenca Pedagógica Pucara se ha desarrollado un curso diplomado sobre Diseño de sistemas de riego tecnificado bajo gestión colectiva, en su primera versión el año 2015, orientada a técnicos municipales y profesionales, en general, que trabajan en el campo del riego. Como son parte de la currícula del curso los temas de agrohidrología y diseño agronómico, este documento podrá constituirse en un texto de consulta y de apoyo, así como para estudiantes de ingeniería agrícola y para profesionales que trabajan en el área de riego.

Este texto de consulta inicialmente aborda los conceptos y definiciones básicos que se manejan sobre riego en nuestro medio, después se concentra en la relación agua-suelo-planta-atmósfera, enfatizando en la capacidad de retención del agua en el suelo, sus características de infiltración y el consumo de agua de las plantas.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Riego

Existen varias definiciones y connotaciones del término "Riego", algunas hacen referencia a la práctica que se realiza en el nivel de una parcela (la acción de regar) y otras a ámbitos mayores, que incluyen todas las actividades de "gestión del agua". Aquí algunos ejemplos:

> *"Aplicación artificial de agua a una parcela con cultivo..." (Función fisiológica del agua en la planta)*
>
> *"... en cantidades y tiempos adecuados" (cantidad y oportunidad, eficiencia)*
>
> *"Aplicación de agua al suelo, con el fin de crear condiciones para la producción agrícola"*
>
> *"El conjunto de actividades que se desarrollan en un sistema hidráulico, con el objetivo de dotar del agua que requieren las plantas cultivadas, para su desarrollo y producción (óptimos)*

Revisando las anteriores definiciones, se puede conceptualizar al riego desde dos puntos de vista: (1) satisfacer una necesidad biológica (o fisiológica) del cultivo y (2) como un conjunto de actividades y prácticas que involucran iniciativas y acciones colectivas (Figura 1).

Figura 1. El riego visto desde dos puntos de vista

Entonces, englobando ambas concepciones se puede definir el riego como ***un conjunto de prácticas llevadas a cabo por un individuo o grupo de individuos para satisfacer las necesidades de agua de un cultivo o para brindar condiciones de humedad al suelo para su laborabilidad, mediante la aplicación artificial de ciertos volúmenes de agua. Este objetivo es coadyuvado por actividades colectivas para lograr que el agua llegue desde la fuente hasta las parcelas de cultivo.***

La "aplicación artificial" de agua a las parcelas puede darse en diferentes épocas, según el régimen de las lluvias y la disponibilidad de agua para riego. Esto define que el riego según la época, pueda tener un carácter complementario, denominado ***"riego complementario"*** si es que se aplica en combinación o sobreposición con la época de lluvias (complementa a la lluvia en la provisión de humedad al suelo) o un carácter suplementario ***(riego suplementario)*** si es que "suple" o reemplaza a las lluvias en la provisión de humedad al suelo. En la figura 2 se aprecia mejor la complementariedad y suplementariedad del riego.

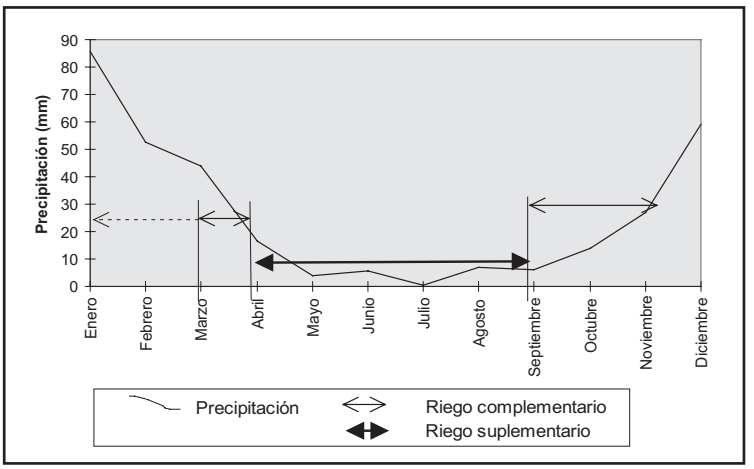


Figura 2. Riego complementario y suplementario (del Callejo, 1996)

Generalmente, el riego complementario acontece al inicio o finalización de la época de lluvias (periodo lluvioso) y el riego suplementario durante la época de estiaje.

2.2. Sistema de riego

Es un conjunto de elementos y recursos ***físicos*** (fuente de agua, infraestructura de riego, zona de aplicación) y ***sociales*** (usuarios, dirigentes o líderes locales) que interactúan entre sí con la finalidad de dotar agua a las parcelas de (riego al cultivo, a los almácigos, para preparar la tierra, sembrar, etc.) (Adaptado de Gerbrandy y Hoogendam, 1998). Esto permite identificar cuatro elementos principales en constante y estrecha interrelación: (1) la fuente de agua, (2) la infraestructura de riego, (3) el área de riego y los (4) usuarios del sistema o la gente que participa (Figura 3). Estos cuatro elementos se encuentran a su vez inmersos en un contexto socio económico, político, cultural y agroecológico específico.

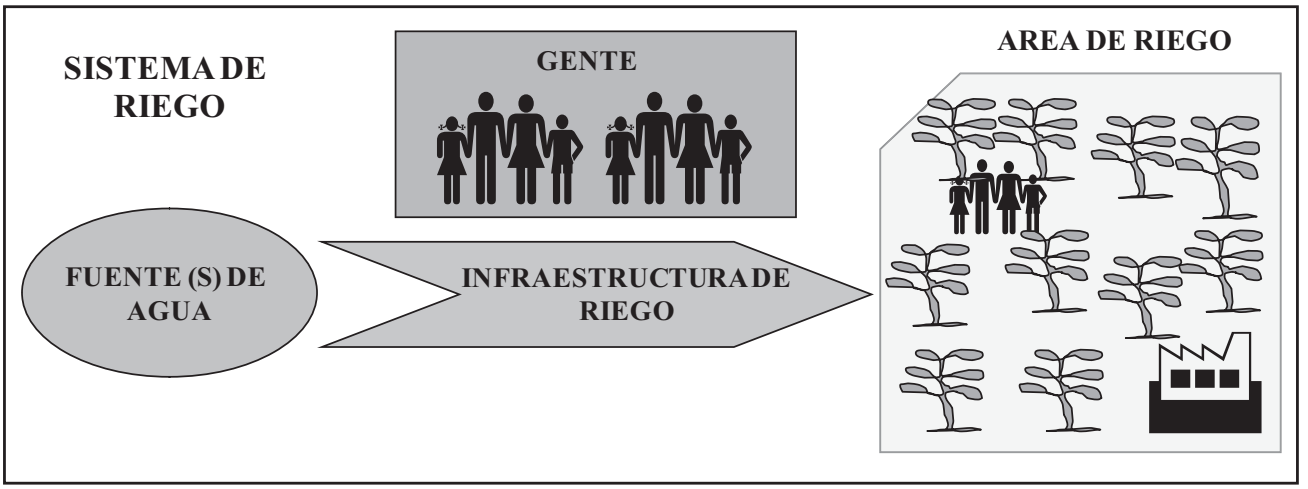


Figura 3. Esquema de un sistema de riego

Según el tipo de fuente de agua, es necesario indicar que existen tres esquemas de sistemas de riego que comúnmente podemos encontrar (Figura 4):

1. *Sistemas de riego de reservorio (riego regulado)*, pudiendo ser la fuente de agua una represa, laguna, un atajado o un estanque, característica que les permite regular el reparto de agua, pues permite decidir cuándo y con cuánta agua regar.
2. *Sistemas de riego de cursos de agua*, es decir sistemas cuya fuente es un río, una quebrada, o un arroyo. Debido a que el curso de agua no se detiene, no es posible regular el flujo como en el primer caso, sino acomodarse más bien a al régimen de las lluvias y por lo tanto al régimen temporal de reparto del agua (turnos).
3. *Sistemas de riego de fuentes puntuales*, pudiendo ser la fuente de agua un pozo o un manantial, es decir el agua se capta de un solo punto. Solamente en el caso de los pozos se podría regular la entrega de agua, sobre todo con respecto a cuándo regar, ya que la cantidad dependerá de la potencia de la bomba de agua y potencial de la fuente (pozos) o del caudal del manantial. Cabe añadir, que este tipo de sistema podría regularse si se combina con el empleo de estanques o reservorios pequeños.

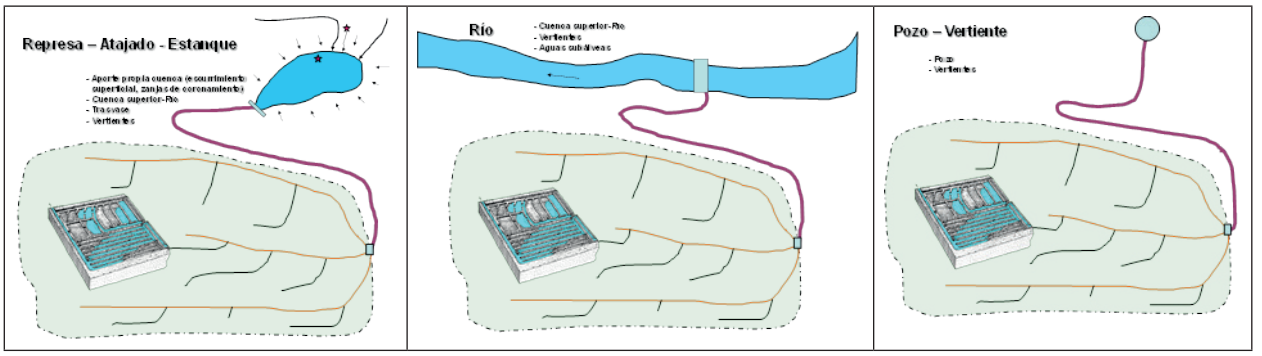


Figura 4. Tipos de sistemas de riego (No se ven las figuras, mejor redibujarlas)

2.3. Método de riego

Se entiende como ***la forma de aplicar el agua a la parcela y los mecanismos que intervienen en ello***, por ejemplo: riego por inundación, riego por surcos, riego por aspersión, etc. (Delgadillo y del Callejo, 2003). En la figura 5, se pueden apreciar los métodos de riego más comunes encontrados en nuestro medio.

Figura 5. Métodos de riego más comunes en nuestro medio

2.4. Tipo de riego

Se entiende por tipo de riego ***a las distintas modalidades de aplicación, asociadas a momentos y finalidades específicas dentro del ciclo de cultivo*** (Delgadillo y del Callejo, 2003), por ejemplo: riego de preparación, riego de siembra, riego al cultivo, etc. Durante el ciclo del cultivo, la forma de aplicar el agua (método de riego) puede variar de acuerdo al momento específico dentro el ciclo de cultivo. Así, por ejemplo, para preparar el terreno, la forma de aplicar agua podría ser por inundación, al buscarse almacenar agua en el perfil de suelo; pero cuando ya el cultivo esté implantado, la forma de aplicar agua al cultivo podría ser por surcos o por aspersión, entre otros. En la figura 6, se ilustran algunos tipos de riego.

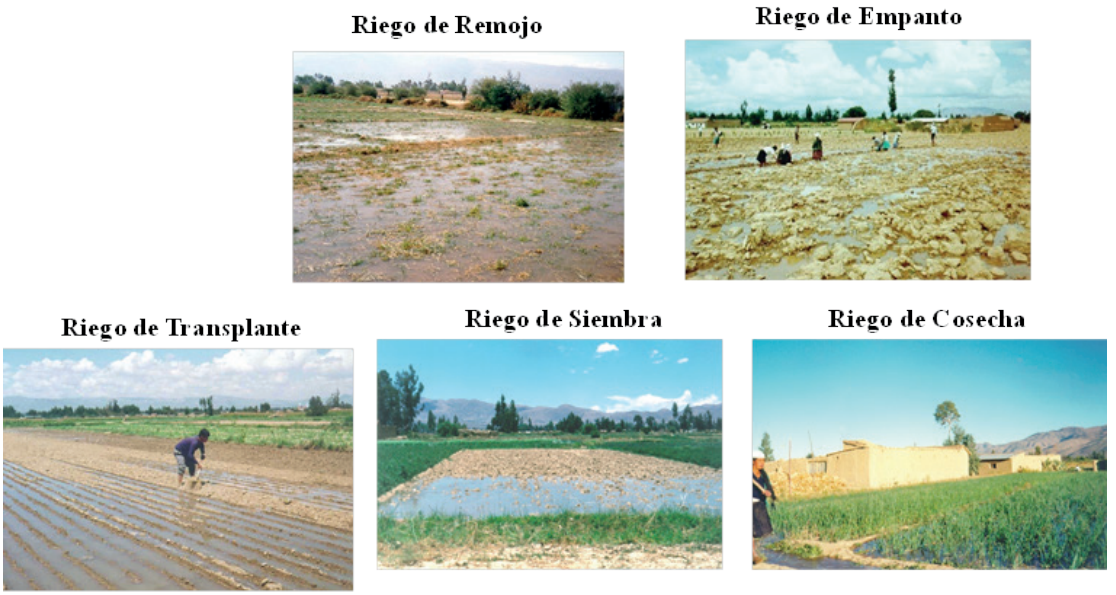


Figura 6. Tipos de riego comúnmente encontrados

2.5. Áreas bajo riego y a secano

A la hora de evaluar una zona agrícola con potencial para desarrollar el riego o en la que ya se riega en ciertas zonas, se hace necesario diferenciar y cuantificar la expresión espacial de éstas.

Área regada: Se dice que un área o un cultivo están bajo riego cuando al menos han recibido una aplicación de agua (riego) durante todo su ciclo. Obviamente, esto está asociado a varias facilidades existentes, por ejemplo, una fuente de agua y su infraestructura de aprovechamiento (obras de toma, conducción, distribución y aplicación). Es decir, representa la superficie que efectivamente es regada durante una campaña agrícola. La existencia de esta infraestructura de riego también saca a luz otra definición comúnmente encontrada, como es el de área bajo la influencia del sistema o perímetro de riego, es decir aquella área que por las facilidades infraestructurales tiene la posibilidad de recibir riego. Esto quiere decir que, dependiendo de la disponibilidad de agua, se podría regar toda la superficie que físicamente se encuentra bajo influencia de la infraestructura de riego.

También, se puede visualizar otra definición importante como es el del área regable, es decir aquella área que, por sus características propias de suelo, es susceptible de ser regado o no. Esto a su vez está asociado, sobre todo en proyectos de riego, a un estudio de clasificación de suelos con fines de riego, ya que este estudio específico determina si un área es regable o no regable. Por lo general, el área regable es mayor al área regada propiamente, por tanto, también representa un área potencial de riego ante un eventual aumento de agua (mayor disponibilidad).

Ahora bien, se dice que un área es a ***secano*** cuando no recibe ni una aplicación de agua de riego, ya sea porque no cuenta con las facilidades de infraestructura (falta de una fuente de agua y/o infraestructura de riego), en cuyo caso se torna en áreas a secano permanente, o cuando se cultivan parcelas sin riego aun estando dentro del perímetro o área de influencia de un sistema de riego. En este último caso se denominan zonas a secano temporales. En ambos casos las siembras se realizan solo en el periodo lluvioso.

En la figura 7 se puede apreciar estas definiciones gráficamente.

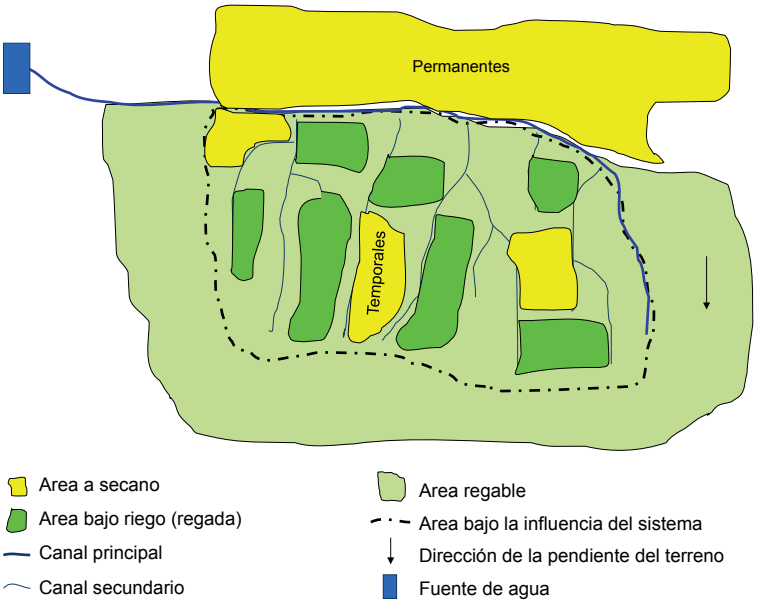


Figura 7. Áreas bajo riego y a secano

2.6. Calendario agrícola y cédula de cultivos

El calendario agrícola ***es la configuración temporal de cultivos de una zona*** (Figura 8). Es una manera gráfica que ayuda a entender la agricultura de una zona en el tiempo. A esta representación se puede adicionar otro tipo de información relacionada como ser: periodos de riego, riesgos de heladas, granizadas, etc.

Cultivo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Papa												
Haba												
Maíz												
Cebolla												

Figura 8. Calendario agrícola

La cédula de cultivos ***es la configuración espacial y temporal de cultivos de una zona*** (Tabla 1). La importancia de una cédula de cultivos radica en que es una información muy valiosa para determinar la demanda de agua de los cultivos o los requerimientos de riego en el tiempo y en el espacio, ya que expresa información de espacio (áreas regadas de los diferentes cultivos, áreas de descanso, etc.) y de tiempo (meses ocupados por cultivos en el año).

Tabla 1. Cédula de cultivos (en ha)

Cultivo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Papa	13	13								13	13	13
Haba			15	15	15	15	15					
Maíz	7	7	7	7						7	7	7
Cebolla						2	2	2	2			
Total	**20**	**20**	**22**	**22**	**15**	**17**	**17**	**2**	**2**	**20**	**20**	**20**
Area bajo la influencia del sistema	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Area descanso	15	15	13	13	20	18	18	33	33	15	15	15

En la formulación y elaboración de proyectos de riego esta información es vital, ya que permitirá determinar las áreas que se podrían incrementar con el nuevo proyecto de riego. Obviamente, obtener esta información también contempla varias dificultades, ya que al representar a los cultivos en el tiempo y en el espacio (generalmente un año calendario), prácticamente es imposible recabar información durante al menos un año, por lo tanto, las técnicas de reconstrucción de las cédulas de cultivo de una zona se tornan cruciales.

La cédula de cultivo, al incluir toda la superficie cultivada bajo riego, cultivos a secano, o superficies sin cultivar (terrenos en descanso), permite también deducir la intensidad de uso del suelo en una campaña agrícola. Esto quiere decir que se puede calcular la superficie cultivada durante todo el año, la misma que puede ser menor, igual o mayor al perímetro de riego (o área de influencia) en un sistema. Habrá una superficie cultivada mayor al perímetro de riego, cuando existan parcelas que reciben más de un cultivo durante una campaña agrícola. En este caso se habla de zonas agrícolas intensivas.

A través de la cédula de cultivos se puede también verificar (controlar) que no existan errores de cuantificación de las áreas, ya que en un determinado mes la suma de áreas bajo riego, a secano y áreas no cultivadas no pueden superar el 100% del área de influencia (perímetro) del sistema.

3. RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA ATMÓSFERA

La teoría del riego se basa fundamentalmente en la relación AGUA-SUELO-PLANTA-ATMOSFERA. La literatura existente en este campo es muy amplia. Para fines de este documento de apoyo centraremos la atención sobre todo en los aspectos más relevantes que rigen estas relaciones y por lo tanto los referidos a las necesidades de agua de los cultivos. Estos son los principios básicos de la agrohidrología.

En la figura 9, dos elementos centrales se visualizan, (1) la retención del agua en el suelo (el suelo como un reservorio) y (2) el consumo de agua por las plantas:

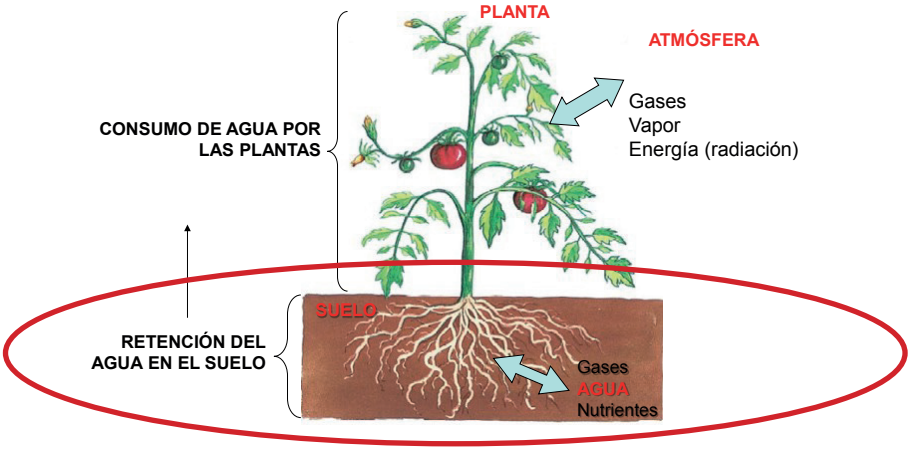


Figura 9. Esquema de las relaciones agua-suelo-planta-atmósfera: Agua-Suelo

La primera tiene que ver con cómo el suelo, según sus características particulares, logra retener el agua que luego será utilizada por el cultivo. Entender las propiedades hidro-físicas del suelo nos ayudará a responder algunas preguntas clave del riego: ¿Cuánta agua puede retener un suelo? ¿De esta cantidad, cuánta agua pueden aprovechar las plantas sin que esto signifique un esfuerzo adicional (estrés hídrico)? También luego podremos responder a la pregunta ¿Con qué caudal y en qué tiempo hay que aplicar agua al suelo para lograr llenar su capacidad de almacenamiento?

La segunda tiene que ver con la planta, es decir con sus necesidades de agua para su adecuado crecimiento y producción. Conocer las necesidades de agua de los cultivos pasa por saber la cantidad de agua que transpira la planta y evapora el suelo, a cuyo conjunto se denomina evapotranspiración del cultivo.

En el siguiente acápite nos centraremos en la relación AGUA-SUELO, es decir en la capacidad de suelo de retener agua con fines de riego.

3.1. La retención del agua en el suelo

3.1.1. El suelo

Si se desmenuza un trozo de suelo seco con la mano, veremos que está compuesto de partículas de diferentes tamaños (Figura 10). La mayoría de estas partículas tienen su origen en la degradación de las rocas, y se llaman partículas minerales. Algunas partículas se originan a partir de restos de plantas y animales (hojas descompuestas, trozos de hueso, etc.), son las llamadas partículas orgánicas o materia orgánica. Aunque tanto las partículas minerales como las orgánicas parecen tocarse entre sí, en realidad dejan espacios entre ellas. Estos espacios son llamados poros. Cuando el suelo está seco, los poros están principalmente ocupados por aire y por vapor de agua. Por el contrario, tras una lluvia o un riego intenso, estos poros se llenarán de agua (Carrazón, 2007).

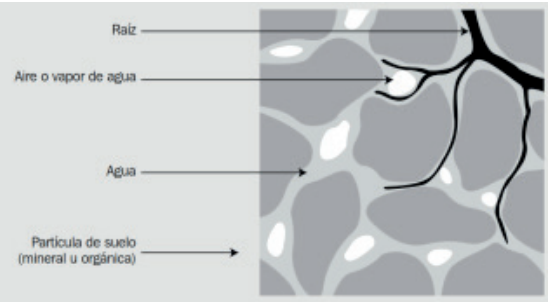


Figura 10. Componentes del suelo (Carrazón, 2007).

El agua entra al suelo por efecto de su aplicación de agua sobre la superficie del suelo, ya sea por precipitación desde la atmósfera o mediante el riego y por un proceso físico denominado "infiltración", que será discutido más adelante. El agua se desplaza a través de los poros, aumentando la profundidad conforme se van llenando, por lo que el movimiento del agua en el suelo será proporcional al diámetro de los poros, disminuyendo conforme los diámetros se reducen.

El agua es retenida en el suelo por la fuerza combinada de la atracción de las partículas del suelo y la acción capilar del agua en los poros, y es retirada por efecto de la evaporación y la absorción por las raíces de las plantas. A niveles menores de humedad la fuerza de retención de agua por el suelo será mayor, por tanto, la absorción de agua por las plantas es posible solamente en un rango limitado de humedad, mientras la fuerza de absorción de agua de las plantas sea mayor a la fuerza de retención de agua del suelo.

En consecuencia, el contenido de agua en el suelo es dinámico, presentando variaciones a intervalos cortos de tiempo, dependiendo de las condiciones propias del suelo, ambientales, y de manejo.

Si pudiésemos separar los tres componentes que conforman un pedazo de suelo (aire, agua y sólidos), se los podría representar en forma esquemática de la siguiente manera (Figura 11).

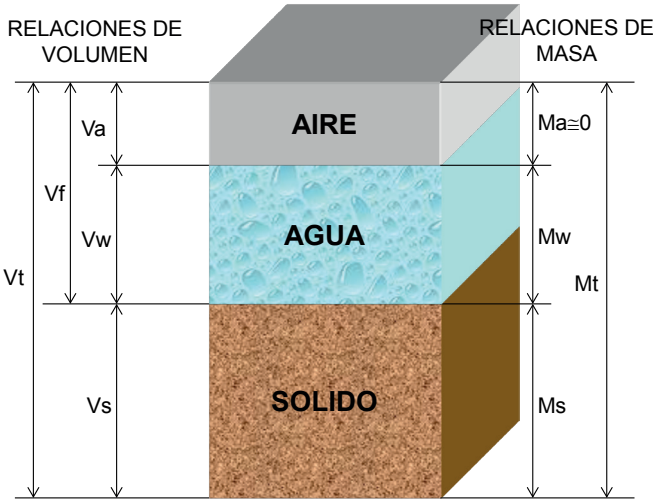


Figura 11. Diagrama esquemático del suelo

Donde:

V_a y M_a: Volumen y masa de gas (aire y vapor de agua)

V_w y M_w: Volumen y masa de agua

V_s y M_s: Volumen y masa de suelo

V_f: Volumen de vacío

V_t y M_t: Volumen aparente total y masa total del suelo

A partir de varias relaciones en torno a estos elementos del suelo, pueden deducirse varios conceptos expresados matemáticamente como fórmulas de interés para el riego (Tabla 2):

Tabla 2. Principales características hidrofísicas del suelo

Concepto	Definición	Relación matemática	Valores comunes
Densidad real	Es la densidad de partículas o la relación entre la masa de sólidos por unidad de volumen de sólidos		entre 2,6 a 2,9 g/cc valor medio 2,65 g/cm^3
Densidad aparente	Es la relación entre la masa de sólidos y el volumen total de suelo		Entre 1,0 y 1,8 g/cm^3
Porosidad	Está dada por la relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total (aparente) de suelo		Entre 30 y 60%
Humedad gravimétrica	Se mide por la relación entre la masa del agua contenida en el suelo y la masa del suelo seco		
Humedad volumétrica	Relaciona el volumen de agua por unidad d volumen (aparente) total de suelo		
Grado de Saturación	Relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos		
Relación entre porosidad y densidad aparente	Relación que ayuda a determinar los espacios vacíos en el suelo		

Relación entre humedad volumétrica y gravimétrica	Relación que permite determinar la humedad volumétrica del suelo a partir de la humedad gravimétrica y las densidad aparente y real del suelo		

Tabla 3. Fórmulas de interés para el riego

3.1.2. Propiedades del suelo que afectan el contenido de humedad

El suelo posee propiedades físicas específicas que afectan la retención y el movimiento del agua en el suelo. A estás, por su acción determinante en la retención de humedad, así como por su utilidad para la determinación de varios parámetros de riego se las denomina "propiedades hidro-físicas" del suelo. Entre las más importantes tenemos: la textura, la estructura, la porosidad, la densidad real, la densidad aparente, la velocidad de infiltración, la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitez Permanente (PMP).

Textura

En términos generales la textura del suelo hace referencia a las proporciones relativas de los diversos tamaños en que se presentan sus partículas minerales que componen el suelo (Artigao y Guardado, 1993; citado por Castro, 2003). La descripción de la textura se realiza a partir del análisis granulométrico, que permite determinar los porcentajes de las partículas cuyos tamaños están comprendidos entre límites definidos según escalas. Las escalas de las fracciones granulométricas establecidas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo (ISSS) son las de mayor uso. A continuación, se detallan las establecidas por el USDA (Tabla 3).

Tabla 3. Fracciones granulométricas, escala USDA

Fracción granulométrica	Diámetro aparente (mm)
Arena muy Gruesa	1 – 2
Arena gruesa	0.5 – 1
Arena mediana	0.25 - 0.5
Arena fina	0.1 – 0.25
Arena muy fina	0.05-0.1
Limo	0.002 - 0.05
Arcilla	< 0.002

Fuente: Porta et. al., 1994.

En términos simples, se consideran 3 fracciones granulométricas: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Y), cuya proporción relativa en el suelo permite conocer la clase textural del suelo (triángulo textural, figura 12), que busca agrupar aquellos suelos con similar comportamiento frente al agua y la respuesta de las plantas.

La proporción de la fracción arcilla determina en gran parte las propiedades físicas y químicas del suelo, debido principalmente a su mayor superficie específica (área superficial por unidad de masa) en relación con las otras fracciones. En general, a mayor contenido de arcilla, el suelo posee una mayor capacidad de retención de humedad y una menor permeabilidad.

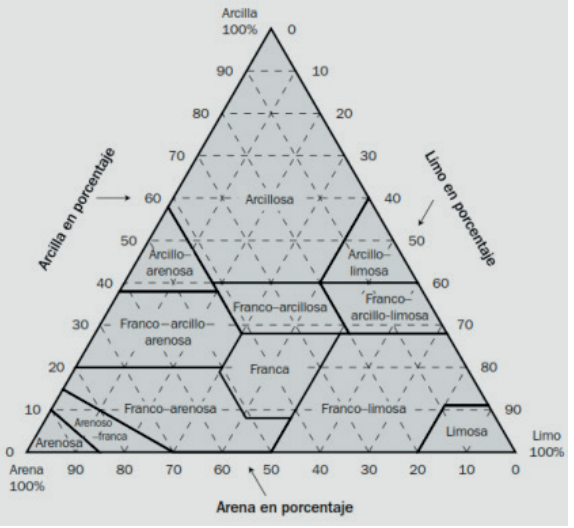


Figura 12. Triángulo de texturas según clasificación USDA (Carrazón, 2007)

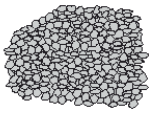
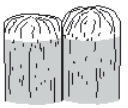
Teniendo las fracciones de arena, limo y arcilla en porcentaje, obtenidas por análisis granulométrico en laboratorio, se puede determinar el grupo textural al cual pertenece un determinado suelo. Por ejemplo, si tuviésemos 30% de arena (A), 40 % limo (L) y 30% de arcilla (Y), la clase textural de la muestra de suelo será: **Franco arcillosa**.

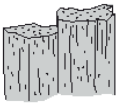
Estructura

La estructura se define como la agregación de las partículas primarias del suelo (arena limo y arcilla) en partículas compuestas llamadas "agregados", separados de otros adyacentes por superficies débiles. La estructura del suelo proporciona un armazón tridimensional ocupado por sólidos que dejan numerosos espacios vacíos o "poros" que pueden presentarse, tanto dentro de los agregados como entre los agregados. Por tal motivo, el tamaño y la cantidad de poros presentes está condicionado en gran medida por la estructura (Artigao y Guardado, 1993).

La caracterización de la estructura se realiza en términos de tipo, grado y tamaño. La tabla 4 describe los principales tipos de estructura del suelo.

Tabla 4. Tipos de estructura del suelo

Tipo de estructura		Descripción
Granular y migajosa		Esferas imperfectas. Típica de medios biológicamente activos ricos en bases y con materia orgánica. Es la estructura más favorable para el movimiento del agua del suelo y el crecimiento de las plantas.
Bloques sub angulares		Aristas agudas y caras curvas. Típica de suelos de zonas semiáridas y áridas con suelos pobres en materia orgánica.
Bloques angulares		Aristas rectas y caras rectangulares.
Columnar		Prismas rematados en la parte superior por una cúpula. Típica de suelos alcalinos.

Prismática		Prismas con caras rectas y parte superior plana. Típica de horizontes enriquecidos en arcilla. Pueden presentar una gran dureza, constituyéndose en verdaderas barreras tanto para las raíces como para el agua.
Laminar		Agregados planos. Heredados en materiales depositados bajo el agua. Impide la penetración vertical de las raíces, el agua y el aire.

Fuente: Castro et al. (2003), basado en Porta et. al. (1994)

Los suelos que tienen agregados esferoidales (granular y migajosa) presentan mucho espacio poroso entre ellos, su permeabilidad es más rápida y son más productivos que los suelos de similar fertilidad que son masivos o integrados en bloques gruesos o prismas. (Santa Olalla Mañas y Valero, 1993).

Porosidad

La porosidad se define como el porcentaje por unidad de volumen de suelo en su estado natural no ocupado por las partículas sólidas. El espacio poroso está ocupado por aire y/o agua (Coras, 1995). La porosidad del suelo es igual a:

$$f = \frac{\text{Volumen poroso total}}{\text{Volumen aparente del suelo}} f = \frac{\text{Dr-Da}}{\text{Dr}} * 100$$

Donde:

f = Porosidad del suelo (%)

Dr = Densidad de partículas o densidad real (g/cm^3)

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

La porosidad está muy relacionada con la textura, pero depende también en gran medida del grado de agregación (influenciado por el contenido de la materia orgánica y los coloides inorgánicos) o la compactación que presente (Artigao y Guardado, 1993).

Densidad real

La densidad real o densidad de partículas sólidas es la relación entre la masa de éstas y el volumen que ocupan. Este concepto excluye el volumen del espacio poroso que existe entre las partículas sólidas (Narro, 1994; citado por Castro et al., 2003). La densidad real se calcula con la siguiente fórmula:

$$Dr = \frac{\text{Masa del suelo seco}}{\text{Volumen de partículas sólidas del suelo}} Dr = \frac{\text{Ms}}{\text{Vs}}$$

Donde:

Dr = Densidad real (g/cm^3)

Ms = Masa de suelo seco (g)

Vs = Volumen de partículas sólidas del suelo (g)

La densidad real de los suelos minerales varía de 2,6 a 2,9 g/cm^3, es común utilizar el valor de 2,65 g/cm^3 como densidad real del suelo, cuando se realizan cálculos preliminares (Coras, 1995).

Densidad aparente

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total que estos ocupan, es decir, se incluye el espacio poroso existente entre las partículas sólidas (Narro, 1994; citado por Castro et al., 2003). La densidad aparente se calcula con la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{\text{Masa del suelo seco}}{\text{Volumen aparente del suelo}} \quad Da = \frac{Ms}{Vt}$$

Donde:

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Ms = Masa del suelo seco (g)

Vt = Volumen aparente del suelo (cm^3)

La densidad aparente (también llamada peso específico aparente) es una medida de la porosidad de un suelo. La densidad aparente es importante porque determina la compactación y la facilidad de circulación de agua y aire. A efectos de riego, conocer su valor es esencial porque caracteriza la capacidad de almacenaje de agua en el suelo (Carrazón, 2007).

En términos prácticos, para su determinación, la relación es entre la muestra de suelo no disturbada, secada a 105-110°C y el volumen aparente que esta muestra no disturbada ocupa. Generalmente, se utilizan cilindros metálicos de 100 cm^3, lo que facilita el cálculo de la densidad aparenten del suelo (Figura 13).

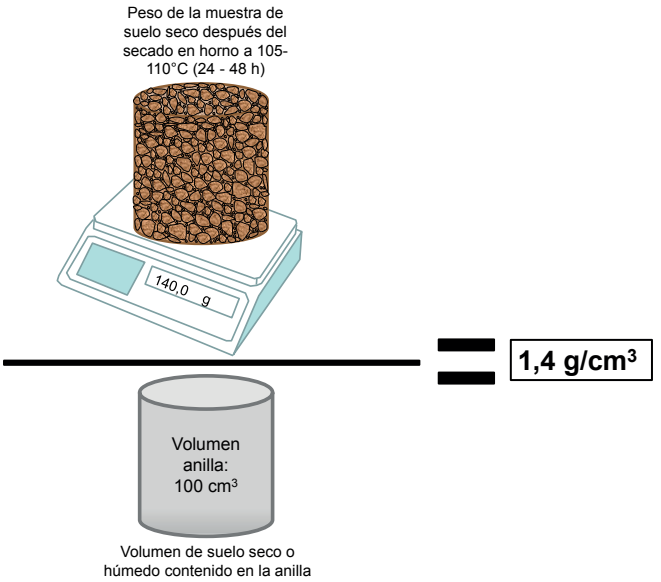


Figura 13. Cálculo de la densidad aparente

Un incremento de la densidad aparente del suelo, refleja un incremento de la compactación y una disminución del espacio poroso del suelo. La densidad aparente varía de 1 g/cm^3 en suelos arcillosos, orgánicos y bien estructurados, hasta alrededor de 1,8 g/cm^3 en suelos arenosos compactados.

Es necesario saber que su valor no es inmutable, sino que varía según los cambios que se produzcan en el suelo respecto al volumen de poros. Por ejemplo, la compactación por la labranza, o la disminución de materia orgánica, disminuyen el volumen de poros e incrementan la densidad aparente (Carrazón, 2007).

Infiltración en el suelo

La infiltración puede definirse como la capacidad de admisión de agua de un terreno desde la superficie al interior del mismo (ingreso vertical del agua al suelo). En otros términos, es la relación entre la lámina de agua infiltrada y el tiempo que tarda en infiltrarse esa lámina. Comúnmente suele expresarse en cm/h o mm/min, al tratarse de una expresión de velocidad.

La utilidad práctica de la infiltración radica en que posibilita determinar la infiltración acumulada de agua para cualquier tiempo de riego de acuerdo a las características particulares del suelo ya que se genera una ecuación explícita de la infiltración acumulada (ejem.: $I= 1{,}2347t^{0{,}456}$) en función del tiempo. Para el diseño de sistemas de riego por aspersión, su importancia reside en que permite determinar la velocidad de infiltración básica de un suelo particular (velocidad de admisión de agua de un determinado suelo), criterio fundamental para la selección de aspersores según su pluviometría, ya que la misma no deberá ser mayor a este valor porque produciría encharcamiento o escurrimiento, según sea la situación. En cambio, en el diseño de métodos de riego por superficie, ayuda en la determinación de las longitudes de surcos, melgas, etc.

Debido a que la infiltración puede cambiar mucho durante la temporada, los datos de infiltración deben usarse con precaución, así también con juicio atinado para interpretarlos. El uso de estos datos requiere conocimiento de los cultivos y de los patrones de cultivo, métodos y manejos de riego, labranza, tipo y estructura de suelo y época de la temporada de riego (Gandarillas, 1993).

La falta de una adecuada consideración del proceso de infiltración puede resultar en una distribución de agua poco uniforme en la parcela, así como en una excesiva pérdida del agua debido a la percolación profunda o la escorrentía.

Muchos de los factores relacionados al suelo que controlan la infiltración también gobiernan el movimiento y la distribución del agua en el suelo, durante y después del proceso de infiltración. Por tanto, es muy importante entender la infiltración y los factores que lo afectan para un diseño y operación eficientes en los sistemas de riego (Skaggs, 1983).

Velocidad de infiltración y velocidad de infiltración instantánea

La velocidad de infiltración puede definirse como la capacidad de admisión de agua de un terreno desde la superficie al interior del mismo. En otros términos, es la relación entre la lámina de agua infiltrada y el tiempo que tarda en infiltrarse esa lámina. Comúnmente suele expresarse en cm/h ó mm/min.

La velocidad de infiltración no es uniforme, tiende a disminuir mientras transcurre el tiempo desde que comienza la aplicación de agua en el suelo cuando ésta es continua. Si se grafican las velocidades registradas en función del tiempo transcurrido, se obtendrá una curva que puede ser adecuadamente descrita mediante el modelo potencial de la ecuación 1.

Si, a su vez, se grafica este modelo potencial, se obtendrá la curva representativa de la velocidad de infiltración. La velocidad de infiltración instantánea es el valor puntual obtenido en un tiempo determinado, cuando se introduce este último en la curva representativa.

$I = at^b$ Ecuación (1)

Donde:

I = Velocidad de infiltración, expresada en mm/hora, cm/hora, etc.

t = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos u horas

a = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial de tiempo

b = Exponente adimensional que varía de acuerdo a las características del suelo entre 0 y -1

Este modelo fue propuesto por Kostiakov en 1932. Es evidente que existen otros modelos desarrollados para representar la infiltración en el suelo, sin embargo, la ecuación de infiltración empírica propuesta por este autor, ha resultado muy útil y práctica para aplicación con fines de riego. Los límites para

los cuales se considera que esta ecuación reporta valores confiables oscilan entre 25 y 125 mm de infiltración acumulada, que es un rango que coincide razonablemente con los valores manejados en riego, sobre todo por superficie.

Infiltración acumulada

O también llamada lámina infiltrada acumulada. Considera la sumatoria de los valores puntuales de infiltración obtenidos de la curva de velocidad de infiltración instantánea. La ecuación de la infiltración acumulada (ecuación 2), se obtiene determinando el área formada entre dicha curva y los ejes, es decir integrando su ecuación entre los valores límites: $t_{inicial}=0$ y el t_{final}.

$$Icum = At^B \qquad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$B = b + 1; \qquad 0 < B < 1$

$A = a / B$

Para una mejor comprensión de su relación, a continuación, se grafican las curvas de velocidad de infiltración instantánea y de infiltración acumulada (figura 14):

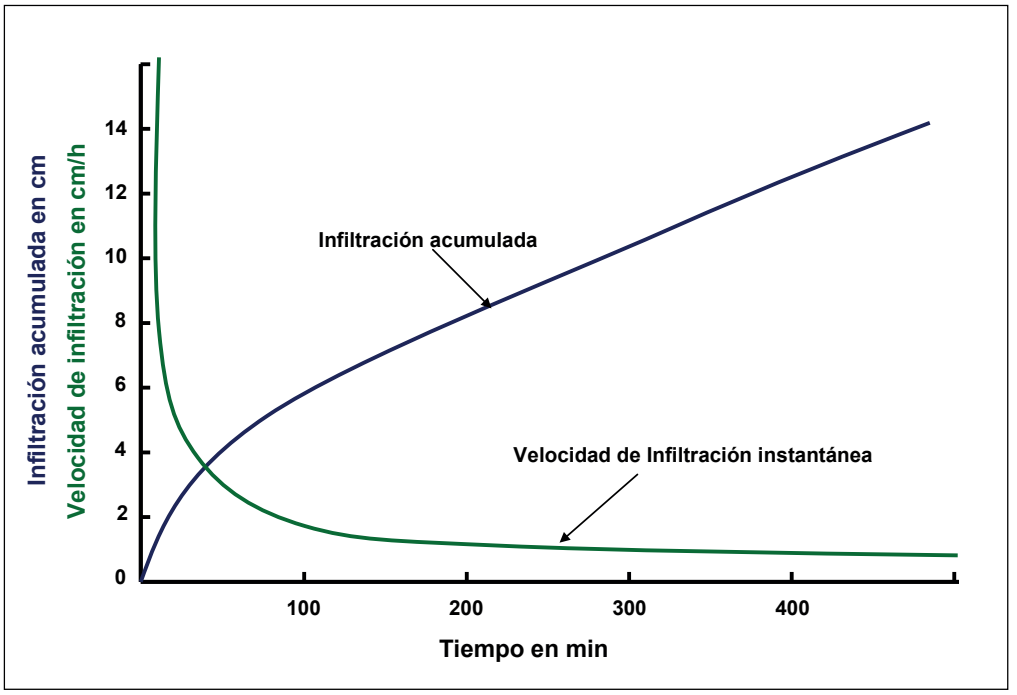


Figura 14 Curvas características de la velocidad de infiltración e infiltración acumulada

Velocidad de infiltración básica

Inicialmente, al aplicar agua, el valor de infiltración es alto y, a medida que se incrementa el contenido de agua en el suelo, disminuye paulatinamente hasta llegar a un valor constante denominado velocidad de infiltración básica. Ésta fue definida por el SCS del Departamento de Agricultura de los EUA, "como la velocidad de la infiltración del agua en el suelo, en el momento en que la variación de ésta con respecto al tiempo, es muy lenta y constante" (figura 15).

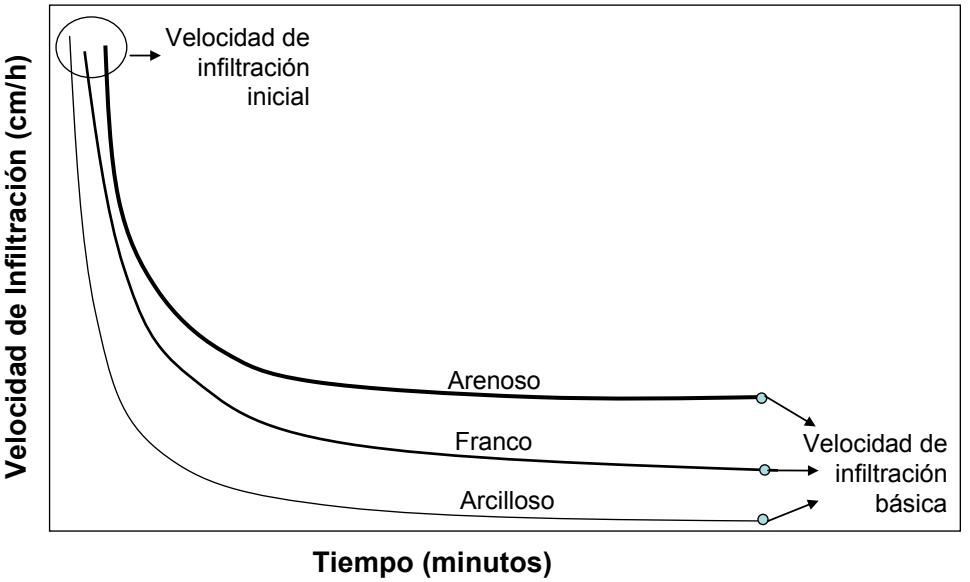


Figura 15. Variación de la curva de infiltración según textura del suelo

Esta velocidad tiene aplicación directa en el diseño y cálculos del riego por aspersión y el riego superficial. Para estos propósitos de riego es necesario determinar el valor de la velocidad de infiltración básica utilizando un criterio uniforme. En ese sentido, el SCS del Departamento de Agricultura de EUA establece que: "La velocidad de infiltración básica es el valor instantáneo que corresponde al tiempo en que la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración en función del tiempo es igual a -10% de su valor" (ecuación 3).

$$t_h = 10b \qquad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

t_b es el tiempo en horas para alcanzar la infiltración básica

Luego, reemplazando el tiempo en alcanzar la infiltración básica (ecuación 3) en la ecuación general de la infiltración (ecuación 1), se obtiene la ecuación general de la velocidad de infiltración básica:

$$I_b = a\,(-10b)^b \qquad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

I_b = Velocidad de infiltración básica

No hay que olvidar que b es el exponente que corresponde a la ecuación de velocidad de infiltración del suelo, sin embargo, comúnmente se determina la función de la Infiltración acumulada, por tanto, es necesario deducir los valores de b y a de la ecuación de Infiltración acumulada (A y B) de la siguiente manera:

De la ecuación de infiltración acumulada:

$$\text{Icum} = \left(\frac{a}{b+1}\right) . \, t^{\,b+1}$$

Tenemos que:

; 0 < B < 1

A

Entonces:

; B=b+a -1 < b < 0

A = a
b

Para tener una referencia, en la Tabla 5 se muestran rangos de infiltración básica para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 5. Rangos de velocidad de infiltración básica de los diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	mm/h
Arenoso	Más de 30
Franco arenoso	20-30
Franco	10 a 20
Franco arcilloso	5 a 10
Arcilloso	1-5

Fuente: Brouwer et al. (1988)

Factores que afectan las tasas de infiltración

Son varios los factores que afectan la velocidad de infiltración del agua en el suelo (Gurovich, 1985):

- Sellamiento superficial
- Compactación del suelo
- Partículas o grietas del suelo
- Preparación del suelo
- Materia orgánica y rotación de cultivos
- Sales del suelo y del agua
- Sedimentos en el agua de riego
- Perfil del suelo

Otros autores como Gavande et al (1972), también señalan varios factores como el espesor de agua empleado para el riego o lluvia, la temperatura del agua y el suelo, la estructura y la compactación, textura, estratificación, contenido de humedad, agregación y actividades microbianas, que afectan la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

Debido a que la infiltración puede cambiar mucho durante la temporada, los datos de infiltración deben usarse con precaución, así como su interpretación. El uso de estos datos requiere conocimiento de los cultivos y de los patrones de cultivo, métodos y manejos de riego, labranza, tipo y estructura de suelo y época de la temporada de riego (Gandarillas, 1993).

Medición de la infiltración por el método de la doble anilla

Las anillas de infiltración sirven para hacer pruebas que determinan la permeabilidad en suelo, simulando el proceso de infiltración del agua. Las pruebas se realizan enterrando dos anillas de forma concéntrica, esto quiere decir que una es de diámetro mayor que la otra (figura 16). Las de mayor tamaño generalmente son de 60 cm de diámetro y las menores de 30 cm de diámetro. Se llenan ambas con agua y se mide la tasa de descenso de esta agua en la anilla interior. Se realiza así para que el flujo del agua en el suelo sea lo más vertical posible, dado que la infiltración en la anilla externa limita el flujo lateral del agua infiltrada por la anilla interna, disminuyendo la distorsión de los datos obtenidos.

La prueba se realiza directamente "in situ" buscando un sitio (o sitios) representativo (s) dentro de la parcela agrícola que se quiere caracterizar.

Los materiales y equipos requeridos para la determinación de la infiltración son:

- 2-3 juegos de anillas infiltrómetros (interno y externo)
- 1 Combo
- 1 Nivel de albañil
- 1 Flexómetro
- 1 Flotador o una regla de 30 cm
- Plástico (1-2 m^2)
- Cronómetro

Las anillas se hincan en forma concéntrica, de ahí que se conoce también como el método de las anillas concéntricas, asegurándose que se introduzcan por lo menos 10 cm de profundidad. Esto determinará el éxito de la prueba, de lo contrario se realiza un adecuado hincado, el agua podría filtrar, lo cual significaría repetir la instalación e iniciar nuevamente la prueba.

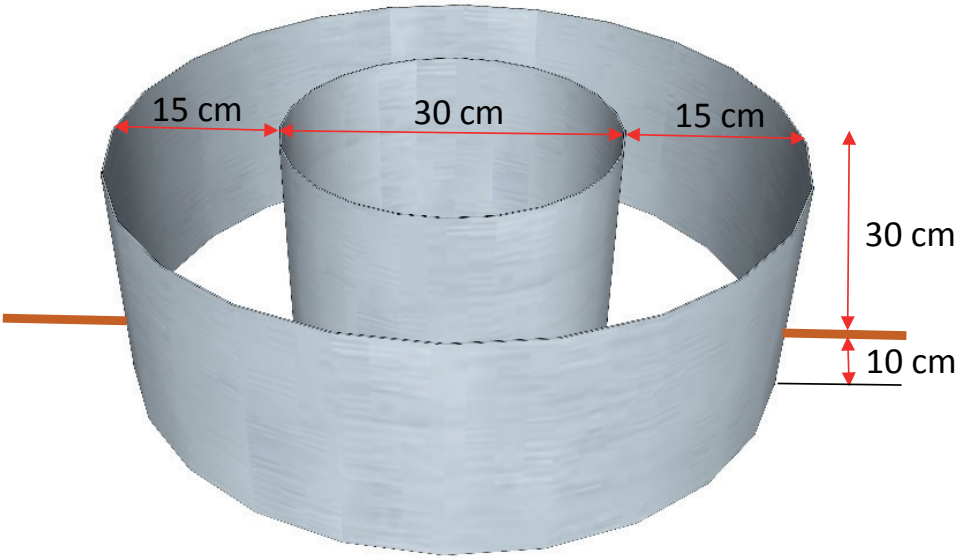


Figura 16. Instalación de las anillas en el campo

Asimismo, se deberá controlar el nivel de la anilla (horizontalidad de los bordes superiores), sobre todo de la anilla interna, que es donde se realizarán las lecturas, y especialmente si se va a utilizar un flotador con un soporte, para cuya lectura se requiere nivel cero. En caso de utilizar una regla graduada pegada en la pared del cilindro, el nivel horizontal cero es deseable, aunque no es imprescindible.

Una vez colocadas las anillas, lo más recomendable es utilizar un flotador para realizar las lecturas del descenso de agua porque permite una mejor posición al registrador para visualizar la varilla; vale aclarar que se trata de lecturas indirectas (figura 17). Nótese que, si este es el método escogido, se debe instalar el flotador y su soporte inmediatamente después de quitar el plástico que contiene el agua para la anilla interior.

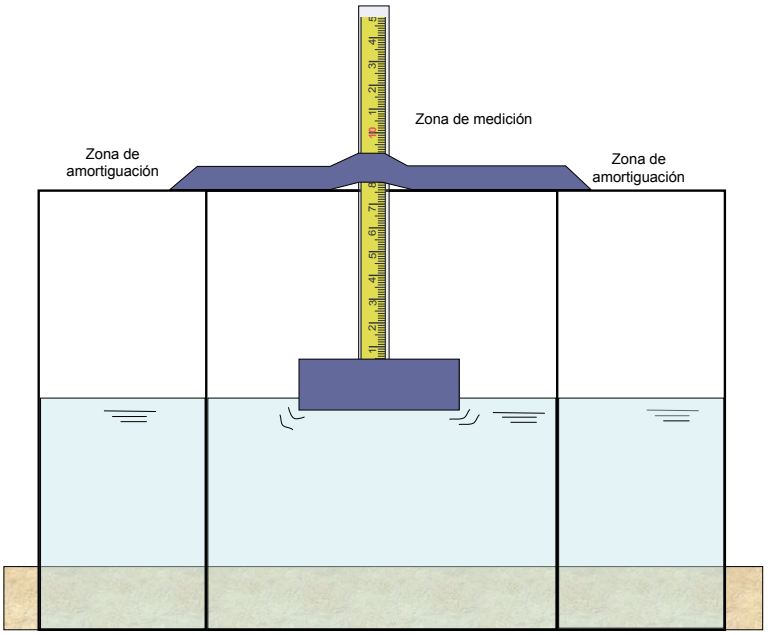


Figura 17. Lectura indirecta

En el ejemplo anterior, la lectura sería 9,2 cm con la ventaja de que la posición del lector es más cómoda y prácticamente horizontal.

En cambio, si se opta por aforar mediante una regla graduada adherida a la anilla interior (Figura 18), su instalación debe ser posterior a la de las anillas y anterior a la utilización del plástico para la anilla interior. En este caso, la lectura será directa por registrarse el nivel del agua directamente sobre la regla graduada.

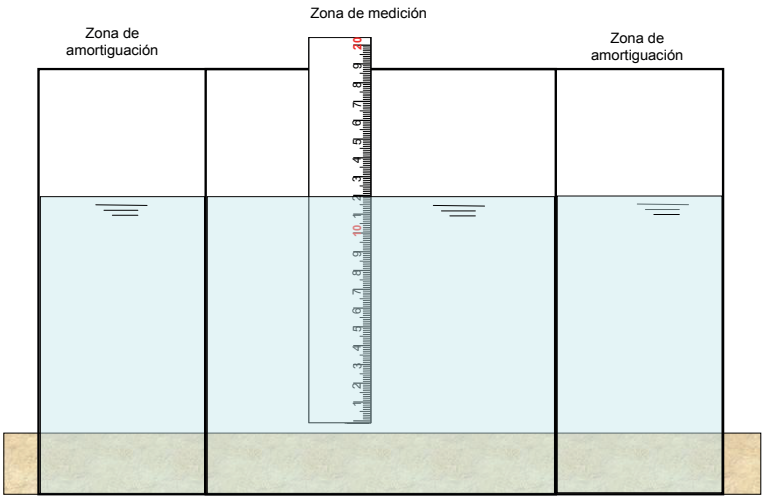


Figura 18. Lectura directa

En el ejemplo anterior, la lectura sería 11,9 cm, lectura realizada a nivel del agua. Sin embargo, por la posición incómoda de la persona que hace las lecturas, hay mayor probabilidad de cometer errores en las mismas. Utilizando el flotador la dirección de la vista del lector es prácticamente horizontal por tanto la probabilidad de cometer error en las lecturas disminuye.

Una vez instaladas las dos anillas en forma concéntrica, alistado el cronómetro o reloj y ubicada la regla graduada (si es el caso), se procede a verter el agua (Figura 19) en ambos compartimentos creados por la disposición de las anillas. Como se ha visto en algunas figuras anteriores, al compartimento

formado entre ambas anillas se le llamará “zona de amortiguación” y el espacio del centro simplemente será mencionado como “la anilla interna o zona de medición”.

Figura 19. Vertido de agua en las anillas

Inmediatamente se vierte agua en la zona de amortiguación, procurando que la altura de agua sea la misma que en la anilla interna. Se debe evitar aplicar el agua directamente al suelo porque existe el riesgo de que el chorro socave su superficie, influyendo así la toma de datos. Para ello se puede echar el agua sobre una parte del plástico o las manos. En último caso, se aplicará directamente al suelo, pero repartiendo el chorro en varios lugares de la zona de amortiguación y con suavidad.

Luego se procede quita el plástico (Figura 20), se esperan algunos segundos para que se estabilice el agua y se inician las lecturas (Nivel inicial), ya sea colocando el flotador con su soporte o leyendo directamente en la regla pegada en la parte interna de la anilla.

Figura 20. Inicio de lecturas

Las lecturas iniciales se deberán realizar con mayor frecuencia (las primeras cinco lecturas cada minuto), debido a que normalmente al inicio la infiltración del agua es más rápida, para disminuir paulatinamente. Asimismo, el inicio es el momento crítico ya que es cuando se podrían presentar filtraciones por una mala instalación de las anillas. O sea que se debe vigilar esta posible situación. Si fuese así, hay que suspender la prueba, instalar las anillas en otro sitio e iniciar nuevamente.

Como el periodo de toma de datos es largo (5 horas), existe la posibilidad de que el agua aplicada infiltre en su totalidad antes de completarlo. Por eso, se debe vigilar constantemente la altura de la lámina de agua. Ésta nunca debe disminuir a menos de 3 cm. Cuando falte poco para que esto ocurra (cuando la lámina sea de 5 cm de altura), se debe recuperar el nivel de agua donde sea necesario: en la anilla interna, en la zona de amortiguación o en ambas.

Para la anilla interna se procede de la siguiente manera. Se realiza una última lectura del nivel de agua, anotando el tiempo correspondiente. Luego se vierte el agua, con los mismos cuidados expuestos al describir el llenado de la zona de amortiguación. Así se llega a un nuevo nivel e inmediatamente se procede a realizar la nueva lectura en la cual se considera el nuevo nivel de referencia (nuevo nivel inicial) y se anota en la segunda columna (Nivel de recuperación de agua). A partir de éste, se vuelven a registrar las lecturas en forma regular, anotándose nuevamente en la primera columna (Nivel de agua) y respetando los intervalos programados; esto quiere decir que no es necesario comenzar nuevamente las lecturas con periodos cortos de tiempo.

El procedimiento se realiza las veces que sea necesario, como se ve en la tabla 6. Esto variará de acuerdo al tipo de suelo, es decir, que en suelos de textura pesada las recargas de agua serán necesarias ocasionalmente, en cambio, en suelos de textura liviana serán frecuentes.

Tabla 6. Datos de campo

Intervalo de tiempo entre lecturas (min)	Nivel de agua en anilla interior (cm)	Nivel de recuperación de agua en anilla interior (cm)
	42,00	
1	43,30	
1	43,80	
1	44,40	
1	44,50	38,5
1	38,80	
5	39,40	
5	39,90	
10	40,70	
10	41,30	
15	41,70	
15	42,20	
30	43,00	38
30	38,80	
60	40,40	
60	41,90	
60	43,20	

Procesamiento de datos

Paso 1

Son cálculos bastante sencillos, cuyo objetivo es obtener datos más elaborados para ser utilizados en operaciones más complejas. El cálculo del tiempo acumulado se realiza sumando el intervalo de

tiempo de la lectura al valor del tiempo acumulado correspondiente a la anterior lectura. Cuando se trata de la primera lectura, el tiempo acumulado de la anterior lectura es cero.

A continuación, se calcula la lámina infiltrada para cada intervalo de tiempo. Para ello se debe calcular la diferencia entre cada valor de nivel de agua y el nivel de agua anterior, anotando el resultado en valor absoluto (sin signo negativo). Cuando exista el dato de nivel de recuperación del agua, éste será considerado el nivel de agua anterior. Para una mejor comprensión considérense los valores mostrados en la anterior tabla. Allí se observa que la lámina infiltrada para los 5 minutos de tiempo acumulado, se ha calculado restando el nivel de agua correspondiente (38,8) del nivel de recuperación del agua (38,5), y no así del nivel anterior (43,0). A continuación, se restan los valores del nivel anterior hasta que nuevamente existieron datos de nivel de recuperación del agua.

Para el cálculo de la lámina acumulada, se debe sumar cada valor de lámina infiltrada al valor anterior de lámina acumulada, de forma análoga al cálculo de tiempo acumulado. Una vez más, cuando se trata del primer dato, la lámina acumulada de la anterior lectura es cero.

Para una mejor comprensión de estos tres primeros cálculos, considérese el ejemplo de cálculo de la tabla 7.

Tabla 7. Lámina infiltrada calculada en cada intervalo de tiempo

Intervalo de tiempo entre lecturas (min)	Nivel de agua en anilla interior (cm)	Nivel de recuperación de agua en anilla interior (cm)	Lámina infiltrada en el intervalo de tiempo (cm)
	42,00		
1	43,30		1,30
1	43,80		0,50
1	44,40		0,60
1	44,50	38,5	0,10
1	38,80		0,30
5	39,40		0,60
5	39,90		0,50
10	40,70		0,80
10	41,30		0,60
15	41,70		0,40
15	42,20		0,50
30	43,00	38	0,80
30	38,80		0,80
60	40,40		1,60
60	41,90		1,50
60	43,20		1,30

Paso 2

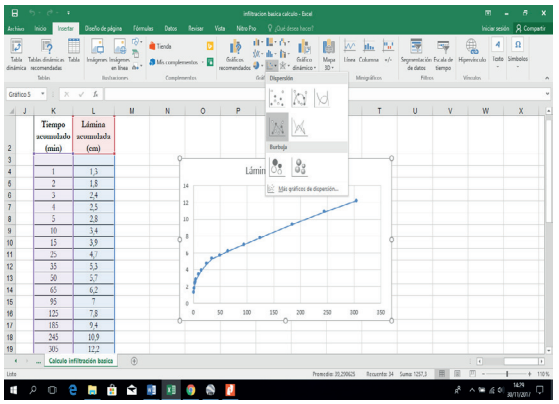
Consiste en calcular los coeficientes necesarios para obtener la ecuación de la infiltración acumulada. La opción más práctica es mediante el programa Excel de Microsoft Office. Consiste en la inclusión de una línea de tendencia en base a la curva formada por los datos de campo. Para dicho procedimiento se utilizan sólo los datos de tiempo acumulado y lámina acumulada, tal como se aprecia en la Tabla 8.

Tabla 8. Tiempo acumulado y lámina acumulada

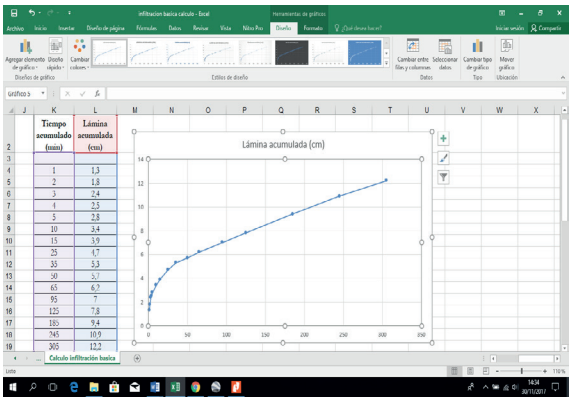
Tiempo acumulado (min)	Lámina acumulada (cm)
1	1,3
2	1,8
3	2,4
4	2,5
5	2,8
10	3,4
15	3,9
25	4,7
35	5,3
50	5,7
65	6,2
95	7
125	7,8
185	9,4
245	10,9
305	12,2

Luego de juntar estas dos columnas se procede a graficar estos datos mediante el asistente de gráfico, escogiéndose el tipo de grafico XY (Dispersión). En la figura 21 se puede apreciar los pasos seguidos en Excel para determinar los valores de la ecuación, es decir la construcción del gráfico de infiltración acumulada con la ayuda del asistente de gráficos de Excel, incluyendo la obtención de *A*, *B* y r^2 (ecuación de la línea de tendencia).

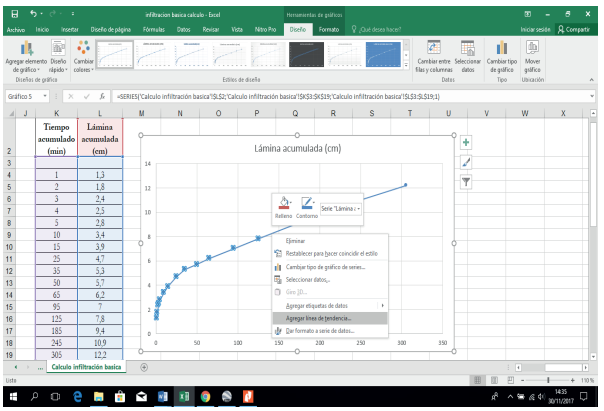
(a) Selección del tipo de gráfico



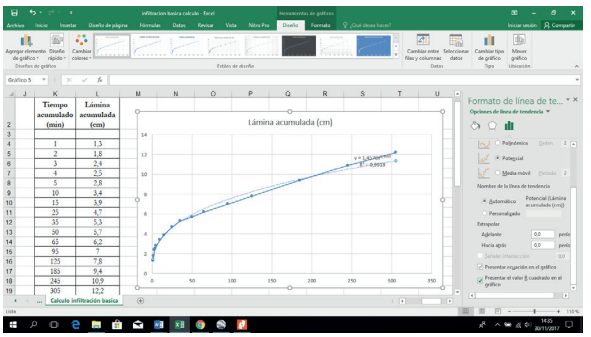
(b) Obtención del gráfico de infiltración acumulada



(c) Primer paso para agregar línea de tendencia



(d) Opciones que se deben escoger para la línea de tendencia



(e) Gráfico de infiltración acumulada incluyendo línea de tendencia y ecuación

Tiempo acumulado (min)	*Lámina acumulada (cm)*
1	*1,3*
2	*1,8*
3	*2,4*
4	*2,5*
5	*2,8*
10	*3,4*
15	*3,9*
25	*4,7*
35	*5,3*
50	*5,7*
65	*6,2*
95	*7*
125	*7,8*
185	*9,4*
245	*10,9*
305	*12,2*

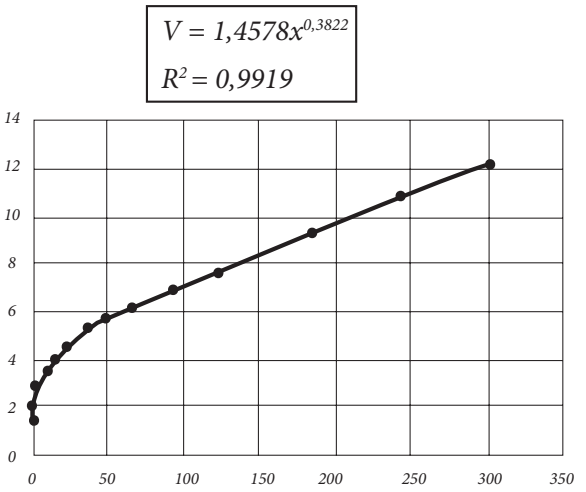


Figura 21. Pasos rutinarios para determinar la ecuación de infiltración acumulada

Simplemente se debe reemplazar *Icum* por *y*, además de *t* por x en la ecuación proporcionada por Excel, para definir la ecuación de la infiltración acumulada.

Paso 3

Consiste en definir la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea (Vii). Es necesario porque, como se ha desarrollado previamente, se utilizan los valores que definen a la ecuación de la Vii para la determinación de la velocidad de infiltración básica. No se debe olvidar que esta última es la que será empleada en los cálculos para diseñar algunos sistemas de riego.

Para definir la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea, se emplean las equivalencias definidas al obtener la ecuación 2. Es decir:

$B = b + 1$ de donde se obtiene que $b = B - 1$

$A = a / B$ de donde se obtiene que $a = A * B$

Reemplazando los valores obtenidos en el ejemplo estudiado:

$b = 0,3593 - 1 = -0,6407$

$a = 1,4578 * 0,3593 = 0,52379$

Reemplazando *a* y b en la ecuación 1:

$I = 0,52379\ t^{-0,6407}$

Que es la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea para el caso estudiado.

Paso 4

Consiste en dos cálculos. El primero es la determinación del tiempo que se tarda en alcanzar la velocidad de infiltración básica mediante la ecuación 3. El segundo es el reemplazo de dicho valor en la ecuación 4. El resultado final será la determinación de la velocidad de infiltración básica.

Así, reemplazando el valor determinado de *b* en la ecuación 3:

t_b = - 10 * (-0,6407)

t_b = 6,41 horas = 384,4 min

Y, finalmente, se reemplaza el valor del tiempo en minutos, en la ecuación 4:

$I_b = 0{,}52379\ (384{,}4)^{-0{,}6407}$

I_b = 0,01156 cm/min = 6,9 mm/h

3.1.3. Contenido de agua en el suelo

En condiciones normales, el espacio poroso que presentan los suelos, en parte está ocupado por agua con sustancias disueltas (sales y gases) y en parte por una mezcla de diversos gases (entre ellos vapor de agua) que se conoce como "aire del suelo". El agua, como tal también se encuentra formando parte de la estructura cristalina de algunos minerales de la fase sólida del suelo, pero tan fuertemente retenida que se requieren temperaturas muy altas para liberarla. Para la mayoría de los fines prácticos, se entiende por agua del suelo la que puede ser extraída por desecación a una temperatura que varía entre 105 y 110°C (Castro et al, 2003).

El contenido de agua en el suelo puede expresarse de tres maneras diferentes:

- Humedad Gravimétrica (w)
- Humedad Volumétrica (θ)
- En altura de lámina de agua (mm)

Humedad gravimétrica (w)

La cantidad de agua en el suelo se suele expresar generalmente en forma de porcentajes con relación a una determinada base constante. Si la base elegida es la masa del suelo seco en estufa, y el agua se expresa en unidades de masa, se obtiene la llamada "humedad gravimétrica", que puede calcularse por la siguiente expresión (Artigao y Guardado, 1993):

Donde:

$$w \quad \frac{M\ w}{\mathrm{M\ s}} * 100$$

w = Humedad gravimétrica del suelo (g/g; %)

Mw = Masa de agua (g)

Ms = Masa de suelo (g)

Ahora bien, para la determinación práctica de la humedad contenida en una determinada masa de suelo, la anterior fórmula se la expresa en términos de masa de suelo húmedo y masa de suelo seco, es decir, aquella desecada en una estufa a 105 - 110° C:

Donde:

$$w \quad \frac{M\ s\,w\ \ M\ s\,s}{\mathrm{M\,s\,s}} * 100$$

w = Humedad gravimétrica del suelo (g/g, %)

Msw = Masa de suelo húmedo (g)

Mss =Masa de suelo seco (g)

En la figura 22 se muestra una representación esquemática del cálculo de la humedad gravimétrica del suelo.

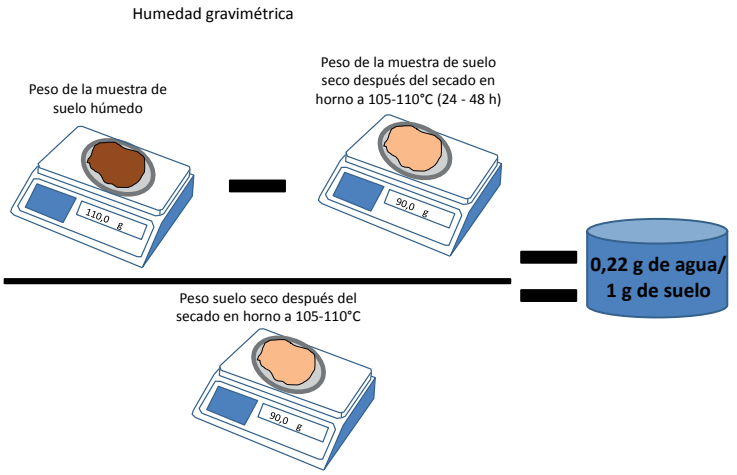


Figura 22. Ejemplo de cálculo de la humedad gravimétrica del suelo.

Cabe aclarar que, para determinar la humedad gravimétrica del suelo puede ser realizado con muestras disturbadas y no disturbadas, ya que la base de cálculo es peso solamente.

Humedad volumétrica (θ)

Si la base elegida es el volumen del suelo y el agua se expresa en unidades de volumen, el contenido de agua, así calculado, se denomina "humedad volumétrica", cuya expresión de cálculo es la siguiente (Artigao y Guardado, 1993).

Donde:

$$\theta = \frac{V\ w}{\mathrm{V\,t}} * 100$$

θ = Humedad volumétrica del suelo (g/g; %)

Vw= Volumen de agua (cm^3)

Vt = Volumen aparente total del suelo (cm^3)

Ahora bien, para la determinación práctica de la humedad contenida en el suelo en términos volumétricos, sea como fracción o como porcentaje, la anterior fórmula se la expresa de la siguiente manera:

Donde:

$$\theta = \frac{M\ s\,w\ \ M\ s\,s}{\mathrm{D\,w} * V\ t}\ 100$$

θ = Humedad volumétrica del suelo (cm^3/cm^3; %)

Msw = Masa de suelo húmedo (g)

Mss =Masa de suelo seco (g)

Dw = Densidad del agua ≈ 1 g/cm^3

Vt = Volumen aparente del suelo (cm^3)

Otra forma de obtener la humedad volumétrica es multiplicando la humedad gravimétrica por la densidad aparente del suelo:

Donde:

$$\theta = \frac{D\ a}{\mathrm{D\ w}} * w$$

θ = Humedad volumétrica del suelo (cm^3/cm^3; %)

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Dw = Densidad del agua ≈ 1 g/cm^3

En riego, la humedad volumétrica es de mucha utilidad, pues permite determinar los requerimientos de agua para riego en términos de volumen y lámina:

En la figura 23 se muestra una representación esquemática de cálculo de la humedad volumétrica del suelo.

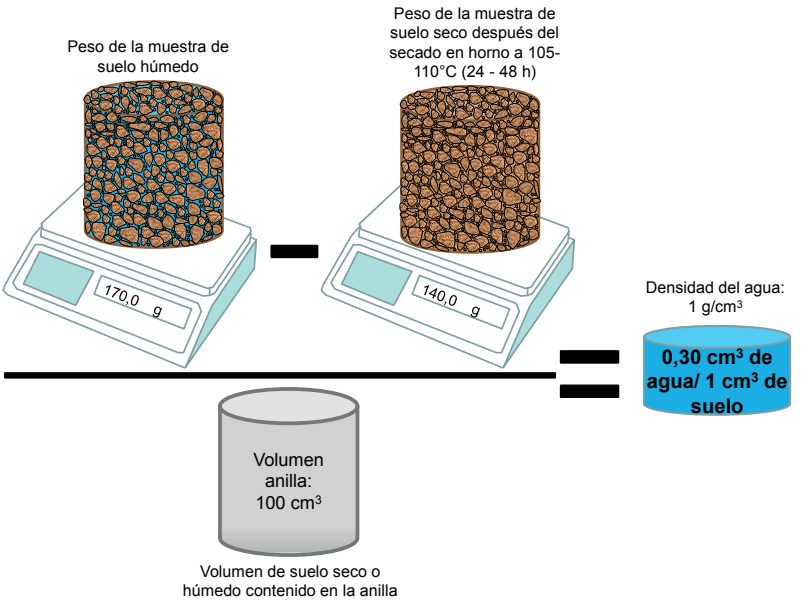


Figura 23. Ejemplo de cálculo de la humedad volumétrica del suelo.

En altura de lámina de agua

El agua contenida en un volumen de suelo (volumen total: partículas del suelo más poros) también puede expresarse en altura de lámina de agua. Esta forma de expresar la humedad del suelo es de mucha utilidad pues es independiente de la superficie del terreno. Es de hacer notar que generalmente, los datos de precipitación pluvial, así como de la demanda de agua de los cultivos se expresan también en altura de lámina de agua que también facilitan para calcular cuánta agua de riego necesita un cultivo

(requerimientos de riego). Por tanto, el cálculo de cuánta agua de riego requiere un suelo para llegar a máxima capacidad de almacenamiento, pasa por una simple operación aritmética de sustracción o adición. Posteriormente, es fácil determinar este requerimiento en volumen de agua para cualquier área de terreno considerado.

Si tenemos un pedazo de suelo húmedo de 1 m^2 de superficie y 1 m de profundidad (1 m^3) (sin disturbar). Si sacamos el agua contenida en el metro cúbico de suelo y se lo acumula sobre la misma superficie, ésta alcanzaría una altura h (Figura 24). Si esta altura h fuese por ejemplo 100 mm, la humedad de este pedazo de suelo podría expresarse como 100 mm de agua en un metro de profundidad de suelo (100 mm/m). Esta forma de expresar la humedad en el suelo se conoce como lámina de agua.

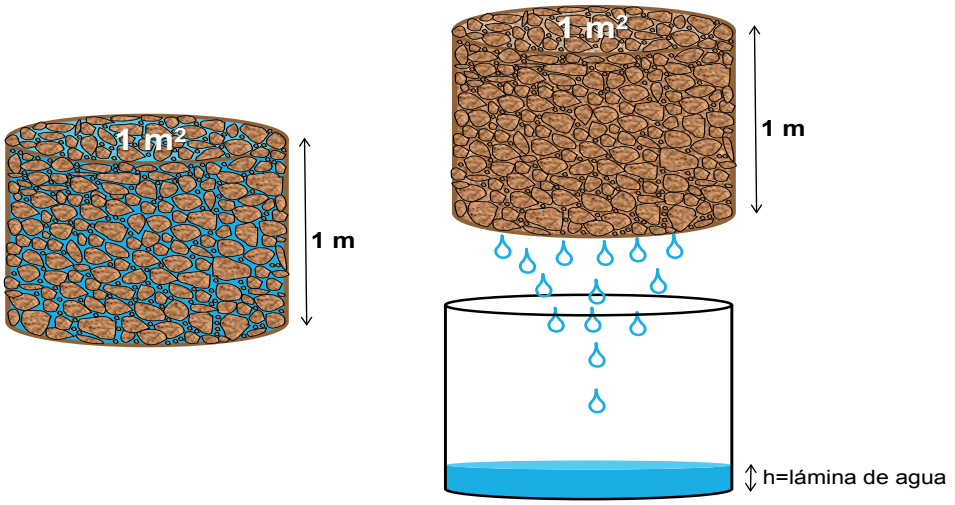


Figura 24. Contenido de agua del suelo expresado en altura de lámina de agua.

También es posible calcular la lámina de agua existente en el suelo a partir de la humedad volumétrica. Por ejemplo, 12% de humedad volumétrica en el suelo significa 12 cm^3 de agua en 12 cm^3 de suelo. Como la relación de longitudes es la misma que de volúmenes, ya que la superficie base (superficie del suelo) es la misma, la humedad del suelo en unidades de longitud se puede expresar como fracción en vez de porcentaje. Así, del ejemplo anterior, para una humedad volumétrica de 12%, la humedad expresada en altura de agua es 0.12 cm de agua para una altura de un centímetro de suelo. Si se quiere calcular el espesor total de agua presente en un suelo hasta una determinada profundidad, bastará multiplicar la humedad volumétrica del suelo (su fracción) por la profundidad elegida (por ejemplo 32 cm).

Donde:

$$Lam=\theta*p$$

Lam = Humedad del suelo expresada como lámina de agua (cm, mm)

θ = Humedad volumétrica del suelo (cm^3/cm^3)

p = altura o profundidad del estrato considerado (cm)

Para el ejemplo anterior resultará lo siguiente: Lam = 0,12*32 cm = 3,84 cm

3.1.4. Cálculo de la lámina de agua

La fórmula utilizada para determinar la lámina de agua correspondiente a cualquier humedad del suelo, considerando datos de humedad gravimétrica, humedad volumétrica, densidad aparente y profundidad de suelo, es la siguiente:

Donde:

$$L\ a\ m\ \left[\frac{w}{100}\right]*\frac{D\ a}{\mathrm{D\ w}}*p$$

Lam = Humedad del suelo expresada como lámina de agua (cm, mm)

w = Humedad gravimétrica del suelo (%)

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Dw = Densidad del agua ≈ 1 g/cm^3

p = Profundidad de humedecimiento o mojado del suelo (cm, mm)

Si la humedad considerada ya está expresado en términos volumétricos (θ), entonces ya no se consideran, Da y Dw.

3.1.5. Niveles de referencia de la humedad del suelo

En función de la proporción de agua en los poros del suelo, y su disponibilidad para las plantas, se definen los siguientes niveles de humedad del suelo: Saturación, Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente, Humedad Total Disponible y Humedad Fácilmente Disponible.

Saturación

De acuerdo a Artigao y Guardado (2003) es la cantidad de agua (expresada en forma gravimétrica) que un suelo contiene cuando todos sus poros están llenos de agua tras una lluvia o un riego (Figura 25a). En forma práctica, se suele determinar añadiendo agua a una muestra de suelo hasta lograr una pasta saturada en la que se determina la humedad por el método gravimétrico (desecación en estufa).

La mayoría de cultivos no pueden sobrevivir más de 2 - 5 días en condiciones de saturación, siendo el arroz la principal excepción. Una vez que la lluvia o el riego han terminado, parte del agua presente en los poros se empezará a mover hacia abajo por gravedad. Este proceso se denomina drenaje o percolación y suele durar entre unas pocas horas en el caso de los suelos arenosos, y dos o tres días en el caso de los arcillosos (Carrazón, 2007).

Capacidad de campo (CC)

Es el máximo nivel de humedad que el suelo puede retener en contra de la gravedad, es decir, el contenido de humedad del suelo una vez que el drenaje ha terminado. En este estado de humedad los poros grandes contienen tanto aire como agua (ver Figura 25b), mientras que los más pequeños están aún repletos de agua. (Carrazón, 2007).

Se introdujo este concepto por Israelsen y West (1922), para designar la cantidad de agua, expresada como humedad gravimétrica en porcentaje, de un suelo que ha sido mojado abundantemente por riego o por lluvia y después dejado drenar libremente, evitando las pérdidas por evapotranspiración, hasta que la intensidad del drenaje sea despreciable. El tiempo que se considera para que el drenaje sea despreciable, se ha fijado arbitrariamente en 48 horas después del riego (Artigao y Guardado, 1993).

De acuerdo a los mismos autores, en general su uso debe restringirse, para expresar una zona de contenido de humedad y no es, por tanto, en sentido estricto, una constante de humedad del suelo.

La humedad retenida a 0,33 bares en una muestra de suelo no disturbada durante 48 horas en una membrana de presión, se dice que es la humedad equivalente a CC. Por cuestiones prácticas (tiempo y costo para su determinación en campo y el nivel de precisión), generalmente se recurre a la determinación en laboratorio para determinar este valor.

Al ser el nivel máximo de humedad que un determinado suelo puede retener, su determinación es

fundamental para la determinación de los principales parámetros de riego: lámina de riego, frecuencia de riego y tiempo de riego.

Punto de marchitez permanente (PMP)

Si el suelo no recibe nuevos aportes de agua, la evaporación desde el suelo y la extracción por parte de las raíces hacen que el agua almacenada disminuya poco a poco. Cuanto más se seca el suelo, más firmemente es retenida el agua por el suelo, y más difícil resulta para las plantas extraerla. Llegará un momento en que la extracción del agua por parte de las plantas ya no es suficiente para cubrir sus necesidades y empiezan a marchitarse, hasta que finalmente mueren. El suelo aun contiene cierto nivel de humedad (figura 25c), pero resulta imposible para las raíces de las plantas succionar el agua que queda.

Este concepto (como punto de marchitamiento) se introdujo en la física de suelos por Briggs y Shantz (1912), para indicar la humedad existente en el suelo cuando la planta se marchita. Estos investigadores determinaron su valor, cultivando plantas en recipientes con tierra que se regaban y posteriormente se sellaba la superficie de la tierra, con lo cual las plantas iban agotando el agua contenida en el suelo hasta que acontecía el marchitamiento de las mismas. Llegado ese momento, las plantas se colocaban en un ambiente de humedad, y si se recuperaban de la noche a la mañana, se volvían a exponer a las condiciones primitivas. El procedimiento indicado se volvía a repetir sucesivas veces, hasta que, al colocar las plantas en la atmósfera húmeda, no se observaba recuperación, determinándose en ese momento la humedad existente en el suelo. Briggs y Shantz realizaron este procedimiento con una gama amplia de distintos tipos de plantas, encontrando sólo pequeñas diferencias en la humedad del suelo al producirse el marchitamiento (Artigao y Guardado, 1993).

Hendrickson y Weihmeyer (1945) cambiaron el concepto de punto de marchitamiento por el de "punto de marchitamiento permanente", definiendo éste como "el contenido de humedad en la zona de las raíces, en el cual la planta marchita ya no puede lograr recobrar igual turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas". La cantidad de agua retenida por un suelo sometido a una diferencia de presión de 15 bares en la cámara de membrana de presión, puede tomarse a efectos prácticos, y siempre que no se requiera gran precisión, como el valor del punto de marchitamiento permanente del suelo (Artigao y Guardado, 1993).

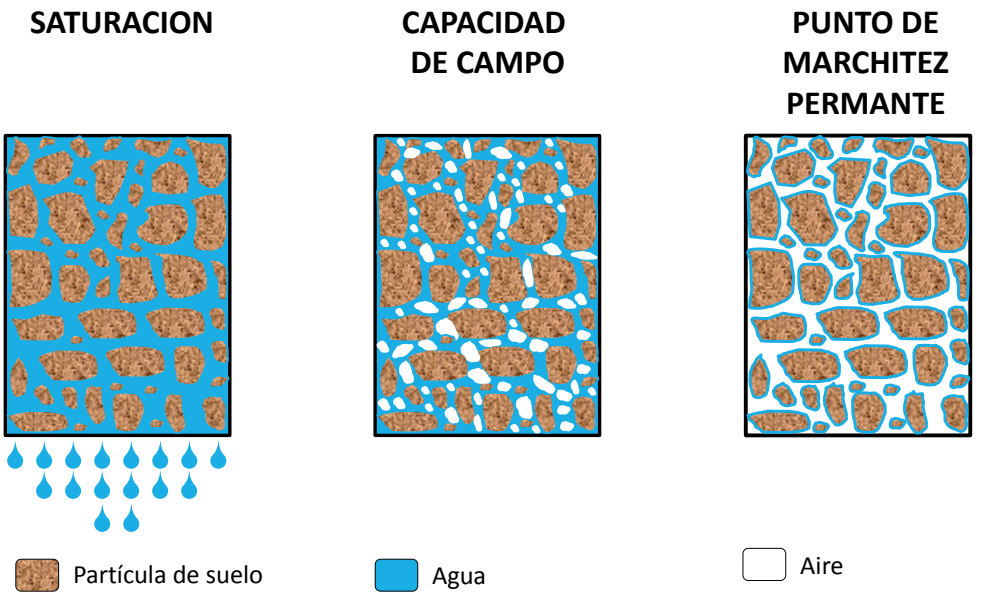


Figura 25. Estados de humedad del suelo (Carrazón, 2007)

Varios autores han tratado de encontrar valores referenciales de la CC, PMP, densidad aparente, y la velocidad de infiltración instantánea de acuerdo a las principales clases texturales. En la Tabla 9 se presenta una de estos cuadros resúmenes que podrían servir de referencia a la hora de realizar (pre) diseños de sistemas de riego. En todo caso, si se requiere mayor precisión y existen las posibilidades, es preferible determinar estos valores en campo.

Tabla 9. Referencias de las principales propiedades hidrofísicas del suelo

Textura del suelo	Densidad aparente (g/cm3)	Capacidad de campo (% θ g)	Punto de marchitez permanente (% θ g)	Infiltración básica (mm/h)
Arenoso	1,65 (1,55 – 1,90)	9 (6 - 12)	4 (2 - 6)	50 (25 - 250)
Franco arenoso 1,50 (1,40 – 1,60)		14 (10 - 18)	6 (4 - 8)	25 (13 - 75)
Franco	1,40 (1,35 – 1,50)22	22 (18 - 26)	10 (8 - 12)	13 (8 - 20)
Franco arcilloso	1,35 (1,30 – 1,40)	27 (23 - 31)	13 (11 - 15)	8 (2,5 - 15)
Arcilloso	1,25 (1,20 – 1,30)	35 (31 - 39)	17 (15 - 19)	5 (1,3 - 10)

Fuente: Mijahlovich (1979) citado por Carrazón (2007)

3.1.5. La capacidad de retención de humedad del suelo y los parámetros relacionados

Humedad Aprovechable (HA)

Llamado también intervalo de humedad disponible. Es la cantidad de agua disponible en el suelo entre la Capacidad de Campo y el Punto de Capacidad de Campo.

HA = CC – PMP

Donde:

HA: Humedad Aprovechable (g/g; %)

CC: Capacidad de Campo (g/g; %)

PMP: Punto de marchitez permanente (g/g; %)

Considerando los inconvenientes que presentaban las definiciones de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, se suelen obtener los valores del intervalo de humedad disponible como diferencia entre las humedades retenidas por el suelo sometido a fuerzas de succión de 1/3 y 15 atmósferas (Artigao y Guardado, 1993).

Para determinar la lámina de agua correspondiente a la humedad aprovechable, la fórmula es la siguiente:

Donde:

$$L\,a\ \ \mathrm{m} = \left[\frac{C\ C\ P\ M\ \ P}{100}\right] * \frac{D\ a}{} * p$$

Lam = Humedad del suelo expresada como lámina de agua (cm, mm)

CC = Humedad gravimétrica del suelo correspondiente a Capacidad de Campo (%)

PMP = Humedad gravimétrica del suelo correspondiente al Punto de Marchitez Permanente (%)

Da = Densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Dw = Densidad del agua ≈ 1 g/cm^3

p = Profundidad de humedecimiento o mojado del suelo (cm, mm)

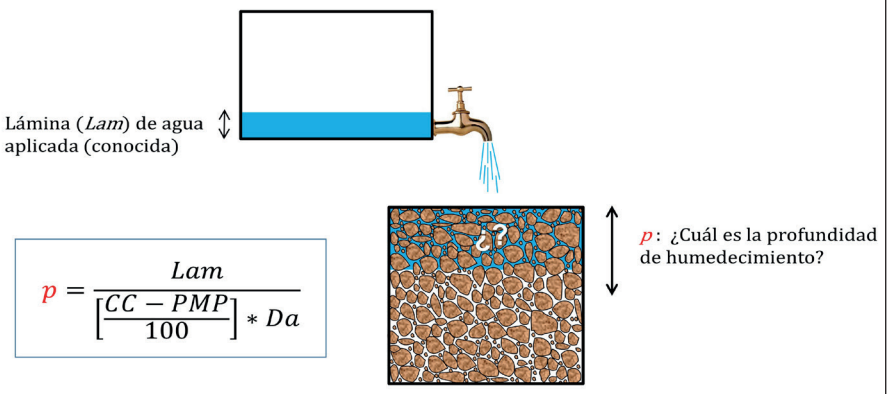
Si las humedades correspondientes a CC y PMP ya están expresadas en términos volumétricos, entonces ya no se consideran Da y Dw.

Si esta lámina determinada de la humedad aprovechable se la expresa en mm/m, entonces nos estamos refiriendo a la Capacidad de Retención de Humedad de un determinado suelo, es decir conocer la cantidad de agua que puede ser retenida en un metro de profundidad de suelo, a efectos de comparación.

Problemas tipo

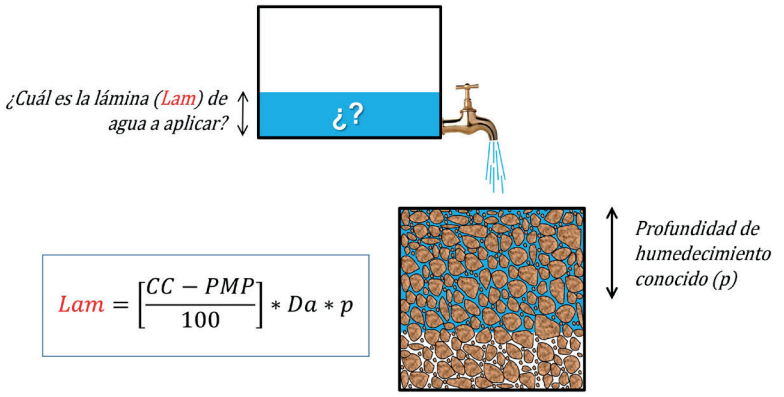
Ahora bien, es importante mencionar que con la anterior fórmula podemos responder dos tipos de problemas o preguntas tipo que se pueden presentar comúnmente (Figura 26):

Problema Tipo I: Aplicando una determinada lámina de agua, ¿qué profundidad se espera mojar en el suelo?



$$p = \frac{Lam}{\left[\frac{CC - PMP}{100}\right] * Da}$$

Problema Tipo II: Para una profundidad de humedecimiento dada (requerida), ¿qué lámina de agua se debe aplicar?



$$Lam = \left[\frac{CC - PMP}{100}\right] * Da * p$$

Figura 26. Problemas Tipo I y II para el cálculo de la lámina de riego y la profundidad de mojado

Si realizamos estos cálculos para diferentes tipos de suelo, tendremos diferentes resultados relacionados

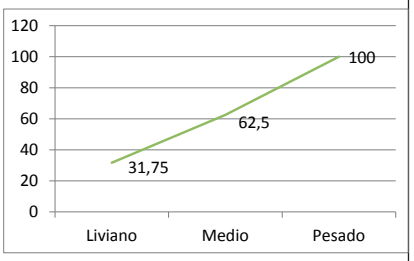
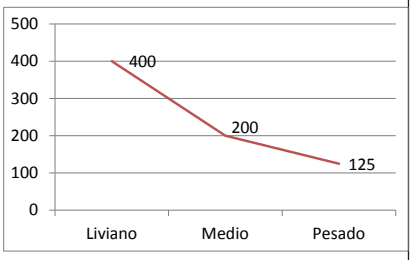
con la textura del suelo (Tabla 10):

Tabla 10. Profundidad de mojado y lámina a aplicar en suelos diferentes

Tipo de Suelo (Textura)	Liviano (AF)	Medio (FL)	Pesado (FYL)
CC (% vol)	18	25	30
PMP (% vol)	11.75	12.5	10
HA (% vol)	6.25	12.5	20
(A) Se quiere mojar 50 cm de profundidad, cual la lámina a aplicar?			
Lam. a aplicar (mm)	?	?	?
(B) Lámina aplicada 25 mm, cual la profundidad de mojado?			
Prof. de mojado (mm)	?	?	?

Como los datos de humedad del suelo ya están expresados en humedad volumétrica, entonces ya no se consideran Da y Dw, por tanto, las fórmulas se simplifican (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados del cálculo de láminas requeridas y profundidad de mojado para distintos suelos

Fórmula utilizada	Resultados obtenidos	Interpretación
(A) $Lam = \left(\frac{HA}{100}\right) * p$		Humedeciendo la misma profundidad de suelo en los tres tipos de suelo, hasta llegar al nivel de CC, se observa que la lámina a aplicar a un suelo liviano es mucho menor que la requerida para un suelo medio y/o pesado, debido a su menor capacidad de retención de humedad.
Despejando de la fórmula, tendremos: (B) $p = \frac{Lam}{(HA/100)}$		Aplicando la misma lámina de agua a los tres tipos de suelo, hasta llegar al nivel de CC, se observa que la profundidad de mojado es mucho mayor en el suelo liviano, descendiendo en el medio y en el pesado, debido a su textura.

3.1.6. Humedad Fácilmente Aprovechable

A pesar de que teóricamente la humedad comprendida en este intervalo es aprovechable, en la realidad no es tan simple. La idea que más se acepta es que el agua está menos disponible conforme el contenido de agua disminuye y se acerca al nivel de Punto de Marchitez Permanente.

A medida que disminuye la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir de estrés (Allen et al, 2006).

De ahí surge el concepto de Humedad Fácilmente Aprovechable (HFA), que es ***la fracción de la HA que el cultivo puede extraer del suelo sin sufrir estrés.***

Donde:

$$HFA=p^{*}HA$$

p: fracción de agua disponible, varía con el cultivo

HA: Humedad aprovechable

HFA: Humedad Fácilmente Aprovechable

En la figura 27 se puede apreciar un ejemplo de cálculo de la humedad fácilmente aprovechable.

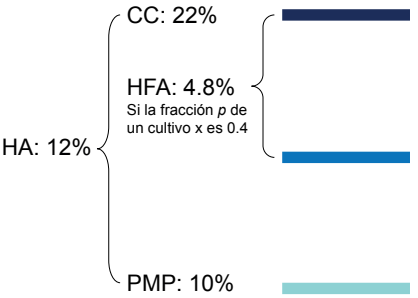


Figura 27. Ejemplo de cálculo de la HFA

3.2. Consumo de agua de las plantas

El agua cumple un rol vital en las plantas, pues desempeña varias funciones vitales:

- Control de la temperatura (transpiración: 99% del agua consumida)
- Constitución de los órganos de la planta (1%)
- Producción de carbohidratos
- Soporte estructural de la planta
- Transporte de gases y minerales (del suelo)

Es por ello, determinar la necesidad de agua de un cultivo es crucial, ya que cumplir o no con este requerimiento repercutirá directamente en la producción y productividad del cultivo.

Ahora bien, determinar la necesidad de agua de los cultivos pasa por conocer los mecanismos básicos de la relación agua-suelo-planta-atmósfera, que explican el movimiento del agua desde el suelo, hacia la planta y de ésta a la atmósfera, concentrándose sobre todo en la relación PLANTA-ATMOSFERA (Figura 28).

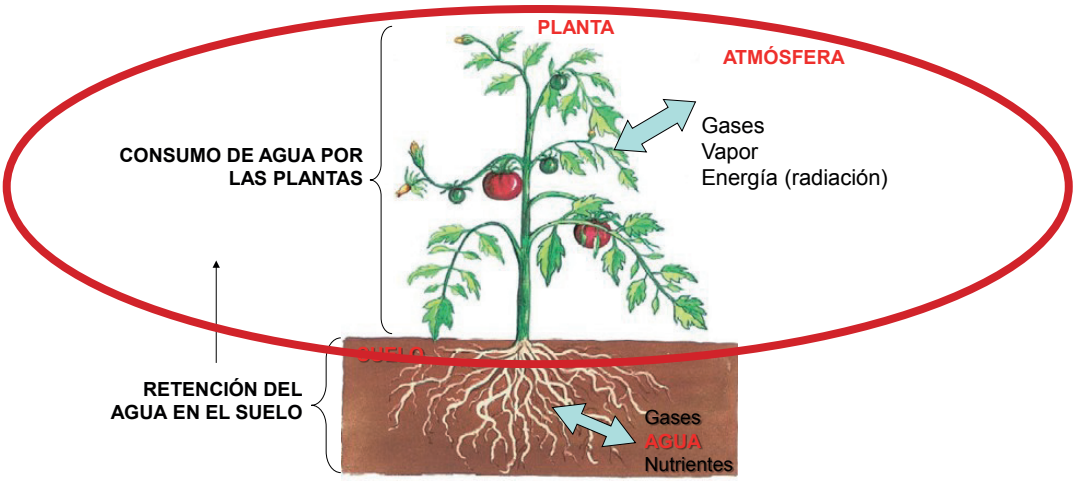


Figura 28. Esquema de las relaciones agua-suelo-planta-atmósfera: Agua-Planta-Atmósfera

Alrededor del 99% de toda el agua que entra en las raíces deja la planta a través de las hojas (estomas), sin tomar parte en el metabolismo. La pérdida de agua de las hojas debe ser compensada por la absorción de agua del suelo. El movimiento del agua es debido a las diferencias en el potencial entre el suelo, la raíz, el tallo, la hoja y la atmósfera. En condiciones normales, el potencial de agua en el suelo es superior a la de los jugos de raíces o fluidos. El suelo húmedo típico podría tener un potencial de agua de aproximadamente 0,3 a 1,0 bar, el tejido de la raíz alrededor de 4,0 bares, en el tallo de 7,0 bares, en la hoja 10,0 a 12,0 bares, y el ambiente típico seco de la atmósfera es aproximadamente de 400 a 600 bares. Estas diferencias en el potencial de agua (y por lo tanto el potencial de gradiente) son la fuerza impulsora que causa el movimiento del agua (Ali, 2010).

De acuerdo a Southorn (1997), la radiación solar proporciona la energía para vaporizar la superficie del agua del suelo directamente (evaporación, E), y el agua contenida en el follaje de las plantas (transpiración, T). El agua transpirada por las hojas es sustituida por el agua del suelo extraída por las raíces. Los efectos combinados de la evaporación y la transpiración se conocen como evapotranspiración (ET). La tasa de ET determina la rapidez con que se consume el agua del suelo y como el agua consumida (ET) es sustituida por el agua de riego (o lluvia). Por lo tanto, desempeña un papel importante en el diseño y gestión del riego, ya que determina el intervalo entre riegos.

En suma, el requerimiento de agua de un cultivo se define como la cantidad de agua requerida para compensar las pérdidas por evapotranspiración de una superficie cubierta del cultivo.

3.2.1. Necesidad o requerimiento de agua de un cultivo (ET_c)

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. A parte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo que es absorbida por este. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando éste cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Allen et al, 2006).

Como bien se sabe, el cálculo de la demanda de agua de los cultivos pasa por determinar la evapotranspiración del cultivo, ya que alrededor de 99% del agua que ingresa a la planta es transpirada por el cultivo y/o evaporada por el suelo, mismo que es remplazado por el agua de lluvia o de riego.

Debido a que el cálculo de la evapotranspiración del cultivo en forma directa es complejo (lisímetros, balance de agua en el suelo, balance de agua y de energía), se ha desarrollado un concepto que relaciona el consumo de agua de un cultivo en particular con la tasa de evapotranspiración de un cultivo de referencia, ajustada por un coeficiente del mismo cultivo en cuestión. Expresado esto en forma de ecuación se tiene:

Donde:

$$ET_c = k_c * ET_o$$

ET_c: Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

k_c: Coeficiente de cultivo

ET_o: Evapotranspiración de un cultivo de referencia (mm/día)

En esa ecuación, la evapotranspiración del cultivo de referencia fue calculada a partir de un "cultivo de referencia" (pasto ray-grass) con ciertas características de altura y una dotación irrestricta de agua. De esta forma se consigue que la superficie de evapotranspiración responda sin restricciones

ante las condiciones atmosféricas. Este concepto permitió a muchos investigadores, ya en el siglo pasado, calibrar fórmulas empíricas basadas únicamente en datos climáticos para representar la evapotraspiración del cultivo de referencia (Eto). Las fórmulas más utilizadas en nuestro medio fueron las de Blaney Criddle, Hargreaves, Thornwaite y con ciertas restricciones la ecuación de Penman o posteriormente la de Penman Monteith.

Ante la gran variabilidad encontrada en los distintos métodos empíricos para la determinación de la Eto, la FAO, a finales de los años 90', encaró un proceso de evaluación y actualización de estos métodos, llegándose a re-conceptualizar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia y por ende del requerimiento de agua de los cultivos. Bajo las últimas recomendaciones del estudio mencionado, se adoptan en este texto, las siguientes definiciones:

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración del cultivo de referencia (figura 28) se re-conceptualiza como "evapotranspiración de referencia" (Eto), tal como plantean Allen et al., (1998 y 2006). Esta representa un parámetro climático que mide la "demanda evaporativa de la atmósfera". Representa a su vez la evapotranspiración de un cultivo hipotético de pasto con características específicas (Allen et al., 2006) y que ocurre sin restricciones de agua. Este, corresponde por lo tanto a un factor independiente del tipo y del desarrollo del cultivo, o de las prácticas de manejo. Debido a que hay una "suficiente" disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre la ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. También se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a una ET bajo la misma superficie de referencia.

Los mismos autores afirman que los únicos factores que afectan la ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, la ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos (Figura 21). La ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo.

Desde este punto de vista, el **método FAO Penman-Monteith** se recomienda como el mejor (sino único) método de determinación de ET_o con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ET_o de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros energéticos y aerodinámicos presentes en el proceso de evapotranspiración.

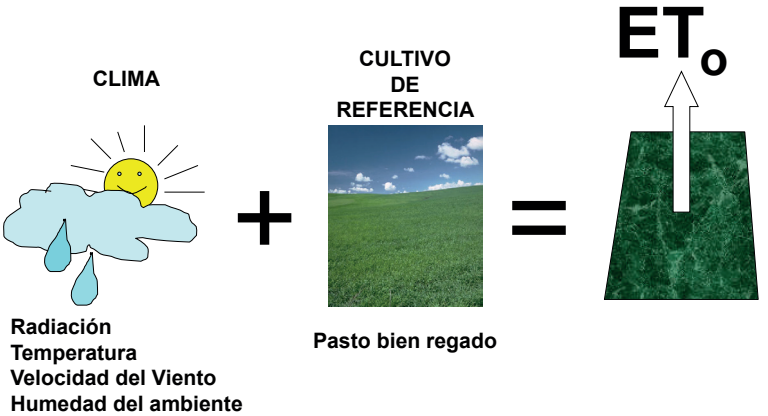


Figura 28. Evapotranspiración del cultivo de referencia (Allen et al., 2006)

La fórmula general desarrollada del Método FAO Penman Monteith es la siguiente:

$$ETo = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

Et= *Evapotranspiración de referencia (mm/día)*

R_n= *Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m2/dia)*

G= *Densidad de flujo de calor del suelo (MJ/m2/dia)*

T= *Temperatura del aire a 2 m de altura (°C)*

U_2= *Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)*

e_s= *Presión de vapor saturada (kPa)*

e_a= *Presión de vapor actual (kPa)*

$e_s - e_a$= *Déficit de la presión de vapor saturada (kPa)*

Δ= *Bajada de la curva de presión de vapor (kPa/°C)*

γ= *Constante psicrometrica (kPa/°C)*

Para determinar la ET_o por el Método Penman Monteith, se requiere datos completos de:

- Temperaturas máximas y mínimas mensuales
- Horas sol (mensual)
- Humedad relativa (mensual)
- Velocidad del viento

En caso de no contar con todos los parámetros climáticos necesarios para calcular la Eto a través de Penman Monteith, la FAO (2006) ha ajustado una metodología para la estimación de los parámetros climáticos faltantes. Por lo tanto, la ecuación de Penman Monteith permite calcular Eto incluso solo disponiendo datos de temperaturas máxima y mínima, logrando resultados adecuados.

Por la complejidad del cálculo, varios autores han desarrollado herramientas computacionales para facilitar el cálculo (CROPWAT, ET_o PRONAR y otros). De todas maneras, en Allen et al. (2006), se explica en detalle el cálculo de la ET_o, utilizando un procedimiento manual. Cabe aclarar que sobre este referente bibliográfico se basan las herramientas computacionales antes mencionadas.

A manera de ejemplo, en base a los datos climáticos de la estación meteorológica de San Benito (Punata, Cochabamba), se ha realizado la determinación de la ET_o mensual, utilizando la planilla ET_o PROAGRO desarrollada en Excel (Método Penman Monteith) (Figura 29).

PLANILLA DE CALCULO DE LA ETo CUANDO SE CUENTA SOLO CON TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

MES	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura Min.(grados centigrados)	9,800	9,000	8,400	5,600	1,300	-1,200	-0,800	1,600	4,600	7,100	8,500	9,800
Temperatura Max. (grados centigrados	23,400	22,300	23,900	24,600	25,000	23,600	23,800	24,300	23,900	25,400	25,300	24,700
Temperatura Media (grados centigrado	16,600	15,650	16,150	15,100	13,150	11,200	11,500	12,950	14,250	16,250	16,900	17,250
Abs. Temp.	289,600	288,650	289,150	288,100	286,150	284,200	284,500	285,950	287,250	289,250	289,900	290,250
Boltzmann Constant	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Humedad Relativa (tanto por 1)	0,660	0,688	0,678	0,631	0,583	0,575	0,583	0,611	0,557	0,567	0,553	0,612
es (Tmin) (Presión de sat. Máxima)	1,213	1,149	1,103	0,910	0,671	0,559	0,576	0,686	0,849	1,009	1,111	1,213
es (Tmax)(Presión de sat. Mínima)	2,883	2,697	2,971	3,099	3,174	2,918	2,954	3,044	2,971	3,250	3,231	3,117
es media	2,048	1,923	2,037	2,004	1,922	1,739	1,765	1,865	1,910	2,130	2,171	2,165
ea (RH * es media)	1,352	1,323	1,381	1,265	1,121	1,000	1,029	1,139	1,064	1,208	1,200	1,325
Radiación Extraterrestre (de Tabla 1)	41,406	39,976	37,047	32,265	27,736	25,359	26,236	29,989	34,818	38,700	40,829	41,582
Clear Sky solar	33,125	31,981	29,638	25,812	22,189	20,287	20,989	23,991	27,854	30,960	32,663	33,266
Velocidad del viento(m/s)	2,000	2,111	2,000	2,000	2,111	2,111	2,222	3,083	4,000	3,583	2,972	2,222
Radiación Global calculada	24,431	23,327	23,337	22,502	21,604	20,206	20,820	22,861	24,474	26,488	26,776	25,681
Boltz*T^4	34,601	34,145	34,421	33,998	33,211	32,351	32,481	33,091	33,607	34,527	34,805	34,935
0.34-0.14raiz(ea)	0,177	0,179	0,175	0,183	0,192	0,200	0,198	0,191	0,196	0,186	0,187	0,179
1.35*Rs/Rso-0.35	0,646	0,635	0,713	0,827	0,964	0,995	0,989	0,936	0,836	0,805	0,757	0,692
0.77*Rs	18,812	17,961	17,969	17,327	16,635	15,559	16,031	17,603	18,845	20,396	20,618	19,775
Rn	14,852	14,083	13,663	12,195	10,492	9,123	9,670	11,698	13,348	15,222	15,703	15,450
G	-0,112	-0,032	-0,038	-0,210	-0,273	-0,116	0,123	0,193	0,231	0,186	0,070	-0,021
Rn-G	14,964	14,115	13,702	12,405	10,765	9,239	9,548	11,505	13,117	15,037	15,633	15,471
Delta	0,120	0,114	0,117	0,110	0,099	0,088	0,090	0,098	0,105	0,118	0,122	0,125
Gamma (De Tabla 3)	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
Termino Radiativo Delta	0,593	0,575	0,587	0,573	0,540	0,512	0,511	0,493	0,476	0,520	0,553	0,591
Termino Radiativo Gamma	0,242	0,247	0,246	0,254	0,268	0,284	0,279	0,247	0,222	0,216	0,222	0,233
900/Tabs.	3,108	3,118	3,113	3,124	3,145	3,167	3,163	3,147	3,133	3,111	3,105	3,101
es-ea	0,696	0,600	0,656	0,740	0,802	0,739	0,736	0,725	0,846	0,922	0,970	0,840
ETo	**4,670**	**4,288**	**4,286**	**4,074**	**3,797**	**3,333**	**3,431**	**4,057**	**4,902**	**5,415**	**5,519**	**5,080**

Figura 29. Evapotranspiración de referencia calculada con datos de la E.M. San Benito

Coeficiente del cultivo (k_c)

El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo, también afectarán al valor del coeficiente k_c. Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de k_c (Allen, et al., 2006).

La referencia reconocida a nivel general es Allen et al. (2006), que es la publicación oficial de la FAO (FAO 56: Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos). Esta publicación presenta tablas de referencia de coeficientes de cultivo recogidos de todo el mundo, por tanto, pueden ser utilizados para el cálculo de la ET_c, con algunas consideraciones particulares en cada localidad. Si cuentan con determinaciones directas localmente, entonces es recomendable utilizar estas referencias.

Como ejemplo, se presenta un fragmento de la Tabla 12 presentado en la publicación antes mencionada (Figura 30).

CUADRO 12

Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo, K_c y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ($HR_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ m s^{-1}) para usar en la formula de la FAO Penman-Monteith ET_o.

CUADRO 12 (continuación)

Cultivo	$K_{c\ ini}$[1]	$K_{c\ med}$	$K_{c\ fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
n. Árboles Frutales				
Almendras, sin cobertura del suelo	0,40	0,90	0,65[18]	5
Manzanas, Cerezas, Peras[19]				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,95	0,70[18]	4
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,60	0,95	0,75[18]	4
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,20	0,95[18]	4
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,20	0,85[18]	4
Albaricoque, Melocotón o Durazno, Drupas[19, 20]				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,90	0,65[18]	3
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,55	0,90	0,65[18]	3
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,15	0,90[18]	3
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,15	0,85[18]	3
Aguacate, sin cobertura del suelo	0,60	0,85	0,75	3
Cítricos, sin cobertura del suelo[21]				
– 70% cubierta vegetativa	0,70	0,65	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65	3
– 20% cubierta vegetativa	0,50	0,45	0,55	2
Cítricos, con cobertura activa del suelo o malezas[22]				
– 70% cubierta vegetativa	0,75	0,70	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,80	0,80	0,80	3
– 20% cubierta vegetativa	0,85	0,85	0,85	2
Coníferas[23]	1,00	1,00	1,00	10

[18] Estos valores de $K_{c\ fin}$ son representativos del K_c antes de la caída de las hojas. Después de la caída de las hojas, $K_{c\ fin} \approx 0{,}20$ para suelo descubierto y seco, o para cobertura muerta del suelo y $K_{c\ fin} \approx 0{,}50$ a 0,80 para cobertura activa y en desarrollo (consultar el Capítulo 11).

Figura 30. Fragmento de la Tabla 12 sobre coeficientes de cultivo (Allen et al., 20016; FAO 56)

La tabla inextensa se puede consultar en Allen et al. (2006): http://www.fao.org/publications/search/es/?sel=e3F9ZXZhcG90cmFuc3BpcmFjacOzbg%3D%3D.

Evapotranspiración de Cultivo (ET_c)

En el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) bajo condiciones estándar (condiciones óptimas o irrestrictas en dotación de agua y en condiciones de manejo del cultivo), se considera que no existen limitaciones en el desarrollo del cultivo debido a estrés hídrico o salinidad, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. La ET_o es calculada por el método FAO Penman Monteith y el coeficiente de cultivo (k_c) es escogido de la Tabla 12 (FAO 56).

La fórmula genérica es: $ET_c = k_c * ET_o$.

Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo incorporan las características del cultivo y los efectos promedio de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedio del cultivo son apropiados (Allen et al., 2006).

Para fines de elaboración de proyectos de riego, en Bolivia se ha simplificado el cálculo de la ET_c (necesidad o requerimiento de agua de los cultivos), así como de los requerimientos de riego, trabajando en base mensual todas las variables que participan del cálculo:

- Evapotranspiración de referencia (ET_o)
- Coeficiente de cultivo (k_c)
- Precipitación pluvial (total y efectiva)
- Fases del cultivo

El ex Programa Nacional de Riego (PRONAR), hizo un esfuerzo para poner los coeficientes de cultivo en base mensual, ajustándolos a la duración del ciclo de los cultivos con mayor presencia por cada piso ecológico donde se practica riego en Bolivia: Altiplano, Valles mesotérmicos-Chaco y Valles (APAPROAGRO/GIZ (2011)*: "Cálculo de Área Bajo Riego Optimo"*).

A manera de ejemplo en la Tabla 12 se presentan los valores calculados de ET_c para el duraznero, calculados en base mensual para todo el año, tomando los datos en el cálculo los valores de ET_o reportados anteriormente (figura 22), utilizando la fórmula genérica $ET_c = k_c * ET_o$:

Tabla 12. Cálculo de ET_c del duraznero

Mes	**E**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
Et_o (mm/día)	4,67	4,29	4,29	4,07	3,80	3,33	3,43	4,06	4,90	5,42	5,52	5,08
k_c*	0,90	0,90	0,90	0,65	0,20	0,20	0,20	0,55	0,55	0,55	0,55	0,90
ET_c (mm/día)	**4,20**	**3,86**	**3,86**	**2,65**	**0,76**	**0,67**	**0,69**	**2,23**	**2,70**	**2,98**	**3,04**	**4,57**
Ejemplo de cálculo para el mes de Enero:												

En caso de que se quiera precisar en el cálculo del requerimiento o necesidad de riego de un cultivo, tomando en cuenta la duración precisa de las fases de un cultivo, entonces se debe proceder con mayor cuidado y considerando algunas recomendaciones prácticas.

3.2.2. Cálculo del requerimiento de agua de los cultivos considerando las fases o estadios de desarrollo de los cultivos

En la Tabla 11 de la publicación oficial de la FAO (*FAO 56: Allen et. al. 2006, Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*), se puede encontrar la duración de las diferentes fases de los cultivos. Así, por ejemplo, a continuación, se muestra un fragmento de esta tabla identificándose como ejemplo al cultivo de yuca, enmarcado con rojo (figura 31).

CUADRO 11 (continuación)

Cultivo	Inic. (L_{ini})	Des. (L_{des})	Med, (L_{med})	Final (L_{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
Melón Dulce	25	35	40	20	120	Mayo	Mediterráneo
	30	30	50	30	140	Marzo	Calif., EU
	15	40	65	15	135	Ago	Calif. Desierto, EU
	30	45	65	20	160	Dic/Ene.	Región Árida
Sandía	20	30	30	30	110	Abril	Italia
	10	20	20	30	80	May/Ago.	Cercano Este (desierto)
d. Raíces y Tubérculos							
Remolacha, mesa	15	25	20	10	70	Abr/Mayo	Mediterráneo
	25	30	25	10	90	Feb/Mar.	Mediterráneo & Árido
Mandioca o Yuca:							
año 1	20	40	90	60	210	Período	Regiones Tropicales
año 2	150	40	110	60	360	Lluvioso	
Patata o Papa	25	30	30/45	30	115/130	Ene/Nov.	Clima (Semi)Árido
	25	30	45	30	130	Mayo	Clima continental
	30	35	50	30	145	Abril	Europa
	45	30	70	20	165	Abr/Mayo	Idaho, EU
	30	35	50	25	140	Dic.	Calif. Desierto, EU
Camote o Batata	20	30	60	40	150	Abril	Mediterráneo
	15	30	50	30	125	Período Lluvioso	Regiones Tropicales

Figura 31. Fragmento de la tabla 11 de la publicación FAO 56

Para realizar ajustes locales, se recomienda tomar en cuenta algunos criterios importantes que se presentan en la tabla 13, que nos permitirá determinar localmente la duración de las fases del ciclo del cultivo en cuestión.

Tabla 13. Identificación de las fases de crecimiento (Duración total y de las fases de desarrollo)

Fase inicial	Plantación o siembra	10 % de cobertura
Fase de crecimiento	10 % de cobertura	Cobertura total efectiva, inicio de la floración
Fase media	Cobertura total efectiva	Inicio de la madurez
Fase final	Inicio de la madurez	Cosecha

Asimismo, en la misma publicación, en la tabla 12, se encuentran establecidos los valores de k_c para distintos grupos de cultivos de todo el mundo, denominados: k_c inicial (k_{cini}), k_c medio (k_{cmed}) y k_c final (k_{cfin}), en base a los cuales se debe determinar los k_cs para las distintas fases del cultivo mediante interpolación o método gráfico. En la figura 32 se puede apreciar que parte del ciclo vegetativo del cultivo representa los valores de k_c consignados en la Tabla 12 de la publicación de la FAO 56, a partir del cual se puede fácilmente desprender los valores de k_c para las demás fases del cultivo.

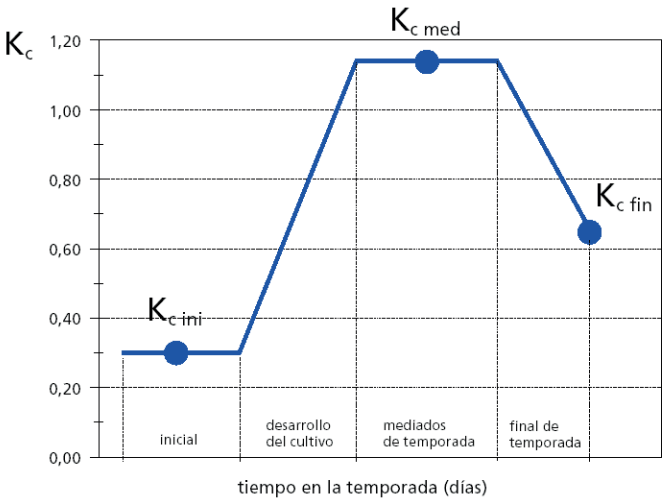


Figura 32. Representación gráfica de los coeficientes de cultivo (k_c)

3.2.3. Cálculo del Requerimiento de riego de los cultivos

Determinar los requerimientos de riego de los cultivos considera la precipitación pluvial o lluvia efectiva (P_{ef}), es decir, la lluvia que efectivamente es aprovechada por las plantas (fracción de la precipitación total). Si la lluvia efectiva es igual o mayor a la evapotranspiración del cultivo, entonces el requerimiento de riego es cero, pero si es menor, entonces es la diferencia.

Para fines de diseño y planificación del riego, la siguiente fórmula se aplica para determinar las necesidades o requerimientos de riego de los cultivos:

NR= ET_c_c-P_ef

O, expresado de manera más detallada sería:

NR=k_c_cET_o_o-P_ef*

Donde:

NR: Requerimiento de riego (mm)

ET_c: Evapotranspiración de cultivo (mm)

ET_o: Evapotranspiración de referencia (mm)

k_c: Coeficiente del cultivo

Pef: Precipitación efectiva (mm)

Precipitación efectiva

Es la porción de la lluvia total, estacional o anual, que es útil, directa o indirectamente, para la producción del cultivo en el sitio donde cae, pero sin bombeo". (Dastane, 1978). Esto quiere decir que no toda la lluvia está disponible para los cultivos sino parte de ella se pierde por escorrentía o por percolación profunda. Existen varias maneras de determinar la precipitación efectiva, desde métodos directos (Cambios en la humedad del suelo, método del balance de la humedad del suelo diario, medidor de integración, método Ramdas, Lisímetros, técnica del tambor para arroz) hasta fórmulas empíricas (Ecuación Renfro, Método USBR, Método de la Evapotranspiración potencial/Relación de precipitación, Método USDA-UCS, relaciones empíricas)

El Programa Nacional de Riego (2002), en función a las características agroecológicas de las regiones de altiplano, valles-valles mesotérmicos y chaco; considera que no son efectivas las precipitaciones menores a 12, 15 y 20 mm, respectivamente. Las lluvias mensuales, resultantes de la diferencia, son efectivas al 70, 75 y 80%. En este documento, adoptaremos las siguientes expresiones para el cálculo de la precipitación efectiva, sugeridas por el (ex) PRONAR, aunque el lector es libre de elegir la forma más conveniente para determinarla, pero sin olvidar referenciarla correctamente:

- Altiplano: $Pef=(P-12)*0,70$
- Valles: $Pef=(P-15)*0,75$
- Chaco: $Pef=(P-20)*0,80$

Donde:

Pef: Precipitación efectiva (mm/mes)

P: Precipitación pluvial mensual (mm/mes)

Ejemplo de cálculo

Calcular los requerimientos de riego para el cultivo de Yuca en el Valle del Sacta (Carrasco, Cochabamba), considerando que la fecha de siembra sería el 1° de agosto. Tomar en cuenta la duración de las diferentes fases del cultivo de yuca consignados en la Tabla 11 de la FAO 56 (figura 24). Los datos de la estación meteorológica del Valle del Sacta se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos meteorológicos de la Estación del Valle del Sacta (Carrasco, Cochabamba)

Latitud Sud:	17° 3'											
Altitud:	230 msnm.											
DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Precipitación (mm/mes)	302	183	441	177	197	104	156	0	61	121	255	313
Tmin (°C)	22,9	26,8	21,6	20,4	19,6	19,9	15,7	16,1	18,6	20,8	21,1	22,1
Tmax (°C)	32,6	32,5	33,2	32,3	29,9	30,4	28,3	29,2	31,1	33,8	33,6	32,1

De la determinación de los valores de ET_o con los datos de la estación meteorológica del trópico Cochabambino (Valle del Sacta, Carrasco, Cochabamba), se obtuvo los siguientes valores, utilizando con la planilla ETO-PRONAR (Figura 33).

PLANILLA DE CALCULO DE LA ETo CUANDO SOLO SE CUENTA CON TEMPERATURA MAXIMA Y MINIMA												
MES	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura Min (°C)	22,900	26,800	21,600	20,400	19,600	19,900	15,700	16,100	18,600	20,800	21,100	22,100
Temperatura Max (°C)	32,600	32,500	33,200	32,300	29,900	30,400	28,300	29,200	31,100	33,800	33,600	32,100
Temperatura Media (grados centigrad	27,750	29,650	27,400	26,350	24,750	25,150	22,000	22,650	24,850	27,300	27,350	27,100
Abs. Temp.	300,750	302,650	300,400	299,350	297,750	298,150	295,000	295,650	297,850	300,300	300,350	300,100
Boltzmann Constant	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
es (Tmin) (Presión de sat. Máxima)	2,797	3,531	2,584	2,401	2,285	2,327	1,786	1,832	2,146	2,461	2,506	2,665
es (Tmax)(Presión de sat. Mínima)	4,930	4,902	5,099	4,847	4,228	4,351	3,854	4,061	4,528	5,273	5,214	4,793
es media	3,864	4,216	3,842	3,624	3,256	3,339	2,820	2,947	3,337	3,867	3,860	3,729
ea (De la Temp, mínima)	2,792	3,524	2,580	2,397	2,281	2,324	1,784	1,830	2,143	2,457	2,502	2,660
Radiación Extraterrestre (de Tabla 1)	41,376	39,969	37,062	32,310	27,810	25,441	26,310	30,048	34,855	38,700	40,807	41,545
Clear Sky solar	33,101	31,975	29,650	25,848	22,248	20,353	21,048	24,038	27,884	30,960	32,646	33,236
Velocidad del viento(m/s)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Radiación Global calculada	20,618	15,268	20,197	17,833	14,280	13,190	14,943	17,401	19,717	22,326	23,084	21,020
Boltz*T^4	40,176	41,158	40,016	39,465	38,605	38,816	37,234	37,571	38,690	39,985	40,004	39,834
0.34-0.14raiz(ea)	0,106	0,077	0,115	0,123	0,129	0,127	0,153	0,151	0,135	0,121	0,119	0,112
1.35*Rs/Rso-0.35	0,491	0,295	0,570	0,581	0,517	0,525	0,608	0,627	0,605	0,623	0,605	0,504
0.77*Rs	15,876	11,756	15,551	13,732	10,996	10,156	11,506	13,399	15,182	17,191	17,775	16,186
Rn	13,785	10,820	12,927	10,903	8,432	7,577	8,039	9,849	12,023	14,185	14,908	13,945
G	0,179	-0,024	-0,231	-0,186	-0,084	-0,193	-0,175	0,200	0,326	0,175	-0,014	0,028
Rn-G	13,606	10,845	13,158	11,089	8,516	7,770	8,214	9,650	11,698	14,010	14,922	13,917
Delta	0,217	0,239	0,213	0,202	0,186	0,190	0,161	0,167	0,187	0,212	0,213	0,210
Gamma (De Tabla 3)	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657	0,0657
Termino Radiativo Delta	0,663	0,684	0,659	0,647	0,628	0,633	0,593	0,602	0,629	0,658	0,659	0,656
Termino Radiativo Gamma	0,200	0,188	0,203	0,210	0,221	0,219	0,242	0,237	0,221	0,204	0,203	0,205
900/Tabs.	2,993	2,974	2,996	3,007	3,023	3,019	3,051	3,044	3,022	2,997	2,997	2,999
es-ea	1,071	0,693	1,262	1,227	0,975	1,015	1,037	1,117	1,194	1,410	1,358	1,069
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ETo (mm/día)	**4,967**	**3,802**	**5,072**	**4,478**	**3,488**	**3,346**	**3,519**	**3,981**	**4,596**	**5,482**	**5,663**	**5,037**

Figura 33. Evapotranspiración de referencia calculada con datos de la E.M. Valle del Sacta

Ahora bien, para el cálculo de los k_cs del cultivo de yuca, ~~se consideran~~ los valores consignados en la Tabla 12 de la publicación FAO 56: Allen et al. (2006), figura 34:

d. Raíces y Tubérculos	**0,5**	**1,10**	**0,95**	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80[3]	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4

CUADRO 12

Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo, K_c y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ($HR_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2$ m s^{-1}) para usar en la formula de la FAO Penman-Monteith ET_o.

Cultivo	$K_{c\ ini}$[1]	$K_{c\ med}$	$K_{c\ fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)

Figura 34. Extracto de la Tabla 12 sobre coeficientes de cultivo (Allen et al., 20016; FAO 56)

Algunas consideraciones para determinar los k_cs para las distintas fases

En la figura 35 se puede apreciar los valores de k_cs extraídos de la Tabla 12 de la FAO 56. Ahora bien, para calcular el requerimiento de agua de los cultivos por cada fase, es necesario determinar el valor de k_c que representa a cada fase, a partir de la información representada en esta figura:

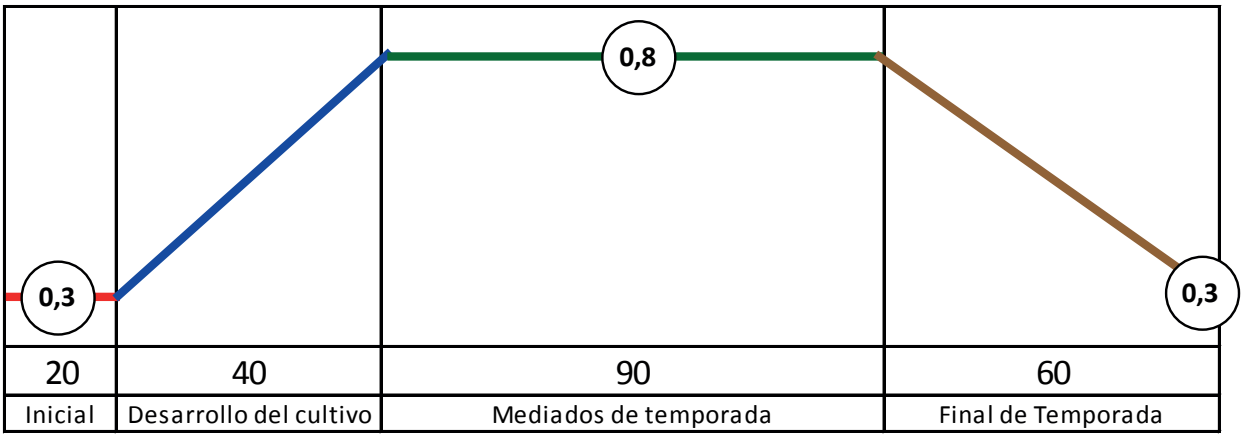


Figura 35. Representación gráfica de los datos de k_c y fases de desarrollo de la yuca

Las consideraciones específicas para cada fase son las siguientes:

- Para la fase inicial, el valor que representa todo el periodo es el mismo valor de la Tabla 12 de la FAO (Figura 27), es decir 0,30.
- Para la fase de desarrollo del cultivo se debe realizar un cálculo, ya que, al estar el cultivo en desarrollo, el k_c varía a lo largo del ciclo progresivamente. Sin embargo, para calcular el requerimiento de todo el periodo se debe determinar un valor de k_c promedio para todo el periodo:

$$k_c \text{ para la fase de Desarrollo del cultivo} = \frac{((0{,}30+0{,}80))}{2} = 0{,}55$$

- Para la fase media (Mediados de temporada), el valor de kc a utilizar es el mismo de la Tabla 12 de la FAO 56 (figura 27), es decir: 0,80.
- Finalmente, para la fase final de temporada se debe realizar un cálculo, ya que el cultivo ingresa en un periodo decreciente, por tanto, el kc también disminuye hasta la cosecha (final). Por lo mismo, para calcular el requerimiento de esta última fase, se debe determinar un valor de k_c promedio:

$$k_c \text{ para la fase de Final de temporada} = \frac{((0{,}30+0{,}80))}{2} = 0{,}55$$

Consideración para calcular la ET_c por fases

Generalmente, el cálculo de los requerimientos se los debe expresar en base mensual, ya que los demás datos referidos normalmente se los expresa también en base mensual, por ejemplo, la precipitación pluvial, datos hidrométricos e hidrológicos. Esto permite realizar un balance hídrico mensual. Sin embargo, las fases del ciclo de los cultivos no coinciden normalmente con los meses, entonces hay que realizar algunas consideraciones para el cálculo y llevarlo a base mensual:

Vamos a tomar como ejemplo el mes de agosto, ya que la fecha de siembra convenida es el 1° de agosto. Si nos fijamos la Tabla 11de la FAO (Figura 24), la fase inicial dura 20 días, pero el mes de agosto tiene 31 días, por tanto, en agosto se considera una parte de la fase de desarrollo del cultivo, por consiguiente, el cálculo de requerimiento para este mes se debe realizarlo de la siguiente manera:

ET_c (Agosto)=A+B

"A=" ET_o (Agosto)*$k_{c\text{-inicial}}$*días fase inicial

B"=" ET_o (Agosto)*k_c fase Desarrollo del cultivo*días restantes Agosto

"A=" 3,981 $\frac{mm}{día}$*0,30* 20días=23,9 mm

$B = 3{,}981 \frac{mm}{día} * 0{,}55 * (31-20) día = 24{,}1 mm$

ET_c "(Agosto)=23,9 mm+24,1 mm=48,0 mm"

Esta consideración deberá ser realizada para todos los meses.

Cálculo de la precipitación (lluvia) efectiva

Ahora bien, para realizar el cálculo de la precipitación o lluvia efectiva (P_{ef}), el primer paso es definir la forma de determinarlo. En nuestro caso, asumimos una de las fórmulas empíricas recomendadas en la publicación de *APAPROAGRO/GIZ (2011)* por pisos ecológicos para Bolivia:

$$P_{ef}=(P-20)*0{,}80$$

Reemplazando valores resulta:

$P_{ef}=(121mm-20)*0{,}80$

$P_{ef}=80{,}8$ mm

Cabe recalcar que la forma de determinar la precipitación efectiva puede ser definida por el interesado (a), ya que existen varias maneras.

Calculo de la Necesidad (o requerimiento) de Riego del cultivo

Una vez calculado la Evapotranspiración del cultivo de yuca en base mensual y también la precipitación efectiva, entonces, determinar la necesidad de riego del cultivo es sencilla. Se aplica la siguiente fórmula general:

$NR= ET_c - P_{ef}$

En este caso, se realiza el ejemplo para el mes de octubre:

NR=135,9mm-80,8mm=55,1mm

Como la demanda de agua del cultivo es mayor que la precipitación efectiva, entonces el valor representa una necesidad de riego para el cultivo de yuca en este mes. Si el valor es negativo, significará que no hay necesidad de riego, sino un exceso de agua.

En la Figura 36 se presenta el resultado de todos los cálculos de necesidad de riego del cultivo de yuca en el Valle del Sacta:

Día	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	30	31
Mes	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Eto (mm/día)	3,346	3,519	3,981	4,596	5,482	5,663	5,037	4,967	3,802	5,072	4,478	3,488
kc			0,3	0,55	0,55	0,8	0,8	0,8	0,55	0,55		
Fases			20	11	30	31	30	31	31	28		
ETc (mm)			23,9	24,1	75,8	135,9	135,9	124,9	84,7	58,5		
ETc (mm/mes)			48,0		75,8	135,9	135,9	124,9	84,7	58,5		
PP (mm/mes)	104	156	0		61	121	255	313	302	183	441	177	197
Pef (mm/mes)	67,2	108,8	0		32,8	80,8	188	234,4	225,6	130,4	336,8	125,6	141,6
NR	-67,2	-108,8	48,0		43,0	55,1	-52,1	-109,5	-140,9	-71,9	-336,8	-125,6	-141,6

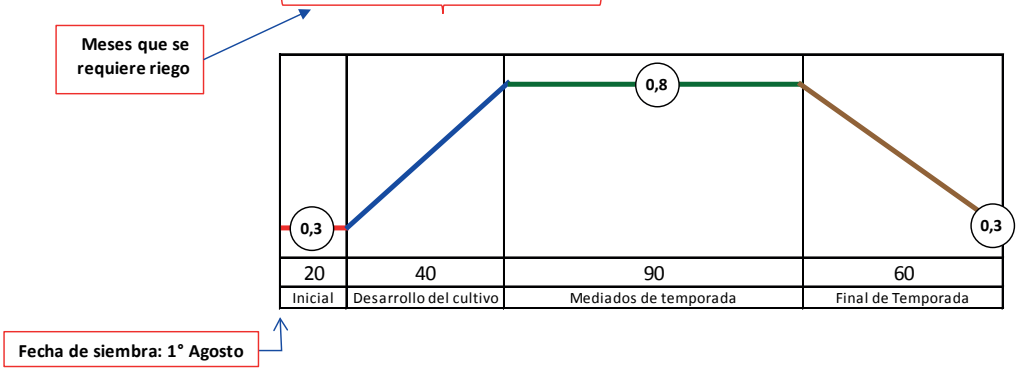


Figura 36. Resultados del cálculo del requerimiento de riego del cultivo de yuca

Por cuestiones prácticas, la duración de las fases obtenidas de la Tabla 11 de la FAO (Figura 31) para el cultivo de yuca, ha sido modificada ligeramente, para evitar cálculos muy refinados, variando en todo el ciclo del cultivo con dos días y en las fases con un día (+ o -).

4. BIBLIOGRAFÍA

ALI, M.H. 2010. Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management: Volume 1. Springer New York. 583

ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO: 56. Roma. 323 p.

AMURRIO, F. 1999. Principios básicos de la ingeniería de riego y drenaje, y su aplicación. Cátedra de Riegos y Drenajes – Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias – UMSS. Cochabamba, Bol.

APAPROAGRO/GIZ. 2011. Cálculo del Area Bajo Riego Optimo. Serie Técnica No. 9. Documento de trabajo. Agua para la Producción Agropecuaria del Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable de la Cooperación Técnica Alemana. Cochabamba. 29 p.

ARTIGAO, A. Y GUARDADO, R. 1993. El agua en el suelo. Santa Olalla, F. M. y Juan, J. A. 1993. Agronomía del riego.

CARRAZÓN, J. 2007. Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego Programa Especial para la Seguridad Alimentaria (PESA). SERIE: Tecnologías FAO. Roma, Italia. 218 p.

CASTRO, R.; ROCHA, R.; DELGADILLO, O. 2003. Manual para la medición de humedad en el suelo: Métodos directos e indirectos más empleados. Centro AGUA. Cochabamba. 101 p.

CHAMORRO, V.; INGARAMO, C.; MORO, O.; OLESZCZUK, E.; DRGANC, E.; ASSELBORN, J. s.f. El proceso de infiltración en parcelas agrícolas de la provincia del Chaco. Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos - Facultad de Ciencias Agrarias - UNNE. Corrientes, Arg. 4 p. (www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2001/5-Agrarias/A-069.pdf).

CORAS, P. 1995. Propiedades físicas del suelo relacionadas con el riego. Universidad Autónoma de Chapingo Departamento de Fitotecnia. México. 250p.

DASTANE, N.G. 1978. Effective Rainfall. Publication Series: FAO Irrigation and Drainage Paper 25. Rome. 62 p.

DEL CALLEJO VERACC, I.G. 1995. Riego parcelario y manejo de agua. Algunos criterios de Evaluación. (Versión preliminar). Cochabamba. PEIRAV. 17 p.

DELGADILLO, O.; DEL CALLEJO, I. 2003. Métodos y tipos de riego campesino como parte de la tecnología de riego parcelario.

FERNÁNDEZ, P.C.; LUQUE, J.A.; Paloni, J.D. 1971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseños de riego en el valle inferior del Río Colorado. Ministerio de Agricultura y Ganadería del Nación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Suelos – publicación Nª 130.

GAVANDE SA. 1 972. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa Wiley. p 199–232.

GANDARILLAS, C. 1993. Relación suelo Agua Planta Manual de programación de riego. Programa de capacitación: Mejoramiento de riego parcelario Paracaya (PRIV). 20 de junio al 3 de julio de 1993 Preparado para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.

GERBRANDY, G.; HOOGENDAM, P. 1998. Aguas y acequias. Los derechos al agua y la gestión campesina de riego en los Andes Bolivianos. PEIRAV-PLURAL. Cochabamba, Bol. 397 p.

GUROVICH, L.A. 1985. Fundamentos y díselo de sistemas de riego. Sn José Costa Rica. IICA. 433 p.

SANTA OLALLA MAÑAS, F y VALERO J. 1993. Agronomía del riego. Ed. Mundi prensa. Castilla, España. 732p.

SKAGGS, R.W. 1983. Soil Water. In: JENSEN, M.E. (Ed.). 1983. Design and operation of farm irrigation systems. ASAE. Michigan, USA. p.: 103-123.

SOUTHORN, N. 1997. Farm irrigation: Planning&Management. INKATA PRESS. Reed International Books. Australia. 165 p.

La presente edición se terminó
de imprimir el mes de xxxxxxv
en Talleres Gráficos “KIPUS”
C. Hamiraya 127• Telf./Fax.:(591-4) 4582716/ 4237448

PROYECTO CUENCA PEDAGÓGICA PUCARA

El Proyecto Cuenca Pedagógica Pucara (PCPP), es ejecutado por el Centro AGUA en el marco del Programa Intercultural de Cuencas Pedagógicas (PICP), el cual ha sido formulado en el marco de los objetivos y líneas de acción estratégica del Plan Nacional de Cuencas II, del Vice-Ministerio de Recursos Hídricos y Riego, y apoyado directamente por la Dirección General de Cuencas y Recursos Hídricos.

Las actividades y principales logros del proyecto son parte de las líneas de acción: (1) Desarrollo de capacidades y fortalecimiento organizacional, (2) Investigación Acción Participativa, (3) Diseño y Ejecución de Medidas Articuladas y Planes GIRH-MIC, (4) Cooperación y Fortalecimiento Interinstitucional y (5) Sistematización y difusión.

Entidad Facilitadora:

Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego

Programa Intercultural de Cuencas Pedagógicas

Universidad Mayor de San Simón

Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales

Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua