



PERÚ

Ministerio  
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

**INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA**  
**DIRECCIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO AGRARIO**  
**SUBDIRECCIÓN DE PRODUCTOS AGRARIOS**  
**ÁREA DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA AGRARIA**

## **Curso Virtual**

# **DISEÑO AGRONÓMICO E HIDRÁULICO EN EL SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO**



**MARZO 2020**



PERÚ

Ministerio  
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

## MÓDULO I

1. El agua, suelo, planta y medio ambiente.
  - 1.1 Futuro del agua en el mundo y en la región.
  - 1.2 Relación agua planta suelo y medio ambiente.
  - 1.3 Propiedades físicas y químicas de suelos y aguas de riego.
  - 1.4 Nuevas tecnologías en la determinación de los requerimientos hídricos de los cultivos.
  - 1.5 Parámetros utilizados en el sistema de riego tecnificado.

Ponente: Ing. César Raúl Bravo Verástegui  
Especialista en Riego Tecnificado



PERÚ

Ministerio  
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

## Diseño Agronómico e Hidráulico en el Sistema de Riego Tecnificado

### 1. El agua, suelo, planta y medio ambiente

#### Introducción

La escasez de agua, es un problema mundial que tiene consecuencias muy graves, tanto para el medio ambiente como para las personas; por lo que es menester cuidar y no malgastar este recurso tan necesario para la vida; tal es así, que las previsiones para el año 2025, señalan que más de un tercio de la población mundial, sufrirá de escases de agua.

En el país, el desequilibrio en la disponibilidad de agua es pronunciado; en la región de Selva la disponibilidad es alta y en la región de Costa es bastante limitada; siendo sumamente escasa, en las zonas áridas y semiáridas del país.

La agricultura es el mayor consumidor de agua, exigiéndonos por ello, a ser más eficientes en el uso de este recurso; por lo que es menester, utilizar las herramientas necesarias del avance tecnológico para afrontar esta problemática.

Los problemas de la deforestación vienen atentando contra la pérdida de los suelos por lavado de las lluvias; y por otra parte, el uso excesivo de agua aplicado a los cultivos, ocasionan la salinización de los suelos de las partes bajas, agudizando el deterioro y desertificación de los suelos.

#### Uso descontrolado del agua

El uso a gran escala de consumo en cultivos intensivos y consumo del sector industrial que compiten con la disponibilidad para otros cultivos de menor intensidad y el uso de consumo humano, atentando contra la salud poblacional, esta situación se presenta, si no es controlada y supervisada por la autoridad competente.

#### Medio ambiente y cambio climático

El calentamiento global progresivo de la temperatura de la tierra, es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera a la variabilidad natural del clima, tales



PERÚ

Ministerio  
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

como las lluvias, las heladas y todos los elementos del sistema atmosférico y sus patrones de comportamiento, que atentan contra la quiebra de la capa de ozono, debido a las emisiones de gas de efecto invernadero, ocasionando frecuentes ciclos de sequías, ocasionando problemas a la población humana.

Por lo tanto, es menester mantener un equilibrio armónico entre estos elementos, el agua, suelo, planta y medio ambiente.

## **El cambio climático**

Es la consecuencia del calentamiento progresivo de la temperatura media de la tierra, este cambio del clima es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima. Además del calentamiento global, el cambio climático implica cambios en otras variables como las lluvias globales, nubosidad y todos los demás elementos del sistema atmosférico y sus patrones de comportamiento, quiebra de la cobertura de la capa de ozono, debido a las emisiones de gas de efecto invernadero.

Los cambios climáticos que se vienen produciendo en las últimas décadas en el planeta, están ocasionando en forma frecuente ciclos de sequías, que provocan problemas a la población humana, que día a día demanda mayores cantidades de agua para uso doméstico, industrial, minera y la agricultura, esta última que presenta el mayor nivel de consumo.

Los problemas de deterioro del medio ambiente, por la polución, los deshielos de los polos y cordilleras, el efecto invernadero y aumentos en la temperatura de la atmósfera y del agua de mar, problemas de deforestación, salinización de los suelos, vienen agudizando el deterioro y desertificación de los suelos.

Existe la necesidad que la agricultura, utilice métodos de riego eficientes, mediante sistemas de riego por aspersión, goteo y micro aspersión, exudación, entre otros.

Los glaciares tropicales peruanos retrocedieron más del 22%; durante los últimos 25 años, se ha perdido un equivalente al agua que consume Lima, durante 10 años.



Figura 1. Yarupay Grande.



Figura 2. Marcapomacocha.



Figura 3. Cambio climático calentamiento global y *disponibilidad del recurso hídrico.*

Por otra parte, el agua para la agricultura, es cada vez más escaso y caro, pues se compite con la disponibilidad del agua para el consumo humano, el consumo industrial y el uso minero principalmente.

Se prevé que en un futuro cercano, este recurso será bastante escaso que nos obliga a hacer un uso eficiente del agua.

### 1.1 Futuro del agua en el mundo y en la región

Los próximos conflictos en el planeta, no van a ser por los hidrocarburos, el petróleo, el gas natural, sino por la disponibilidad de recursos hídricos, el que se viene agravando con los problemas del deterioro del medio ambiente, la polución, la pérdida de la masa crítica de los nevados de las cordilleras, los deshielos de los polos, el efecto invernadero, el aumento



PERÚ

Ministerio  
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

de la temperatura, deforestación de los bosques, desertificación y salinización de los suelos, con el consiguiente deterioro de las actuales áreas de cultivo.

Hace más de 27 años en la Cumbre de los países en Río de Janeiro, se alertó al mundo, de la importancia del agua en los programas de desarrollo mundial.

Los pronósticos para los próximos años, no son nada alentadores, considerando que para el año 2025; la tercera parte de la población mundial, sufrirá escasez de agua.

El Instituto Internacional de Administración del agua (IWMI) con sede en Sri Lanka, calcula que 2700 millones de personas o sea un tercio de la población proyectada para el 2025, vivirán en zonas con grave escasez de agua.

En el presente Siglo XXI, grandes regiones del planeta padecerán de escasez extrema de agua.

Al año 2025, más de 30 países (800 millones de personas) tendrán una disponibilidad de agua, menores a 1000 m<sup>3</sup>/habitante/año para todo uso.

Ciudades de países de África, como Ghana, Mozambique, Zimbabue y Costa de Marfil, actualmente llevan meses padeciendo escasez de agua, las causas se encuentran en las sequías y el rápido crecimiento de la población.

La edición de 2019 del Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, publicado el mes de marzo, señala que el uso del agua ha venido aumentando un 1% anual, en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, impulsado por el aumento de la población, desarrollo socioeconómico y cambio en los modelos de consumo.

Se prevé que esta tendencia prosiga hasta el año 2050, lo que representaría un incremento de hasta el 30% por encima del nivel actual de uso del agua, por lo que más de 2.000 millones de personas viven en países que sufren de estrés hídrico importante; y sus niveles seguirán aumentando a medida que crezca la demanda de agua y se intensifiquen los efectos del cambio climático.

### **La escasez de agua provoca discrepancias en el uso agrario**

Algunas teorías y comentarios vienen generando discrepancias y controversias a nivel mundial, a raíz del uso ineficiente del agua:

- Se sostiene que el agua utilizada en el riego deberá aumentar hasta un 20% en los próximos 25 años para mantener la necesaria producción alimentaria.
- Científicos especializados en temas ambientales, argumentan que el consumo de agua deberá reducirse en un 10% para proteger los ríos y lagos.
- El riego artificial en países en desarrollo, consume más del 80% del agua que se utiliza para diferentes fines (W. Cosgrove, Consejo Mundial del Agua, Francia).
- Para el Consejo Mundial del Agua, - Francia, la pregunta clave es: cómo usar el agua existente, para proporcionar seguridad alimentaria, seguridad ambiental y salud, a una creciente población mundial y con grandes consumos de agua.
- América Latina en general ha sido bien dotada con alrededor del 28% de los recursos hídricos renovables del mundo, para una población de alrededor del 6% de la población mundial; sin embargo, existen discrepancias que incluyen zonas áridas y semiáridas en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Perú representando un 23% de la superficie total, con serios problemas de disponibilidad de agua.

No obstante, hay razones para avizorar una crisis hídrica en la región, por diversos factores que apuntan en esa dirección.



*Figura 4.* Agua recolectada en Marcapomacocha para el consumo de la población de Lima y producción de energía eléctrica.

## Consideraciones importantes

- Se ha estimado que una disponibilidad per cápita de 1000 m<sup>3</sup>/habitante/año, correspondiente al umbral; por debajo del cual, se sufre de escasez crónica, a escala suficiente para impedir el desarrollo y afecta la salud humana (U.N. 1994).
- Otros autores definen a este indicador de “stress hídrico” y lo ubican en los 1700 m<sup>3</sup>/habitantes/año renovados anualmente (Falkenmark & Widstrand, 1993).



Figura 5. Dra. Malin Falkenmark – Premio Internacional de Hidrología 1998.

Debajo del umbral de una disponibilidad de 1000 m<sup>3</sup>/hab/año se sufre de escases crónica de agua, a una escala que afecta la salud humana e impide el desarrollo y a un nivel de 1700 m<sup>3</sup>/hab/año, según el indicativo de Falkenmark, se califica como de estrés hídrico.

- El Perú cuenta con 1,548 m<sup>3</sup>/habitante/año y resulta ser, el único país con una disponibilidad per cápita inferior a dicho umbral y por lo tanto en situación de stress hídrico.
- Las provisiones para el año 2050 indican que la disponibilidad media será del orden de los 760 m<sup>3</sup>/habitante /año, convirtiendo a escala de país, ser el único de la Región que a nivel internacional presenta una situación verdaderamente comprometida, según el indicador de Falkenmark.





Figura 6. Pérdida del recurso hídrico debido al deshielo de la cordillera de los Andes.

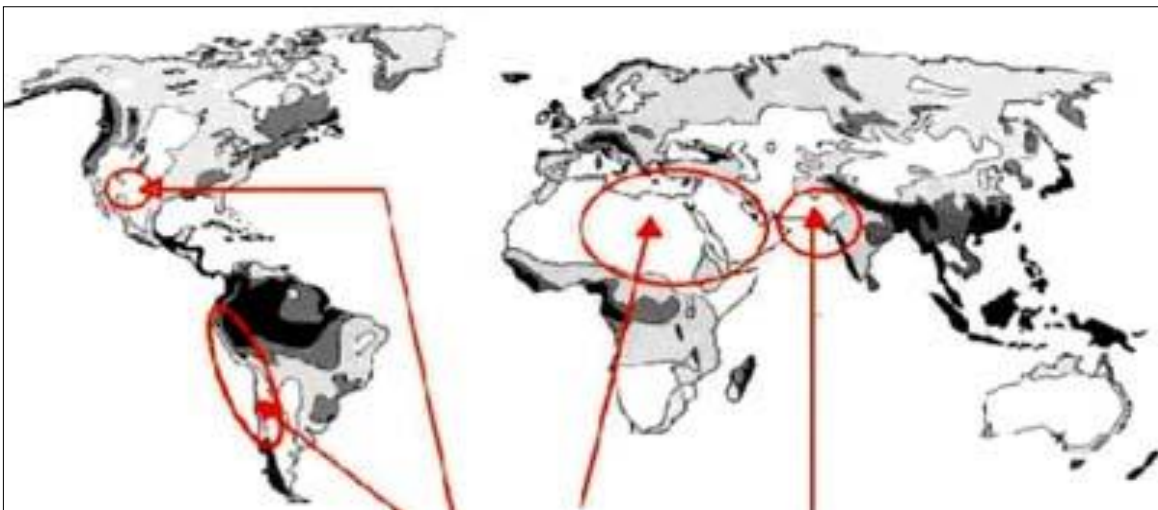


Figura 7. Principales zonas con disponibilidades críticas de agua al año 2025.  
Siglo XXI: Grandes regiones del planeta padecerían escasez extrema de agua.  
Año 2025: habrían más de 30 países (800 millones de personas) con disponibilidad de agua menores a 1000 m<sup>2</sup> hab./año.

América Latina en general ha sido bien dotada con cerca de 28% de los recursos hídricos renovables del mundo para una población regional de aproximadamente 6% de la población mundial, sin embargo, existen discrepancias que incluyen zonas áridas y semiáridas en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Perú representando un 23 % de la superficie total de la región.

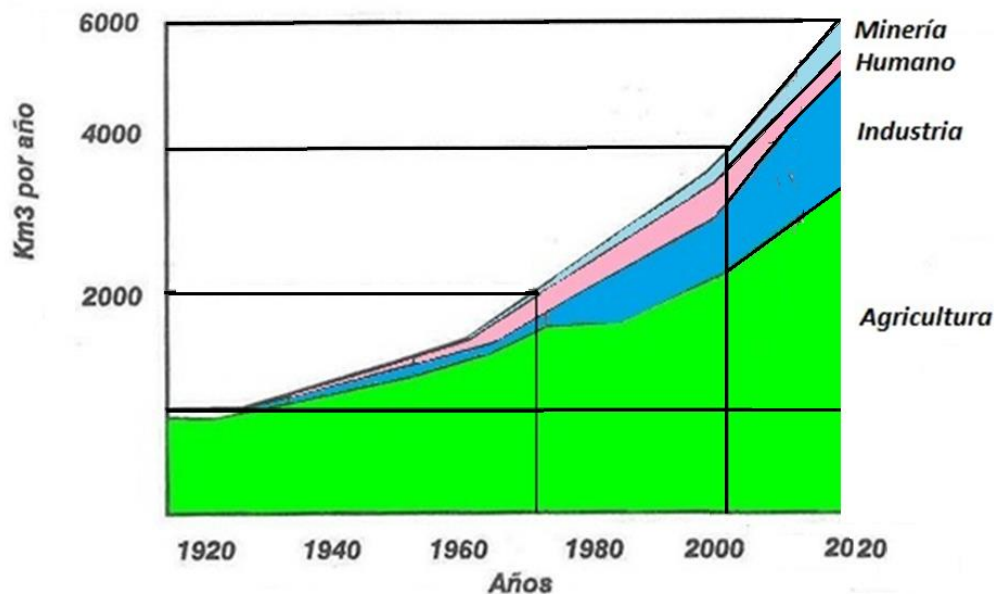


Figura 8. Consumo estimado de agua por sectores.  
Fuente: FAO.

En el país más del 80% del recurso hídrico, se destina para la agricultura, el resto para el uso humano (10%), minero (2%), industrial (6%).

### **Crisis sobre la disponibilidad del recurso hídrico a nivel mundial**

Los países más afectados por la escasez de agua, se encuentran en Oriente Medio y el Norte de África. Los cinco primeros países con mayor escasez de agua son: Kuwait, Bahrein, Emiratos Árabes Unidos, Egipto y Qatar, en base a la información del Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute-WRI).

En África, la segunda ciudad más grande de Sudáfrica y corazón turístico del país, la ciudad del Cabo, se halla en cuenta regresiva para quedarse sin agua; si los habitantes y los miles de turistas que visitan la zona, no reducen drásticamente su consumo, el contador llegará a cero el próximo mes de abril.

### **Causas y consecuencias de la escasez de agua**

Existen diversas causas que producen la escasez de agua en el mundo, entre las que podemos destacar:



PERÚ

Ministerio  
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

**La contaminación:** Tanto la contaminación de agua dulce, como la contaminación del aire y de la tierra, considerando que la contaminación se puede filtrar al agua, al suelo y afectar al aire.

**La sequía:** Debido al fenómeno del cambio climático que potencia el desarrollo de las sequías, durante un tiempo prolongado donde no hay lluvia que causa escasez de agua, tanto para el consumo humano como para los cultivos o la industria.

**Uso descontrolado del agua:** A gran escala en las fábricas, como a pequeña escala, en los hogares que en algunas ocasiones malgastamos el agua sin recordar que es un recurso escaso y en agricultura que es el gran consumidor del recurso.

Consecuencias de la escasez de agua en el mundo: La escasez de agua en el mundo es un problema que puede aumentar y que produce consecuencias graves siguientes:

- Enfermedades, la escasez de agua y falta de potabilización que obliga a recurrir a fuentes de agua contaminadas que pueden provocar enfermedades graves como el cólera y la poliomielitis; la falta de agua, puede producir deshidratación y generar ulteriores complicaciones.
- Hambre, la escasez de agua puede afectar a la agricultura, la ganadería y la industria y, por lo tanto, producir escasez de alimentos.
- Desaparición de vegetales, las plantas necesitan una gran cantidad de agua para desarrollar y cuando el agua escasea se secan y desaparecen.
- Conflictos, la escasez de recursos está en el origen de numerosos conflictos en el mundo y supone el desplazamiento de las personas a otros países para encontrar lugares seguros en los que vivir.

La escasez de agua es un problema mundial que tiene consecuencias muy graves tanto para el medioambiente como para las personas; por lo que es menester cuidar y no malgastar este recurso tan necesario para la vida.



## 1.2 Relación agua planta suelo y medio ambiente

### El agua en las plantas

#### *Mecanismos de absorción de agua por las plantas*

El movimiento del agua a través de la raíz sigue un proceso totalmente diferente al de los iones que en la mayoría de los casos implica a proteínas transportadoras. Bajo condiciones de una planta que transpira, se puede decir que una planta “no absorbe agua”, sino que deja pasar el agua a través de ella. En otras palabras, no se trata de un proceso activo de absorción. El agua se mueve pasivamente a través de la raíz en respuesta a gradientes de potencial hídrico.

La apertura y cierre de estomas, se ha considerado siempre, como el proceso regulador de la entrada y salida de agua de las plantas; sin embargo, desde el descubrimiento de los canales de agua, a través del microscopio electrónico, se ha abierto la posibilidad que ésta, pueda estar regulado a nivel radicular.

Los procesos que llevaron al descubrimiento de los canales de agua, la bicapa lipídica ha sido considerada durante mucho tiempo como la ruta mayoritaria de la entrada y salida de agua a nivel de las células vivas.

Esta entrada y salida de agua se caracteriza por tener igual coeficiente de permeabilidad (Pf) que el coeficiente de difusión (Pd). La relación Pf/Pd mayor que 1 fueron las primeras evidencias de la existencia de poros que permitían el paso del agua.

La principal característica en el pase de moléculas, de esta barrera bicapa lipídica, es su permeabilidad selectiva que permite seleccionar qué moléculas deben entrar y salir de la célula; de esta forma, se mantiene estable el medio intracelular, regulando el paso de agua, iones y metabolitos, a la vez que mantiene el potencial electroquímico.

La bicapa lipídica tiene un grosor aproximado de 7,5 nm (nanómetros) y no es visible al microscopio óptico; pero sí, al microscopio electrónico, donde se pueden observar dos capas oscuras laterales y una central más clara.



## ***La eficiencia del uso de agua por las plantas***

Cuando nos referimos a la eficiencia del uso de agua, es necesario también, considerar la eficiencia de uso del agua por las plantas, la que tiene tres formas de medición: a nivel del campo y suelo; a nivel de la planta y a nivel celular.

### **El agua en el suelo**

El agua en el suelo está retenida por tres tipos de fuerzas: Adhesión, Cohesión y Adsorción iónica considerada como la atracción y retención que realiza un cuerpo en su superficie, tanto de iones, átomos o moléculas que pertenecen a un cuerpo diferente.

Es así que las fuerzas de adhesión forman una película de moléculas en la superficie de las partículas y las fuerzas de cohesión, consideradas como la unión agua – agua, agregan más moléculas a la capa molecular existente.

Las fuerzas de los contra-iones adsorbidos por la carga eléctrica superficial, inducen una presión osmótica en las moléculas de agua cercanas a la superficie de los sólidos. La suma de las fuerzas de adhesión y cohesión genera la presión capilar, que más rigurosamente, por su valor negativo, se denomina tensión capilar.

La sumatoria de las tres fuerzas: adhesión, cohesión y adsorción iónica, generan la tensión de humedad en el suelo, que como depende de la matriz del suelo y no del soluto, a excepción de suelos salinos, se llama tensión mátrica de humedad del suelo.

La tensión capilar o mátrica, se mide a través de la altura, a la que ascendería el agua en un tubo vertical de diámetro capilar, en equilibrio con el peso del agua.

### ***Contenidos hídricos referenciales***

En la información técnica, es frecuente encontrar algunos conceptos hídricos conocidos como “puntos de equilibrio”, considerados como constantes de humedad del suelo, aun cuando en realidad no son constantes, tal como se evidencia en los datos de campo, obtenidos bajo distintos manejos agronómicos; ello es debido, a alteraciones en las propiedades de los suelos, a causa de dicho manejo, evidenciados en la densidad aparente, que refleja cambios en la porosidad del suelo.



De todos modos, para caracterizar las relaciones agua – suelo; y utilizar la información en la programación del riego para operar y evaluar sistemas de riego, se considera que durante un ciclo de cultivo, dichos contenidos hídricos, no varían significativamente.

Los puntos de equilibrio de la relación agua - suelo, tomados como contenidos hídricos referenciales, son los siguientes:

*El contenido hídrico del suelo a Saturación*, que representa la máxima capacidad de almacenamiento de agua de un suelo, cuando ocupa la totalidad del espacio poroso; aun cuando la disponibilidad de agua para las plantas es máxima, debido a su carácter pasajero, no es tomada en cuenta para la programación y operación de los sistemas de riego pero es fundamental para los estudios de drenaje.

*El contenido hídrico a Capacidad de Campo*, que representa la máxima retención de agua en condiciones de drenaje libre; convencionalmente se asocia con una presión negativa = - 0,3 bar = - 0,3 atm = - 30 kPa, aun cuando puede variar entre - 0,1 bar para suelos arenosos y 0,5 bar para suelos arcillosos; es decir, existe un rango de retenciones de humedad, correspondientes a sus tensiones matriciales.

*El contenido hídrico a marchitez permanente*, representa el límite inferior para que la planta pueda extraer agua del suelo; esta situación ocurre a -15 bar = 1.500 kPa; no se trate de una marca única, mucho menos que todas las plantas tengan la misma restricción sobre la fuerza de retención de -15 bar, considerando que muchas especies pueden extraer agua a tensiones mayores; de todos modos, debido a la necesidad de las técnicas de riego, de establecer un rango de humedad disponible para las plantas, esto surge de la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, definidos como los contenidos hídricos que los suelos, son capaces de retener, con succiones matriciales de -0,3 bar y -15 bar, respectivamente.

### ***Eficiencia de uso del agua por las plantas a nivel celular***

La eficiencia de uso del agua por las plantas a nivel celular, está dada, por la relación entre la Fotosíntesis y la Transpiración, la que se mide con equipos que registran la intensidad de esta interacción.

Es importante medir la eficiencia de uso del agua en las plantas, dado que nos preguntamos, si se debe mejorar la eficiencia de riego o la eficiencia del uso de agua en las plantas determinado por la genética de la planta.

En una sola especie se encuentra la existencia de diferentes genotipos y que, algunos producen mayor cantidad de biomasa por unidad de radiación solar expresada en Mili Juls (MJ m<sup>2</sup>/día) que llega a la planta; frente a otros que son menos eficientes.

### **Medición de la fotosíntesis**

Con los medidores de fotosíntesis, es factible determinar la eficiencia de la transpiración, por lo que el equipo calcula la fotosíntesis y la transpiración; esta relación expresa la cantidad de unidades de fotosíntesis por unidad de agua transpirada; comprobándose que algunos cultivares son mucho más eficientes que otros.



Figura 9. Lectura de la clorofila y evaporación.

### **El medio ambiente**

Todo lo analizado anteriormente sobre el comportamiento del agua, en las plantas y en el suelo, está influenciado por las condiciones climatológicas, ubicación del lugar, zona norte, centro o sur; estaciones del año y por factores abióticos, entre otros que regulan el comportamiento. La temperatura, la humedad relativa, las precipitaciones, la duración del día, la radiación solar, la velocidad del viento influyen significativamente en esta interacción.

### **Precipitación**

*Precipitación efectiva (Pe)*, es la cantidad de agua, del total de precipitación (P) que aprovecha la planta, a fin de cubrir sus necesidades parciales o totales, se expresa en mm; cuyas fórmulas son las siguientes:

P = Precipitación total en mm.

Pe = Precipitación efectiva.

Si  $P > 75$                        $Pe = 0.8 P - 25$

Si  $P < 75$                          $Pe = 0.6 P - 10$

Si la Pe = (--) Pe = 0

Requerimiento diferencial de agua (Rda), es la lámina adicional de agua que se debe aplicar a un cultivo para sus necesidades; expresado como la diferencia entre el uso consuntivo y la precipitación efectiva.

Rda = Uso Consuntivo – Precipitación. Efectiva. (mm).

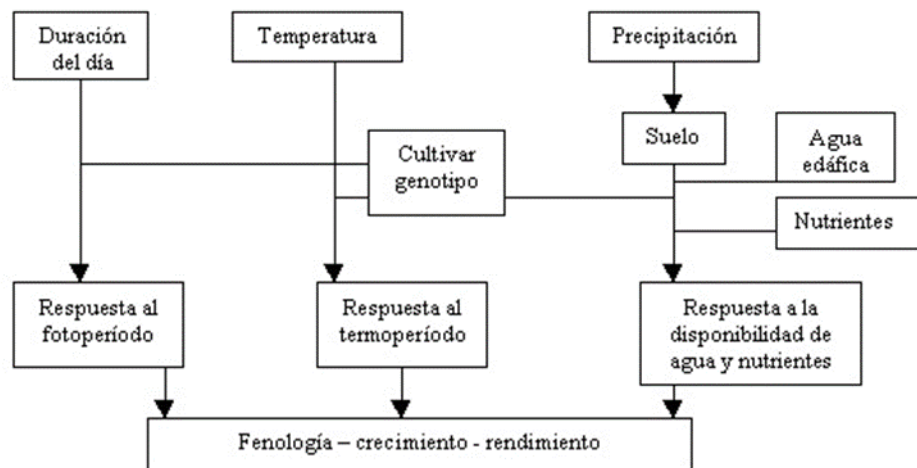


Figura 10. Factores que intervienen en la fenología y rendimiento de los cultivos.

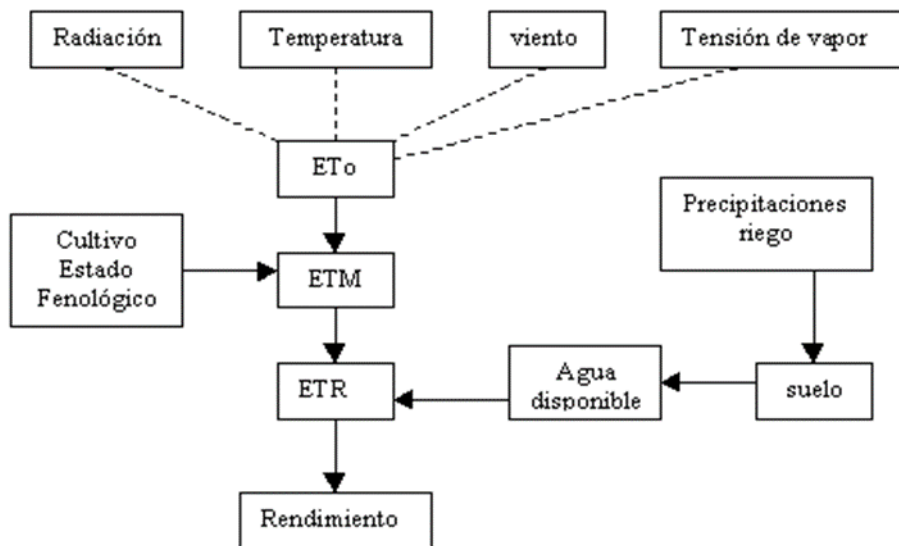


Figura 11. Factores climáticos que intervienen en la fenología del cultivo, en la evapotranspiración y el rendimiento.



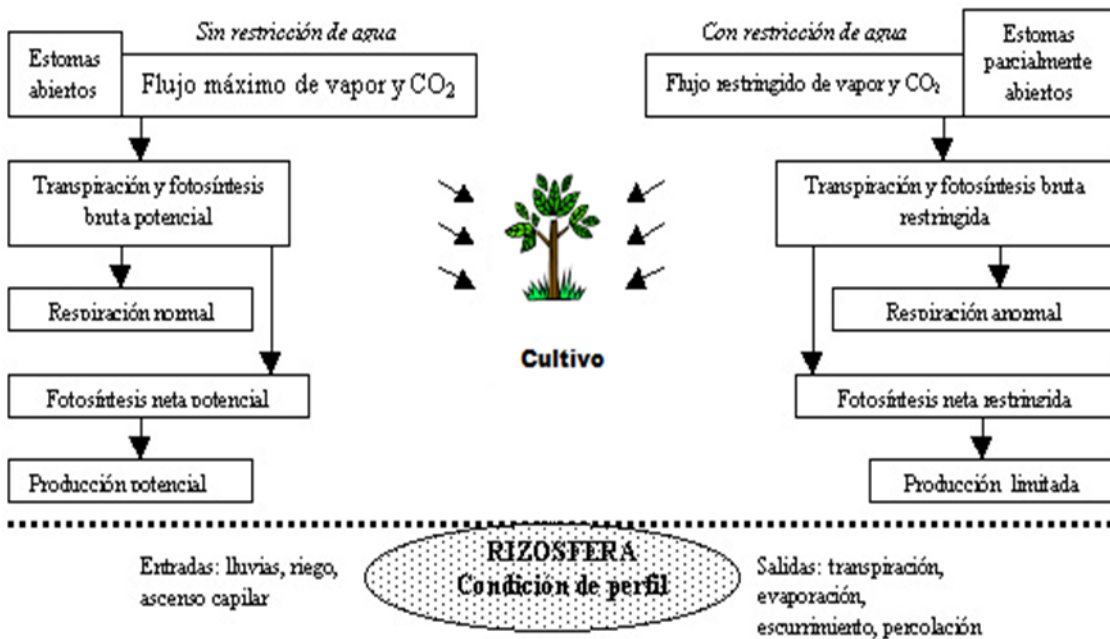
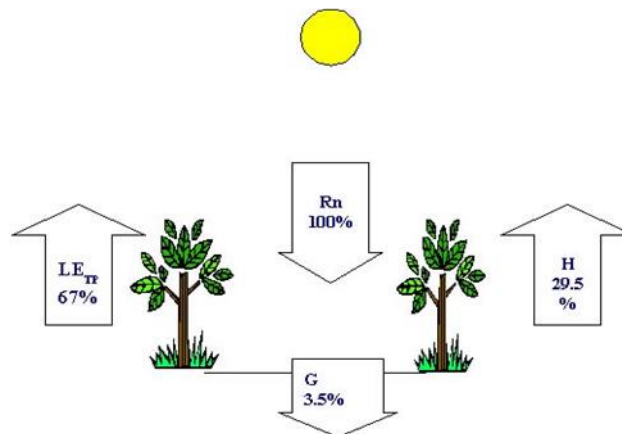


Figura 12. Factores que interviene en la producción, sin y con restricción de agua.



Rn: Radiación neta.

H : Flujo de calor sensible empleado en el calentamiento del aire.

L : Flujo de calor latente de vaporización cerca 585 cal/gr.

ETP: Evapotranspiración.