



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

1.4 Nuevas tecnologías en la determinación de los requerimientos hídricos de los cultivos

La innovación actual, permite hacer uso de plataformas satelitales para inferir lo que acontece a nivel de terreno, a escalas cuyos detalles, se van reduciendo a unos cuantos metros de precisión; y a nivel local, con el uso de drones, implementados con sensores y cámaras multispectrales y a nivel de campo con instrumentos portables, se complementa la función de detección del agua, necesaria para la agricultura.

La aplicación de recientes innovaciones, respecto de los requerimientos hídricos de los cultivos, las hace cada vez más precisas en esta determinación, utilizando los siguientes parámetros y sus relaciones:

El balance de energía superficial (BES).

Índice normalizado de vegetación diferenciada (NVDI).

Coefficiente de cultivo (Kc).

Capturados desde plataformas satelitales y el uso de la metodología Micro meteorológica de Covarianza de Eddy, ajustados a través del monitoreo del flujo de vapor de agua en el terreno.

El avance innovador de los últimos años ha sido abrumador, en todas las áreas, mediante el uso de la nanotecnología, la informática, las tecnologías de la información y comunicación; y específicamente en el sector agrario, el avance de la Agricultura de Precisión, complementadas por sistemas de información georeferenciales, vía satelital y sistemas focales de georeferencia, a través de la utilización de drones, acondicionados con cámaras de alta resolución y sensibilidad a las franjas electromagnéticas de la radiación incidente y reflectante, que permiten detectar e inferir lo que acontece en el propio terreno, respecto a la presencia de plagas, enfermedades, carencias nutritivas, limitaciones hídricas de los cultivos; incluidos además, levantamientos topográficos; requiriéndose de un ploteo in situ, de lo que realmente acontece en el terreno.

Balance de energía superficial (BES)

Es de vital importancia, determinar el balance energético que se produce a nivel de la superficie y su entorno atmosférico, como una herramienta para afrontar el cambio

climático y el efecto invernadero causado por el CO₂, el metano y otros gases; y específicamente, en la medición de la radiación solar y su efecto en la hidrología ambiental.

Asimismo, es necesario tener conocimiento sobre el intercambio de calor, entre el medio y un cuerpo; y el balance energético, causado por la radiación incidente y la reflejada, en relación a la superficie del suelo, su emisión y la contra radiación atmosférica.

Termografía Infrarroja

Por otra parte, la utilización de equipos e instrumentos de medición, para las determinaciones más simples, tal como el uso de una pistola termográfica láser para medir la temperatura en las hojas del arbusto de las plantas (canopia) y del entorno, cuya diferencia indica que tan eficiente es una planta frente a otra variedad en su desempeño de uso del agua y la producción de biomasa.

CWSI = Índice de estrés hídrico del cultivo.

T mojado = Temperatura promedio de superficie referencial húmeda (esponja húmeda).

T seco = Temperatura estimada, adicionando 5°C a la temperatura del aire.

CWSI = $(T \text{ Canopia} - T \text{ mojado}) / (T \text{ seco} - T \text{ mojado})$.



Figura 31. Pistola termográfica láser para medir la temperatura en las hojas y el medio ambiente.

Índice normalizado de vegetación diferenciada (NDVI)

Determinando a través de este índice normalizado, la calidad, cantidad y fenología, de una especie en particular, en un ámbito determinado, basados en las lecturas y mediciones de sensores remotos, instalados en plataformas satelitales o locales en drones, mediante las lecturas de la intensidad de la irradiación de las bandas del espectro electromagnético, que la vegetación, el suelo y el agua reflejan, emiten o absorben.

Determinación del coeficiente del cultivo (Kc)

Si bien es cierto que existen metodologías para determinar el Kc de los cultivos, mediante el uso de instalaciones, tal como los lisímetros, sean estos, de drenaje libre o no, a fin de determinar el consumo hídrico real de las plantas y su relación con la evapotranspiración potencial o referencial; siendo necesario también conocer, otras metodologías más precisas, en la determinación de la eficiencia del uso del recurso hídrico, en la que interviene la genética de la planta, en su eficiencia de producción de biomasa, relacionándola con la producción fotosintética y la transpiración de la planta.

Ahora es factible también, determinar la Evapotranspiración de una amplia zona, que incluyen áreas de cultivo, terrenos en blanco y humedales, a través de mapas de evapotranspiración instantánea, en cualquier horario del día, calculado por modelos de balance térmico, a partir de imágenes satelitales del Sentinel 2 y del Sentinel 3 (europeas), tal como podemos apreciar en la siguiente imagen, diferenciado por colores la evapotranspiración en mm/hr.

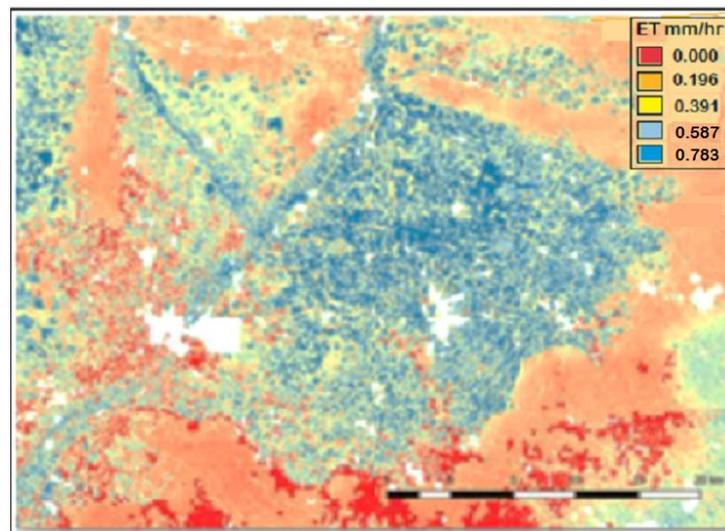


Figura 32. Determinación de la Evapotranspiración en mm/hr.

Covarianza de EDDY

Método basado en el transporte turbulento de flujos, en la capa superficial de la atmósfera, estimando los flujos, mediante la covarianza de energía, entre la velocidad vertical del viento y la concentración de gases a una altura, medible desde la superficie del suelo, en forma escalar, dependiendo del tipo de cultivo.

Este método es utilizado para cuantificar el intercambio de CO₂, Metano (CH₄), Vapor de agua y otros gases; y la energía entre la atmósfera y la superficie del suelo; para ello se utiliza una micro estación meteorológica fija o móvil, debiendo especificarse la configuración de la covarianza de Eddy, para cada sitio de estudio en particular.



Figura 33. Micro estación meteorológica.

Principios fisiológicos y técnicos de la clorofila y carotenoides.

Las propiedades radiactivas de una superficie, determinan su capacidad para absorber, reflejar y transmitir la luz (Sellers 1985, Montelth y Unsworth 2008), la hoja verde (limbo) con concentraciones apropiadas de nitrógeno (1 -2%) y clorofila, absorben la luz fotosintéticamente activa (RFA, roja y azul).

Las plantas necesitan luz para su crecimiento y desarrollo óptimos; pues la fotosíntesis es más alta a medida que aumenta la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA); la energía de RFA, tiene dos puntos críticos de absorción: la luz azul y roja; y reflejan la luz verde a infrarroja, delineando un patrón característico (Gates, 1980). Pero este patrón puede ser alterado por diferentes factores ambientales como las deficiencias nutricionales, la sequía,

la temperatura extrema y la luz (Knapp y Carter 1998).

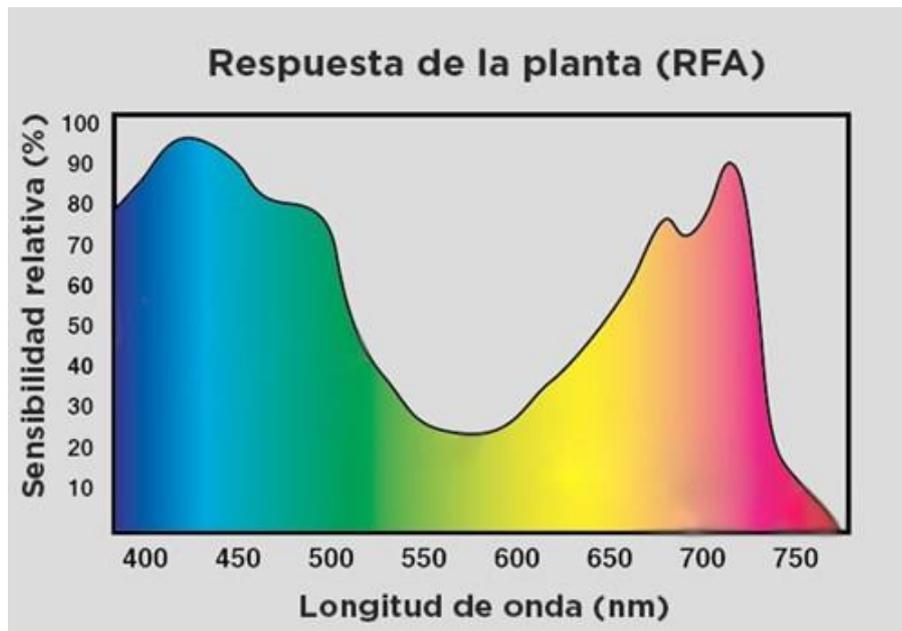


Figura 34. Respuesta de la planta (RFA).

Menos del 5 % de la energía que emite el sol se utiliza en la fotosíntesis, la que se desarrolla en los cloroplastos de las células vegetales que contienen el pigmento verde, la clorofila, que se encarga de absorber la luz del sol.

Las plantas contienen tanta **clorofila a**, que absorbe principalmente luz roja y violeta, como la **clorofila b**, que absorbe la luz roja y azul.

Los tipos de clorofila a y b reflejan la luz verde, motivo por el cual, las hojas son verdes. La clorofila b y los carotenoides (pigmento en los cloroplastos) son pigmentos accesorios. Los cloroplastos, que contienen la clorofila, están en las membranas tilacoides.

Ecuación de la fotosíntesis:





Figura 35. Lectura de clorofila de la planta.



Figura 36. Equipo lectora de clorofila, transpiración y cálculo de la fotosíntesis.



Figura 37. Baja humedad del suelo.

Bandas electro espectrales

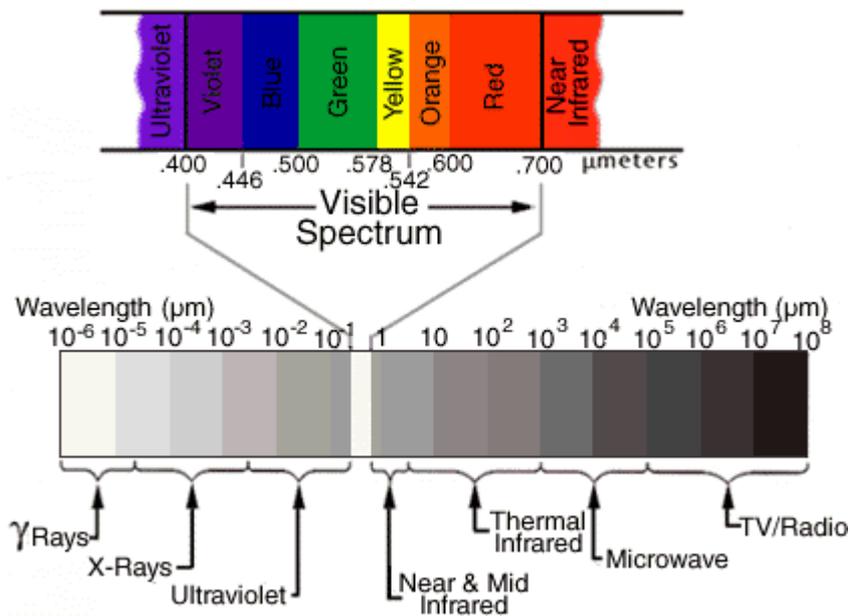


Figura 38. Las imágenes provenientes del satélite Landsat 8, cuentan con once bandas espectrales, cuyas principales características se describen.

- **Banda 1:** Permite visualizar imágenes de aguas poco profundas y partículas finas como polvo y humo. Denominación de Intervalo: Aerosol/Costero. Ancho (μm): 0.43 - 0.45.
- **Banda 2:** Permite detectar cuerpos de agua (mapeo batimétrico), delimitar costas, diferenciación entre suelo y vegetación, diferenciación entre la vegetación conífera y decidua, detección de rasgos urbanos, vías y construcciones. Denominación de Intervalo: Azul. Ancho (μm): 0.45 - 0.51.
- **Banda 3:** Permite evaluar el vigor de la vegetación sana, diferenciar tipos de rocas, delinear aguas poco profundas, medir la calidad de agua (discrimina sedimentos en suspensión), rasgos urbanos y de infraestructura. Denominación de Intervalo: Verde. Ancho (μm): 0.53 - 0.59.
- **Banda 4:** Permite determinar la absorción de clorofila, por ello es muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal, contrasta áreas con y sin vegetación, delimita áreas agrícolas y urbanas. Denominación de Intervalo: Rojo. Ancho (μm): 0.64 - 0.67.



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

- **Banda 5:** Las plantas saludables lo reflejan. Permite el cálculo de biomasa. Al compararlo con otras bandas, se obtienen índices como NDVI, que permite medir la salud de la planta con mayor precisión. Además, permite delimitar costas, para diferenciación suelos–cultivos y suelos–agua, para geomorfología, suelos y geología. Denominación de Intervalo: Infrarrojo Cercano (NIR). Ancho (μm): 0.85 - 0.88.
- **Banda 6:** Permite diferenciar la tierra húmeda de la seca, diferenciar entre nubes, nieve y hielo. Denominación de Intervalo: Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR - 1). Ancho (μm): 1.57 - 1.65.
- **Banda 7:** Es útil para geología, puesto que rocas y suelos que parecen similares en otras franjas a menudo tienen fuertes contrastes en esta banda. Además mejora la determinación de contenidos de humedad en suelos y vegetación. Denominación de Intervalo: Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR - 2). Ancho (μm): 2.11 - 2.29.
- **Banda 8:** Actúa como una película en blanco y negro, ya que en lugar de coleccionar colores visibles por separado, los combina en un solo canal. Es la más nítida de todas las bandas. Se utiliza para crear un mayor contraste entre áreas con y sin cubierta vegetal. Denominación de Intervalo: Pancromático (Pan). Ancho (μm): 0.50 - 0.68.
- **Banda 9:** Es la banda que muestra menos. Cubre una porción muy fina de longitudes de onda. Permite detectar nubes, está diseñada especialmente para cirrus. Los cirrus debido a sus bordes suaves son difíciles de detectar, y pueden esconder información importante. Denominación de Intervalo: Cirrus. Ancho (μm): 1.36 - 1.38.
- **Banda 10:** Permite ver el calor. En lugar de medir la temperatura del aire, como lo hacen las estaciones meteorológicas, informan en el suelo, que a menudo es mucho más caliente. Permiten la estimación de humedad del suelo. Denominación de Intervalo: Infrarrojo térmico 1 (TIR - 1). Ancho (μm): 10.6 - 11.19.
- **Banda 11:** Empleado para el mapeo termal mejorado y estimación de humedad del suelo. Denominación de Intervalo: Infrarrojo térmico 2 (TIR - 2). Ancho (μm): 11.5 - 12.51. (Citado por Adriana Parra Narváez 2018).



Figura 39. Detección de contenido de Nitrógeno por diferenciación del verdor (NDVI), mediante el uso del dron.

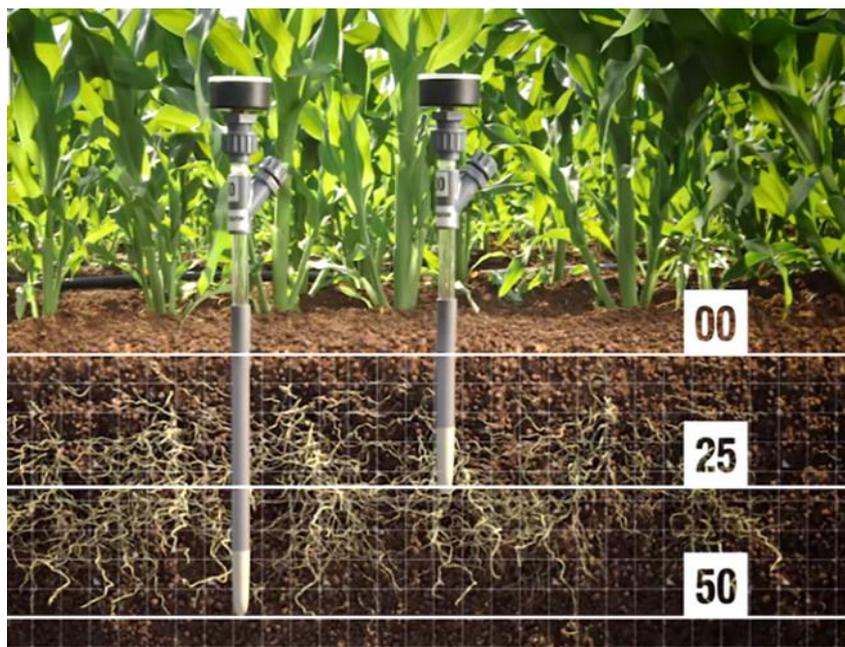


Figura 40. Lectura de valores de tensiómetros en el terreno.

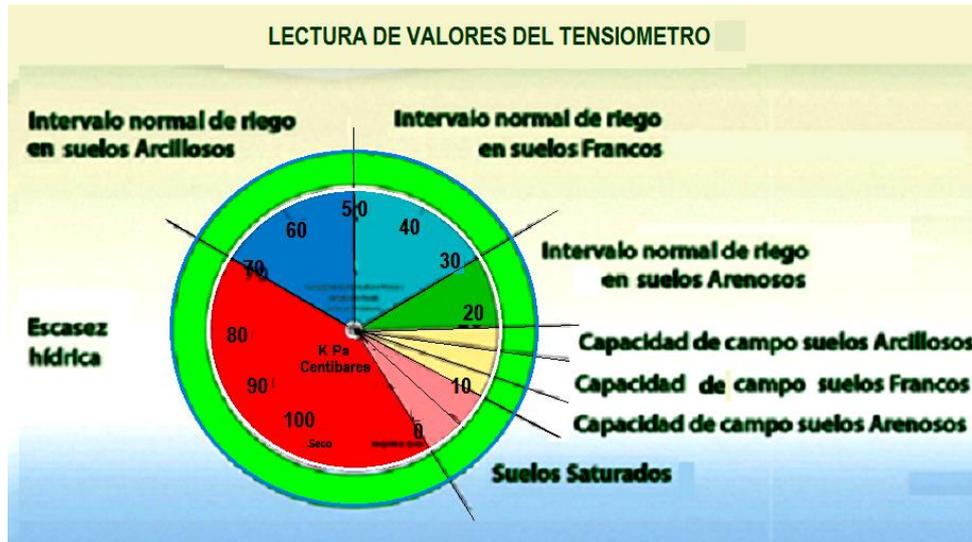


Figura 41. Lectura de valores de tensiómetros en el terreno.

Google Arth Engine

Earth Engine es una plataforma para el análisis científico y la visualización de conjuntos de datos geoespaciales, para usuarios académicos, sin fines de lucro, empresariales y gubernamentales.

Aloja imágenes satelitales y las almacena en un archivo de datos públicos que incluye imágenes históricas de la tierra que datan de más de cuarenta años. Las imágenes, ingeridas diariamente, se ponen a disposición para la minería de datos a escala global.

También proporciona API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) y otras herramientas para permitir el análisis de grandes conjuntos de datos, una API es un conjunto de definiciones y protocolos que se utiliza para desarrollar e integrar el software de las aplicaciones API.

Google Earth te permite viajar, explorar y aprender sobre el mundo, al interactuar con un globo virtual; puede ver imágenes satelitales, mapas, terrenos, edificios en 3D y mucho más y Earth Engine es una herramienta para analizar información geoespacial; puede analizar la cobertura de bosques y agua, el cambio de uso de la tierra o evaluar la salud de los campos agrícolas, entre muchos otros análisis posibles.

Las dos herramientas se basan en algunos de los mismos datos, solo algunas de las imágenes y datos de Google Earth están disponibles para su análisis en Earth Engine.

Comparación de los datos de Earth Engine con los de Landsat y Sentinel en Google Cloud; el equipo de Earth Engine ha trabajado en estrecha colaboración con Google Cloud para llevar las colecciones Landsat y Sentinel-2 a Google Cloud Storage como parte del programa de datos públicos de Google Cloud.

Las colecciones de Google Cloud hacen que sea mucho más fácil y más eficiente acceder a los datos directamente desde servicios en la nube como Google Compute Engine o Google Cloud Machine Learning.

Se debe tener en cuenta que el editor de código de Earth Engine y la API no acceden a estas colecciones en la nube; usan el catálogo de datos de Earth Engine directamente.



Figura 42. Visualización Histórica de Google Earth Engine.



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



1.5 Parámetros utilizados en el sistema de riego tecnificado

Los parámetros y términos utilizados en los proyectos de riego tecnificado referidos al diseño agronómico y al hidráulico a partir de la cédula del cultivo y criterios siguientes:

1. **Evapotranspiración Potencial del Cultivo (ET_o)**, es la cantidad de agua consumida durante un determinado tiempo en un suelo cubierto de vegetación homogénea (tipo grass y 15 cm de desarrollo denso), en plena actividad vegetativa y con un buen suministro de agua, expresada en mm/mes o mm/día; en este mismo sentido, es factible su obtención mediante la Evapotranspiración referencial de Penman, cuyos datos se proporcionan en mm/mes, a través de la página web de la International Water Model Institute.
2. **Factor de cultivo (K_c)**, coeficiente de cultivo que depende de las características fisiológicas y fenológicas de cada especie y expresa la capacidad de la planta para tomar el agua del suelo, en las distintas etapas de su desarrollo; este factor es adimensional; su cálculo se realiza dividiendo la evapotranspiración del cultivo entre la evapotranspiración potencial o referencial.
3. **Áreas parciales de cada cultivo**, expresadas en hectáreas para cada cultivo; en lo referente al riego para cada cultivo se divide como sigue:

Subunidad de riego.- Superficie que se riega simultáneamente desde un mismo punto, donde se regula la presión de entrada del agua en cabecera; lleva por lo tanto, un dispositivo **regulador de presión**.

Unidad de riego.- Superficie formada por el conjunto de **subunidades** que se riegan simultáneamente, desde un mismo punto donde se controla la dosis de agua por aplicar en cada riego; por lo tanto lleva en la cabecera, una **válvula de control**.

Unidad operacional o turno de riego.- Superficie suma de las **unidades de riego** que funcionan simultáneamente, desde un mismo centro de control o cabezal.

4. **Evapotranspiración del cultivo o uso consuntivo** que viene a ser el consumo real de agua por el cultivo, expresado en mm/día: $ET_c = ET_o \times K_c$.



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Considerado también, como:

Uso Consuntivo = Lámina Bruta (mm/día) x 0.11574 = Lts /Seg).

1 mm/día/ha = 1 Lit/día/m² = 10 m³/día/ha.

10 m³/día = 10000 Lts/86400 seg = 0.11574 Lts/seg.

5. **Caudal Continuo Equivalente o ficticio**, expresadas en **Lts/seg**, cuyo cálculo es el siguiente:

Caudal **Q** (Lts/seg), durante las **hrs.** asignadas en el turno de riego, divididos entre la **Frecuencia en días**, por las **24 hrs** del día:

CCE = (Q x hrs por turno) / (Frecuencia en días por 24 hrs).

6. **Módulo de riego (MR)**, caudal continuo equivalente de agua, que requiere una hectárea de cultivo; se expresa en Lts/seg.

Módulo de riego o uso consuntivo del cultivo = (Lamina Bruta mm/día)x(0.116 Lit /seg).

7. **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:

$Pe = 0.8 P - 25$; si la $P > 75$

$Pe = 0.6 P - 10$; si la $P < 75$

Si la $Pe = (-)$: se considera $Pe = 0$

8. **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.

$Rda = UC - P. Efec. (mm)$.

9. **Requerimiento volumétrico neto de agua (Req. Vol. Neto)**, es el volumen de agua que requiere una hectárea de cultivo, se expresa en m³/ha/mes o también en m³/ha/día.

$Req. Vol. Neto = Req (mm) \times 10$.

10. **Eficiencia de riego (Ef. Riego)**, este factor indica cuan eficiente se está aprovechando el agua en el cultivo, los valores dependen del sistema de riego a utilizar: gravedad 30%; aspersión 70%; riego por goteo 90%; exudación 95%; es necesario diferenciar la



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



eficiencia de riego a nivel de parcela, de la eficiencia de riego a nivel de cuenca hidrográfica, que se relaciona con la instalación de la infraestructura de riego.

La eficiencia de riego en una cuenca = es la eficiencia calculada desde la captación del recurso hídrico, la eficiencia de conducción y la eficiencias de distribución, la que se diferencia de la eficiencia de aplicación del riego parcelario.

11. Requerimiento volumétrico bruto (Req. Vol. Bruto): Req. Vol. Bruto = Req. Vol. Neto / Efic. Riego; este requerimiento puede aumentar en el caso de suelos salinos, para el lavado de los mismos.

12. Número de horas de riego (N° horas riego), es el tiempo de riego efectivo que utiliza el sistema de riego, se expresa en horas de riego, como resultado del consumo diario de agua por el cultivo, dividido entre la precipitación horaria del sistema de riego.

13. Caudal disponible a la demanda (Q dem), es el caudal requerido por el sistema, de manera tal que se pueda atender la demanda, se expresa en lt/s:

$$Q \text{ dem} = \text{Área total} \times MR.$$

14. Frecuencia de riego: Fr (días), es el número de días transcurridos entre un riego y otro para volver a regar nuevamente para compensar las pérdidas por evapotranspiración diaria, del agua almacenada o usar una lámina de reposición como fracción de agotamiento que por seguridad se ha establecido, antes de consumir toda el agua almacenada y se expresa en días:

Si necesitamos reponer 12 mm/ha de agua consumida hasta el momento; y si la evapotranspiración diaria es de 3 mm/ha/día, necesitamos volver a regar:

$$12 \text{ (mm/ha)} / 3 \text{ (mm/ha/día)} = 4 \text{ días.}$$

1.5.1 Parámetros utilizados en los proyectos para el diseño hidráulico de riego tecnificado

1. **Coeficiente de uniformidad constructivo – (CUc)** (fabricante): Para encontrar este parámetro, las empresas fabricantes, realizan a nivel de grupos de goteros, aspersores, midiendo estadísticamente su comportamiento, respecto a la uniformidad



de trabajo y comportamiento frente a la temperatura y funcionamiento de los materiales de fabricación, respecto a sus caudales y presiones.

2. **Coefficiente de uniformidad hidráulico (CUh)**; para este parámetro, es necesario realizar el análisis estadístico del funcionamiento correcto de una muestra representativa del universo, de los goteros o aspersores de una instalación, respecto a la presión.
3. **El coeficiente de uniformidad (CU)**, indica el grado de uniformidad con que el sistema de riego viene funcionando, en la aplicación del agua por los difusores o goteros, y evalúa el grado de funcionamiento, con que debe operar un sistema nuevo u otro en operación, relacionando, el 25% de los goteros, que menos caudal aportan, con el 100% de la muestra del universo.

Equivalencia del **CU** = **CUc x CUh**.

4. **El coeficiente de variación nominal del fabricante (CV)**, es la relación entre la desviación típica o estándar de la muestra de un universo, donde la mayor dispersión corresponde al valor mayor del coeficiente de variación.
5. El gotero o grupo de goteros de caudal más bajo de una instalación está representado por (**qns**) y el gotero caudal nominal del fabricante por (**qa**).
6. La formulación del coeficiente de uniformidad es el siguiente, donde el número de goteros por planta es (e):

$$\text{CU} = [1 - (1.27 * \text{CV} / e^{0.5})] * (\text{qns} / \text{qa}).$$

7. **Tolerancia de presiones:** ΔH permisible = 2.5 (ha – hns).

Es la máxima variación de presión permisible, en la **sub unidad de riego** para que los emisores trabajen con una uniformidad >90 %, donde la:

Presión del gotero, con caudal nominal (qa). = **ha**

Presión del gotero, con caudal más bajo (qns). = **hns**

8. **Ecuación del gotero:** $q = K * H^x$

Siendo **q** el caudal del emisor en litros/hora.

K = Coeficiente de descarga, que es un valor característico de cada emisor.

h = Presión a la entrada del emisor, en metros de columna de agua (mca).



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego



Instituto Nacional de Innovación Agraria

x = Exponente de descarga del emisor, que expresa la sensibilidad de los goteros a las variaciones de presión.

9. **Altura dinámica total (ADT):** Presión necesaria para el funcionamiento del sistema de riego para cubrir las pérdidas ocasionadas por rozamiento al discurrir el agua por los diferentes componentes y accesorios del sistema.

$$ADT = Hm_{SUB UNIDAD} + Hf_{ARCO} + Hf_{CONDUCCIÓN} + Hf_{CABEZAL}.$$

$$ADT = Hm_{SUB UNIDAD RIEGO} + Hf * (ARCO + CONDUCCIÓN + CABEZAL).$$

10. **Subunidad:** Es el componente básico del sistema, cuyo control está regulado por una válvula de presión y está compuesto por el portalateral y por los laterales.

$$SU = Lateral (hf + d) + Portalateral (Hf+D) < \Delta H_{PERMISIBLE}.$$

Donde $D/2$ = Desnivel en el portal lateral y $d/2$ = Desnivel en el lateral (m).

Hf = Pérdida de carga en el portalateral y hf = pérdida de carga en el lateral. (m).

11. Presiones en la subunidad

Presión necesaria a la entrada de la subunidad

Presión nominal del gotero (fabricante) = h_a .

Presión a la entrada del lateral = h_m .

$$Hm = h_m + 0.73 Hf_{PORTALATERAL} + D/2.$$

$$h_m = h_a + 0.73 hf_{LATERAL} + d/2.$$

12. Pérdidas de carga en la tubería principal y secundaria

Pérdida de carga HAZEN & WILLIAMS

$$J \text{ (m/100m)} = (1.21 * 10^{12}) * ((Q/C)^{1.8552}) * D^{-4.87}$$

$$Hf = J \text{ (m/100 m)} * (L / 100)$$

Caudal de conducción: Q (Lts/s).

Longitud. Conducción L (m).

Factor rozamiento PVC: C (150) y de HDPE (130).

Diámetro interno tubería: D (mm).