

## México y sus Desafíos Hídricos: una mirada a través del ITA y IER en Zonas de Riego

**Carlos López-López<sup>1</sup>**

[Carlos.lopezll65@gmail.com](mailto:Carlos.lopezll65@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-3191-1005>

Colegio de Postgraduados.  
Campus Montecillo. Carretera México-  
Texcoco, Estado de México, México

**Jorge Flores-Velázquez**

[jorgelv@colpos.mx](mailto:jorgelv@colpos.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-0895-4645>

Colegio de Postgraduados.  
Campus Montecillo. Carretera México-  
Texcoco, Estado de México, México

**Martín A. Bolaños González**

[bolanos@colpos.mx](mailto:bolanos@colpos.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-8110-1051>

Colegio de Postgraduados.  
Campus Montecillo. Carretera México-  
Texcoco, Estado de México, México

**Adolfo A. Exebio-García**

[exebio@colpos.mx](mailto:exebio@colpos.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-3280-0278>

Colegio de Postgraduados.  
Campus Montecillo. Carretera México-  
Texcoco, Estado de México, México

**Adolfo E. Juárez Márquez**

[15bjuarezmarquez@gmail.com](mailto:15bjuarezmarquez@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-5710-0297>

Colegio de Postgraduados.  
Campus Montecillo. Carretera México-  
Texcoco, Estado de México, México

### RESUMEN

La totalidad del estrés hídrico al que están expuestos los cultivos, intensificado por los efectos del cambio climático, puede ser medido a través de indicadores cuantitativos. En este contexto, se busca introducir y sugerir el Índice de Tensión del Agua (ITA) y el Índice de Eficiencia de Riego (IER) basándose en la huella hídrica de los cultivos. Se llevó a cabo un estudio en el módulo de riego III-4 del Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas, donde los cultivos han enfrentado periódicamente falta de agua. Se definió una Línea Base para situaciones sin estrés hídrico y posteriormente se estimó la Condición Actual bajo condiciones de estrés hídrico en los cultivos estudiados. Para ello, se midió la evapotranspiración, los volúmenes de agua utilizados y las huellas hídricas, y posteriormente se normalizaron estos datos. Se derivaron cuatro fórmulas matemáticas para determinar el ITA y el IER. El ITA medio basado en las huellas hídricas totales fue del 61.66%, mientras que el IER medio resultó ser del 38.34%. Estos índices ofrecen una herramienta para analizar de manera efectiva el estrés hídrico total, favoreciendo una gestión sostenible del agua.

**Palabras clave:** cambio climático; lámina de riego; producción agrícola, sequía; cultivos.

---

<sup>1</sup> Autor Principal

Correspondencia: [Carlos.lopezll65@gmail.com](mailto:Carlos.lopezll65@gmail.com)

## **Mexico and its Water Challenges: A Look through ITA and IER in Irrigation Areas**

### **ABSTRACT**

The entirety of the water stress experienced by crops, intensified by the effects of climate change, can be measured through quantitative indicators. In this context, the aim is to introduce and suggest the Water Stress Index (WSI) and the Water Use Efficiency (WUE) based on the water footprint of crops. A study was conducted in the irrigation module III-4 of the Irrigation District 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas, where crops have periodically faced water shortages. A Baseline was defined for situations without water stress, and subsequently, the Current Condition under water stress conditions in the studied crops was estimated. For this, evapotranspiration, water volumes used, and water footprints were measured, and these data were then normalized. Four mathematical formulas were derived to determine the WSI and WUE. The average WSI based on total water footprints was 61.66%, while the average WUE turned out to be 38.34%. These indices provide a tool to effectively analyze total water stress, promoting sustainable water management.

**Keywords:** *climate change; irrigation sheet; agricultural production; drought; crops.*

*Artículo recibido 22 julio 2023*

*Aceptado para publicación: 25 agosto 2023*

## INTRODUCCIÓN

El sistema climático se refiere a la interacción de la radiación solar, prácticamente la única fuente de energía global, con sus cinco componentes interactuantes entre sí: atmósfera, hidrosfera, criósfera, litosfera y biosfera, y que se encuentran en un equilibrio dinámico (Centro Mario Molina, 2016); el cual puede ser forzado o influenciado por varios mecanismos externos, el más importante de los cuales es el Sol, pero también el efecto directo de las actividades humanas (IPCC, 2001). Así, la variabilidad climática natural se explica por cambios tanto internos (p. ej., alteraciones en la composición química de la atmósfera) como externos (p. ej., cambios en la radiación solar) y han cambiado en el tiempo (Murray-Tortarolo, 2023). Sin embargo, de acuerdo con von der Heydt et al. (2021), la mayor parte de la variabilidad surge a través de procesos internos al sistema climático, principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero debido a las actividades humanas; dicha variabilidad se denomina variabilidad climática antropogénica o, más comúnmente, cambio climático global (CCG).

El CCG ha provocado una serie de consecuencias, la más evidente es el aumento de la temperatura media mundial, que a su vez se manifiesta en la modificación de los patrones de precipitación, el aumento del nivel del mar, la reducción de la criósfera y la intensificación de los fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2013; CEPAL, 2020). Las temperaturas atmosféricas más altas aumentan la capacidad de retención de agua de la atmósfera en aproximadamente un 7% por grado Celsius (Trenberth *et al.*, 2003), lo que conlleva a un incremento en el déficit de presión de vapor y, por lo tanto, esto significa un aumento de la evapotranspiración potencial de los cultivos (Trenberth y Asrar, 2014). Así, el CCG está afectando el balance hídrico de la Tierra de manera diferencial; es decir, depende de la región y época del año; sin embargo, los registros y proyecciones indican que las latitudes medias del hemisferio norte, donde se ubica México, son altamente vulnerables ante este fenómeno (Martínez y Patiño, 2012).

En este sentido, el caudal de los ríos es un indicador importante de la afectación a los recursos hídricos disponibles para los seres humanos y el medio ambiente; por lo que Gudmundsson et al. (2021), analizaron los cambios en los flujos de éstos en todo el mundo, encontrando que la influencia humana a través del CCG han afectado la magnitud de los caudales (mínimos, medios y altos) a una escala global. Para el caso de México, Martínez y Patiño (2012) prevén disminuciones importantes en la precipitación y por lo tanto en el escurrimiento, lo que ocasionará escasez y presión sobre los recursos hídricos de las

fuentes de abastecimiento, situación que ya se está registrando en algunas de las principales cuencas hidrológicas de México, tal es el caso de la cuenca hidrológica del Río Bravo, donde se localiza el módulo de riego piloto.

Además, el CCG impacta de manera particular a la agricultura, los extremos climáticos como sequías, olas de calor, patrones de lluvia erráticos e intensos, tormentas, inundaciones y plagas de insectos emergentes han afectado negativamente el sustento de los agricultores (Ahmad et al., 2022). Así, el incremento en la frecuencia de fenómenos meteorológicos erráticos o extremos aumenta la probabilidad de que se pierdan las cosechas (IPCC, 2014). Superar los efectos negativos del cambio climático en la producción agrícola será una tarea a largo plazo (Chen et al., 2023). El cambio climático afectará tanto la seguridad alimentaria como los medios de vida de quienes participan en los sistemas de producción y sus cadenas de valor, las proyecciones indican disminuciones principalmente en las regiones tropicales (Raj et al., 2022); por lo que se requieren medidas urgentes de adaptación a esta nueva realidad, que mejoren la eficiencia de la producción, de manera especial el uso del agua de forma sustentable.

Desde una perspectiva social, meteorológica y climática; la intensidad, la duración, la frecuencia y la fase de la precipitación son tan preocupantes como las cantidades totales, ya que estos factores determinan la disposición de la precipitación una vez que toca el suelo y la cantidad que se escurre (Trenberth et al., 2003). Las afectaciones a los escurrimientos superficiales; los cuales son la fuente de abastecimiento de agua para riego a los cultivos que se establecen en los distritos de riego (DR), unidades de riego (UR), distritos de temporal tecnificado (DTT), módulos de riego (MR) y en general para toda la actividad agrícola, provoca que los volúmenes de agua almacenados en las presas ya no sean suficientes para satisfacer las diferentes demandas de agua; dentro de los cuales, la agricultura de riego consume en promedio el 76% del volumen total. CONAGUA (2018).

Los países que presentan déficit de agua para la producción de alimentos de origen vegetal, animal y bienes diversos; como consecuencia de los efectos del cambio climático global (CCG), han optado por importar grandes cantidades de alimentos para subsanar dicha escasez, con lo cual están importando indirectamente cuantiosos volúmenes de agua que fueron utilizados en los lugares de origen para la producción, embalaje y el transporte; a lo que se le denomina Agua Virtual (Rocha, 2016). Concepto

que fue acuñado por primera vez en 1993 por el profesor John Anthony Allan de la Escuela de Estudios Orientales y Africanos de la Universidad de Londres.

Por otro lado, el concepto de huella hídrica fue introducido por Hoekstra (2002, 2003) para tener un indicador multidimensional basado en el consumo de agua que pudiera proporcionar información útil, extra a los indicadores tradicionales que miden el uso del agua en el sector productivo; de tal forma que Chapagain y Hoekstra (2004) definen la huella hídrica de un individuo, empresa o nación como el volumen total de agua dulce que se utiliza para la producción de bienes y servicios consumidos por el individuo, una empresa o nación, así como los volúmenes de agua contaminada en el proceso de producción en cuestión. Por lo que dicho concepto también se utiliza para medir el impacto de las actividades humanas durante el proceso de aprovechamiento de los recursos hídricos.

La huella hídrica se calcula para diferentes escalas geográficas y resolución; puede calcularse para un producto, lugar específico, región, país, continente o todo el globo terráqueo. La huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce utilizada a través de toda la cadena productiva de dicho producto. Es un indicador multidimensional, ya que muestra los volúmenes de agua consumidos por fuente de abastecimiento y los volúmenes de agua que se contaminan por cada tipo de contaminante durante el proceso de producción; todos los componentes de una huella hídrica total se especifican geográfica y temporalmente. Por lo que la huella hídrica total de un producto está integrada por la huella hídrica azul (HH<sub>A</sub>), la huella hídrica verde (HH<sub>V</sub>) y la huella hídrica gris (HH<sub>G</sub>), Hoekstra et al. (2009)

La huella hídrica verde se refiere al agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad aprovechable, particularmente se refiere al uso del agua de lluvia que es utilizada por los cultivos para la evapotranspiración, la cual es utilizada en la agricultura y en la producción forestal. La huella hídrica azul se refiere al volumen de agua superficial y subterráneo extraído de los acuíferos, lagos, ríos, presas (embalses) y arroyos; la cual es consumida por las plantas para la producción de un bien o producto. La huella hídrica gris se refiere al volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes, basada en las normas ambientales de calidad del agua existentes en el país donde se analiza las huellas hídricas. La huella hídrica de un cultivo está dada por el cociente del volumen total de agua utilizada para la producción y su rendimiento al final del ciclo agrícola, Hoekstra et al., (2009).

La huella hídrica de un producto se expresa en volumen de agua por unidad de producto obtenido con esa agua, por lo general las unidades son  $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  o  $\text{kg}^{-1}$ , o por porción. La cual es la suma de las huellas hídricas de cada paso tomado en el proceso para producir el producto en cuestión, y Hoekstra y Mekonnen (2011); quienes realizaron un estudio para determinar la huella hídrica verde, azul y gris que genera la producción mundial de cultivos de una forma espacialmente explícita para el período 1996-2005; estimando la huella hídrica de 126 cultivos en una cuadrícula de 5 por 5 minutos de arco. Utilizaron un modelo de balance de agua dinámico basado en la cuadrícula para calcular el consumo de agua de los cultivos a lo largo del tiempo, con un intervalo de tiempo de un día. Dicho modelo toma en cuenta el balance hídrico diario del suelo y las condiciones climáticas para cada celda de la cuadrícula. Además, la contaminación del agua asociada con el uso de fertilizantes nitrogenados en la producción de los cultivos, se calcula para cada celda de la cuadrícula antes mencionada. La evapotranspiración del cultivo para los 20 cultivos menores adicionales fue calculada con el modelo CROPWAT. Adicionalmente, calcularon la huella hídrica de más de 200 productos derivados de los cultivos, en los que se incluyen diversos tipos de harinas, bebidas, fibras y biocombustibles. Utilizaron el marco de evaluación de la huella hídrica que reporta Hoekstra *et al.*, (2009) en la guía de la Water Footprint Network (La Red de la huella hídrica). Considerando los resultados obtenidos de las huellas hídricas de los cultivos primarios, encontraron que el promedio mundial de la huella hídrica por tonelada de cultivo producido se incrementa a partir de los cultivos de azúcar (Aproximadamente  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), vegetales ( $300 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), tubérculos y raíces ( $400 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), frutales ( $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), cereales ( $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), cultivos oleaginosos ( $2400 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) hasta pulsos ( $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ). Sin embargo, la huella hídrica varía entre distintos cultivos y entre categorías de los cultivos, así como por región geográfica de producción. Cuando se analiza la huella hídrica por kcal en lugar de tonelada, el panorama se mantiene con las variaciones antes precisadas. Los cultivos básicos que presentan una huella hídrica relativamente grande son: el café, el té, la cocoa, el tabaco, las especias, las nueces, el caucho y las fibras. Finalmente el presente trabajo reportó que la huella hídrica mundial relacionada con la producción agrícola para el periodo de 1996-2005 fue de 7,404 miles de millones de metros cúbicos por año (78% verde, 12% azul y 10% gris). Se obtuvo una gran huella hídrica total para el cultivo de trigo, el arroz y el maíz. El trigo y el arroz tienen las huellas hídricas azules más grandes y juntos representan el 45% de la huella hídrica azul mundial. A

nivel de países, la huella hídrica total fue mayor en la India, en segundo lugar está China, en tercer lugar los Estados Unidos.

Por otro lado, Arévalo *et al.*, (2012), realizaron el cálculo de la huella hídrica para el sector agrícola de Colombia, para lo cual utilizaron la metodología que reporta el Water Footprint Network; luego definieron la escala temporal para el estudio de un año (2018), posteriormente calcularon la huella hídrica por tipo de producto agrícola y área geográfica delimitada con información de tres grandes bloques: información de producción agrícola, información geográfica e información agroclimática; los resultados globales de la estimación de los componentes de la huella hídrica para el sector agrícola de Colombia son: huella hídrica verde (34.242 Mm<sup>3</sup>/año), huella hídrica azul (2.804 Mm<sup>3</sup>/año), huella hídrica gris (2.098 Mm<sup>3</sup>/año) y la huella hídrica total (39.144 Mm<sup>3</sup>/año). Los productos agrícolas de los cuales estimaron la huella hídrica total y sus componentes son: café, maíz, arroz, plátano, caña de azúcar, palma africana, yuca, papa, cacao, banano y otros; así mismo determinaron la huella hídrica a nivel municipal y departamental.

Con la finalidad de poder determinar el momento adecuado para aplicar el riego a los cultivos agrícolas y que estos no sufran estrés hídrico, se han desarrollado investigaciones en torno al Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (Crop Water Stress Index, CWSI por sus siglas en inglés), todas ellas tratando de cuantificar el grado o porcentaje de falta de humedad en la zona radicular de las plantas y su transpiración. López *et al.*, (2009), desarrollaron varios ensayos para determinar el CWSI, para lo cual determinaron la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor; todo ello con la finalidad de presentar los aspectos teóricos y metodológicos del CWSI y su utilidad práctica que tiene para la programación del riego en los cultivos agrícolas. Dicho índice ha tenido utilidad práctica en regiones áridas y semiáridas debido a que el equipo requerido para su implementación es fácil de manejar. Este método del CWSI también se puede utilizar en regiones con clima húmedo, donde los cultivos requieren riego en la época seca y la radiación solar sea alta. Este índice se basa en la teoría del balance de energía en una superficie, las funciones lineales del diferencial de temperatura entre el cultivo y el aire y el déficit de presión de vapor, las cuales dependen del cultivo y las condiciones atmosféricas. La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica y confiable para la estimación del estrés hídrico de los cultivos, la programación del

riego y la predicción de rendimientos. El objetivo final de los ensayos en cuestión fue presentar los aspectos teóricos y metodológicos del índice de estrés hídrico de los cultivos, así como la utilidad práctica que tiene en la calendarización y optimización del agua de riego en los cultivos agrícolas.

Por otro lado, Jackson *et al.*, (1981), citado por López *et al.*, (2009), indican que el agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. A partir de lo cual presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. También indican que cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 y 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o ya no transpira durante mucho tiempo, el CWSI vale 1.

Idso *et al.*, (1981), citado por López *et al.*, (2009), desarrollaron el método empírico del CWSI para la cuantificación de la humedad atmosférica y de la planta en regiones áridas, la cual depende de la determinación de la “Línea base del cultivo sin estrés hídrico”, que facilitan la normalización de cambios en la temperatura del dosel para condiciones ambientales reales. Dicha “Línea base del cultivo sin estrés hídrico”, son específicas para cada cultivo en una condición climática dada y están influenciadas por el clima. Por otro lado, Jackson *et al.*, (1981), citados por López *et al.*, (2009), modificaron el CWSI para incluir una predicción más teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del dosel que incluye explícitamente el déficit de presión del vapor de agua, la radiación neta y la resistencia aerodinámica. Esta aproximación teórica para determinar la humedad atmosférica que utiliza el CWSI es más precisa que la aproximación empírica, particularmente en climas húmedos, Keener y Kircher (1983). Se espera que el CWSI varíe entre 0 a 1 cuando las plantas van de una condición bien regada a una condición totalmente estresada.

Por lo tanto, el método del Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición real, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este enfoque metodológico es necesario para la correcta programación del riego en cultivos agrícolas en campos abiertos y grandes extensiones agrícolas sembradas. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permitirán maximizar los rendimientos a través de un manejo eficiente del riego, Garrot *et al.*, (1990), citado por López *et al.*, (2009).

Así que el Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI), ha tenido un importante uso práctico dentro de la programación del riego en regiones áridas y semiáridas, Calado *et al.*, (1990); Itier *et al.*, (1993); Anconelli *et al.*, (1994); Jones (1999); Orta *et al.*, (2003); Yuan *et al.*, (2004); Simsek *et al.*, (2005); Erdem *et al.*, (2005); citados por López *et al.* (2009); esto se debe principalmente a que el equipo requerido es de fácil manejo. En la agricultura de riego, el costo económico y ecológico del agua de riego es alto, si se considera la incertidumbre en su disponibilidad acrecentada por el cambio climático, de ahí que el costo del equipo para cuantificar las variables climáticas y el estrés hídrico puede justificar la inversión.

El estrés hídrico se define como una medida de la relación que existe entre el volumen de agua requerida por un uso determinado y el volumen disponible en las fuentes de abastecimiento para tal uso; por tal razón, se considera como un indicador de la escasez de agua en cualquier unidad de análisis, Munia *et al.*, (2020); el CCG podría moldear el estrés hídrico de los países, las cuencas, los sistemas productivos, las plantas, los animales y las personas; por tal razón, se requiere generar indicadores que cuantifiquen los niveles de estrés hídrico total de los cultivos agrícolas en los Distritos de Riego.

Munia *et al.*, (2020) calculó el estrés hídrico al que se están sometiendo las subcuencas de todo el mundo por los efectos del CCG, donde analizó el índice de estrés hídrico para las condiciones pasadas de 1980, para el presente en 2010 y para las condiciones futuras en 2050, todo ello con el análisis de diferentes escenarios del calentamiento global (RCP 6.0). Los valores de este índice van de 0 a 1; los valores de cambio negativo significan que el nivel de estrés ha disminuido y los positivos significan que el nivel de estrés ha aumentado.

## **METODOLOGÍA**

Los materiales que se utilizaron para realizar la presente investigación consisten en la climatología obtenida de la base de datos climática del SWAT para una estación hipotética localizada en la zona de estudio, las estadísticas de producción agrícola del patrón de cultivos y la hidrometría del módulo de riego III-4 (ver Figura 1), la información de los cultivos que se siembran en el lugar (fecha de siembra, fecha de cosecha, ciclo vegetativo), los coeficientes de los cultivos ( $K_c$ ) y la duración de las etapas de desarrollo. El Sistema de Información Geográfica utilizado fue el QGIS 3.14.16, también se utilizó el software CropWat 8.0 y ClimWat 2.0 de la FAO.

Para desarrollar la presente investigación se utilizó la Metodología Cuasiexperimental; ya que los efectos de las variables dependientes e independientes utilizadas ya se han producido para el caso de la información en análisis (climatología), las variables independientes no se modifican, solo se seleccionan y se observan los resultados en las variables dependientes, la orientación de las variables se basa en mediciones del pasado y no hay aleatorización de grupos, ya que los grupos son naturales previamente formados. Fernández *et al.*, (2014).

Finalmente, se utilizaron dos diseños experimentales; el primero las “Series temporales interrumpidas con un grupo” y el segundo son las “Series temporales interrumpidas con grupos de control”; el primero consiste en que las series temporales están formadas por observaciones repetitivas sin un grupo de control y el segundo se diferencia del primero en que contempla un grupo de control para poder comparar los resultados analizados de las variables temporales, Alonso *et al.*, (1990). En resumen la investigación se llevó a cabo aplicando los siguientes pasos metodológicos: obtención de la información meteorológica del lugar de estudio, evaluación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, información agronómica y fisiológica de los cultivos, coeficientes de los cultivos y sus gráficas, evapotranspiración del cultivo, precipitación efectiva, requerimiento de riego, estadísticas agrícolas e hidrométricas, productividad media de la tierra, productividad media del agua de riego y la evaluación de la huella hídrica del patrón de cultivos del módulo de riego; los cuales se detallan ampliamente a continuación:

**Información meteorológica.** La información meteorológica consistente en la temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y las horas luz; todas ellas promedios

mensuales, fueron obtenidas a partir de la base datos climatológica del SWAT del periodo 1979-2014 (35 años) para la estación climatológica virtual ubicada dentro del área de estudio con clave 258-981 y complementada con la estación automatizada del módulo de riego en estudio. El diseño experimental utilizado para obtener la información meteorológica son las “Series temporales interrumpidas con un grupo”. Los estadísticos calculados fueron la media aritmética, la sumatoria y la desviación estándar.

**Evaluación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>).** La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), se evaluó mediante el método estándar denominado FAO Penman-Monteith recomendado en el Boletín Número 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO y el uso del software CropWat versión 8.0; la ecuación de FAO Penman-Monteith se basa en el método combinado del balance energético y el método de la transferencia de masa, así como en el uso de factores de resistencia para las superficies cultivadas. La expresión matemática utilizada para tal fin es la que se indica a continuación:

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

Donde:

ET<sub>o</sub>=Evapotranspiración del Cultivo de Referencia, mm.día<sup>-1</sup>

R<sub>n</sub>=Radiación neta en la superficie del cultivo, MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>

R<sub>a</sub>=Radiación extraterrestre, mm día<sup>-1</sup>

G=Flujo del calor de suelo, MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>

T=Temperatura media del aire a 2 m de altura, °C

u<sub>2</sub>=Velocidad del viento a 2 m de altura, m s<sup>-1</sup>

e<sub>s</sub>=Presión de vapor de saturación, kPa

e<sub>a</sub>=Presión real de vapor, kPa

e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>=Déficit de presión de vapor, kPa

Δ=Pendiente de la curva de presión de vapor, kPa

γ= Constante psicrométrica,

**Información agronómica y fisiológica de los cultivos.** La información agronómica y fisiológica de los cultivos, correspondiente a la fecha óptima de siembra, fecha de cosecha, duración del ciclo vegetativo, duración de las etapas de desarrollo fisiológico, fueron investigadas mediante entrevistas directas a los productores y funcionarios del módulo de riego; también se compararon dichos datos con los reportados en el Boletín No. 56 de la FAO.

**Coefficientes de los cultivos y sus gráficas.** Los coeficientes de los cultivos ( $K_c$ ) para cada etapa de desarrollo fisiológico se evaluaron mediante revisión bibliográfica del Boletín No. 56 de la FAO; las gráficas de los  $K_c$  fueron elaboradas en hojas electrónicas de Excell; con las cuales se obtuvieron los  $K_c$  mensuales para cada cultivo del módulo de riego.

**Evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>).** La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>), se evaluó mediante la multiplicación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) en cada mes y su respectivo  $K_c$  mensual; tal como se indica en la expresión matemática siguiente:

$$ET_c = ET_o * K_c \dots\dots\dots 2$$

Donde:

ET<sub>c</sub>=Evapotranspiración del cultivo en el periodo contemplado, mm

ET<sub>o</sub>=Evapotranspiración del cultivo de referencia en el periodo contemplado, mm

$K_c$ =Coeficiente del cultivo en el periodo contemplado, adimensional

**Precipitación efectiva.** La precipitación efectiva para cada periodo de desarrollo de los cultivos se evaluó mediante el software denominado CropWat versión 8.0 de la FAO, el cual utiliza el Método del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (USDA-SCS); cuya expresión matemática es la siguiente:

$$P_e = (1.25247 * P_t^{0.82416} - 2.93522) * 10^{0.00095 * U} * f \dots\dots\dots 3$$

Donde:

P<sub>e</sub>=Precipitación Efectiva mensual, mm

P<sub>t</sub>=Precipitación total mensual, mm

U=Uso consuntivo medio mensual, mm

$\Delta_s$  = Lámina de riego neta, mm

$$f = 0.531747 + 0.011621 * \Delta_s - ((8.9 * 10^{-5}) * \Delta_s^2) + (2.3 * 10^{-7} * \Delta_s^3) \dots\dots\dots 4$$

La expresión matemática anterior se simplifica utilizando dos rangos de la precipitación total, tal como se indica a continuación:

$$P_e = P_t * (125 - 0.2P_t/125) \dots\dots\dots 5$$

Para  $P_t < 250$  mm

$$P_e = 125 + 0.1P_t \dots\dots\dots 6$$

Para  $P_t > 250$  mm

**Requerimiento de riego.** Los requerimientos de riego netos para cada uno de los cultivos en estudio se evaluaron mediante la diferencia que hay entre la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y la precipitación efectiva ( $P_e$ ), para lo cual se utilizó una hoja electrónica de Excell. La expresión matemática utilizada para tal fin es la siguiente:

$$RR_n = ET_c - P_e \dots\dots\dots 7$$

Donde:

$RR_n$  = Requerimiento de Riego Neto, mm

$P_e$  = Precipitación Efectiva, mm

**Estadísticas agrícolas e hidrométricas.** La información de la estadística agrícola e hidrométrica correspondiente a superficie sembrada, superficie cosechada, rendimientos promedios, producción agrícola, precio medio rural, valor de la producción, volúmenes brutos, volúmenes netos y eficiencias de manejo del agua se evaluaron mediante la información del formato denominado EA (Estadísticas agrícolas), que generó el módulo de riego para los últimos 10 ciclos agrícolas.

**Productividad media de la tierra.** La productividad media de la tierra ( $P_t$ ), es un índice que permite relacionar el valor de la producción con la superficie cosechada para un cultivo dado en un subciclo agrícola en estudio. Este índice unitario es una técnica que permite rápidamente analizar la rentabilidad

de un patrón de cultivos establecidos y poder detectar su variación en el tiempo. El índice de productividad media de la tierra está dado por el cociente del valor de la producción y la superficie cosechada, la expresión matemática que se utilizó para evaluar la productividad media de la tierra es la siguiente:

$$P_t = \frac{V_p}{Sup} \dots\dots\dots 8$$

Donde:

P<sub>t</sub>=Productividad media de la tierra, \$.ha<sup>-1</sup>

V<sub>p</sub>=Valor de la producción, \$

Sup=Superficie cosechada, ha

**Productividad media del agua de riego.** La productividad media del agua (P<sub>a</sub>), es un índice que relaciona el valor de la producción con el volumen de agua extraído de las fuentes de abastecimiento para lograr dicha producción agrícola, sea ésta de un cultivo o de un patrón de cultivos. Este índice unitario es una forma rápida de analizar la conversión de los volúmenes de agua extraídos de las fuentes de abastecimiento en pesos para un patrón de cultivos establecidos en cuestión y poder detectar la variación en el tiempo, la cual puede deberse a un cambio en el patrón de cultivos o por disminución en los rendimientos o precios medios rurales, la expresión matemática que permite evaluar este valor es la siguiente:

$$P_a = \frac{V_p}{Vol} \dots\dots\dots 9$$

Donde:

P<sub>a</sub>=Productividad media del agua, \$.m<sup>3</sup>

V<sub>p</sub>=Valor de la producción agrícola, \$

Vol=Volumen de agua extraída y aplicada, m<sup>3</sup>

**Evaluación de la huella hídrica de los cultivos.** Para evaluar la huella hídrica verde, huella hídrica azul y la huella hídrica total de los cultivos que se siembran en el módulo de riego en cuestión, se aplicó la metodología de la WFN (Water Footprint Network, por sus siglas en inglés); las expresiones

matemáticas utilizadas en el presente estudio son las que se reportan en el Manual de la huella hídrica, las cuales fueron programadas en hojas electrónicas de Excell y se reportan a continuación: Hoekstra *et al.*, (2009).

$$HH_c = \frac{\text{Uso de agua del cultivo (CWU)}}{\text{Rendimiento del cultivo (Y)}} = \frac{CWU}{Y} \dots\dots\dots 10$$

Donde:

HHc=Huella Hídrica de un cultivo, m<sup>3</sup>. t<sup>-1</sup>

CWU=Uso del agua del cultivo, m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>

Y =Rendimiento del cultivo, t.ha<sup>-1</sup>

La huella hídrica verde y la huella hídrica azul expresadas en función de las láminas de agua para cada uno de los cultivos del módulo de riego se evaluaron con las siguientes expresiones matemáticas, las cuales fueron programadas en hojas electrónicas de Excell.

$$ET_{Verde} = \text{Min}(ET_c, P_e) \dots\dots\dots 11$$

Donde:

Min=Mínimo valor, adimensional

ET<sub>Verde</sub>=Huella hídrica verde del cultivo, mm

ET<sub>c</sub>=Evapotranspiración del cultivo, mm

Pe=Precipitación efectiva, mm

$$ET_{Azul} = \text{Min}(RR_{Bruto}, RR_{Neto}) \dots\dots\dots 12$$

Donde:

Min=Mínimo valor, adimensional

ET<sub>Azul</sub>=Huella hídrica azul del cultivo, mm

RR<sub>Bruto</sub>=Requerimiento de riego bruto del cultivo, mm

RR<sub>Neto</sub>=Requerimiento de riego neto del cultivo, mm

Por otro lado, la huella hídrica verde y la huella hídrica azul de los cultivos en función de los volúmenes de agua aplicados se evaluaron mediante las dos expresiones matemáticas siguientes, las cuales fueron programadas en una hoja de Excell.

$$WF_{\text{cultivo,green}} = \frac{CWU_{\text{green}}}{Y} \dots\dots\dots 13$$

Donde:

$WF_{\text{cultivo,green}}$  = Huella hídrica verde del cultivo,  $m^3 \cdot t^{-1}$

$CWU_{\text{green}}$  = Uso de agua verde por el cultivo,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

$Y$  = Rendimiento del cultivo,  $t \cdot ha^{-1}$

$$WF_{\text{cultivo,blue}} = \frac{CWU_{\text{blue}}}{Y} \dots\dots\dots 14$$

Donde:

$WF_{\text{cultivo,blue}}$  = Huella hídrica azul del cultivo,  $m^3 \cdot t^{-1}$

$CWU_{\text{blue}}$  = Uso de agua azul por el cultivo,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

$Y$  = Rendimiento del cultivo,  $t \cdot ha^{-1}$

Finalmente, la huella hídrica total de los cultivos que se siembran en el módulo de riego III-4 se evaluó con la expresión matemática siguiente, la cual se programó en una hoja electrónica de Excell.

$$HH_T = \frac{\sum_{i=1}^n CWU_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} \dots\dots\dots 15$$

Donde:

$HH_T$  = Huella hídrica total de los cultivos del módulo de riego;  $m^3 \cdot t^{-1}$

$i$  = Cultivo  $i$ -ésimo, adimensional

$n$  = Cultivo  $n$ -ésimo, adimensional

$CWU_i$  = Volumen de agua utilizado por el cultivo  $i$ -ésimo,  $m^3$

$Y_i$  = Producción del cultivo  $i$ -ésimo,  $t$ .

## RESULTADOS

**Índice de Tensión del Agua (ITA).** El resultado final de la aplicación de la metodología explicada ampliamente en el capítulo correspondiente, son la creación de cuatro expresiones matemáticas multidimensionales inéditas para evaluar el estrés hídrico real al que se someten los cultivos en zonas de riego por la escasez de agua para riego en las fuentes de abastecimiento y la variación de la precipitación pluvial, ocasionados en gran parte, por los efectos del cambio climático global (CCG) y las políticas inadecuadas del manejo de los recursos hídricos; las cuales se detallan a continuación:

**Índice de Tensión del Agua en función de la evapotranspiración del cultivo (ITA<sub>ETc</sub>).** La creación del Índice de Tensión del Agua de los cultivos en función de la evapotranspiración del cultivo, (ITA<sub>ETc</sub>); se expresa como la diferencia que existe entre el total de la evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas de humedad y la suma de la lámina de agua que proporciona la lluvia sin estrés hídrico más la lámina de agua extraída de las fuentes de abastecimiento y aplicada realmente a los cultivos bajo condiciones reales de estrés hídrico, entre la evapotranspiración del cultivo ajustada sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$ITA_{ETc} = 100 - \left\{ \left[ \frac{ET_{Verde1} + ET_{Azul2}}{ET_{cAjust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 16$$

Donde:

ITA<sub>ETc</sub>=Índice de Tensión del Agua en función de la evapotranspiración del cultivo, %

ET<sub>Verde1</sub>=Evapotranspiración verde del cultivo sin estrés hídrico, mm

ET<sub>Azul2</sub>=Evapotranspiración azul del cultivo con estrés hídrico, mm

ET<sub>cAjust1</sub>=Evapotranspiración del cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

La expresión matemática anterior, también se puede expresar en función de la precipitación efectiva (Pe), la cual equivale a la huella hídrica verde del cultivo, y la lámina de riego neta realmente aplicada al cultivo en condición de estrés hídrico (LRN<sub>2</sub>), la cual equivale a la huella hídrica azul del cultivo en la condición con estrés hídrico; tal como se puede ver a continuación:

$$ITA_{ETc} = 100 - \left\{ \left[ \frac{P_e + LRN_2}{ET_{cAjust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 17$$

Donde:

$ITA_{ETc}$ =Índice de Tensión del Agua en función de la precipitación efectiva y lámina de riego, %

$Pe$ =Precipitación efectiva, mm

$LRN_2$ =Lámina de riego neta aplicada al cultivo con estrés hídrico, mm

$ET_{CAjust1}$ =Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

**Índice de Tensión del Agua en función de los volúmenes de agua ( $ITA_{CWU}$ ).** La creación del Índice de Tensión del Agua de los cultivos en función de los volúmenes de agua realmente aplicados al cultivo, ( $ITA_{CWU}$ ); se expresa como la diferencia que existe entre el total del volumen de agua requerido por el cultivo en condiciones óptimas de humedad y la suma del volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más el volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre el volumen total de agua requerido por el cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$ITA_{CWU} = 100 - \left\{ \left[ \frac{CWU_{Verde2} + CWU_{Azul2}}{CWU_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 18$$

Donde:

$ITA_{CWU}$ =Índice de Tensión del Agua en función del volumen de agua, %

$CWU_{Verde2}$ =Consumo de agua verde por el cultivo con estrés hídrico,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

$CWU_{Azul2}$ =Consumo de agua azul por el cultivo con estrés hídrico,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

$CWU_1$ =Consumo de agua total por el cultivo sin estrés hídrico,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

**Índice de Tensión del Agua en función de las huellas hídricas de los cultivos ( $ITA_{HH}$ ).** La creación del Índice de Tensión del Agua de los cultivos en función de la huella hídrica de los cultivos, ( $ITA_{HH}$ ); se expresa como la diferencia que existe entre la huella hídrica total del cultivo en condiciones óptimas de humedad y la suma de la huella hídrica verde, proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más la huella hídrica azul, que equivale al volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre la huella hídrica total del Cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$ITA_{HH} = 100 - \left\{ \left[ \frac{HH_{Verde2} + HH_{Azul2}}{HH_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 19$$

Donde:

$ITA_{HH}$  = Índice de Tensión del Agua en función de las huellas hídricas de los cultivos, %

$HH_{Verde2}$  = Huella hídrica verde del cultivo con estrés hídrico,  $m^3.t^{-1}$

$HH_{Azul2}$  = Huella hídrica azul del cultivo con estrés hídrico,  $m^3.t^{-1}$

$HH_1$  = Huella hídrica total del cultivo sin estrés hídrico,  $m^3.t^{-1}$

**Criterio e interpretación del Índice de Tensión del Agua (ITA).** Los criterios y la interpretación creados para el Índice de Tensión del Agua (ITA) evaluado con las cuatro expresiones matemáticas planteadas anteriormente para cualquier cultivo establecido en el mundo, se plantea a continuación:

**CRITERIO:**

A: Si el  $ITA \geq 100$  No hay estrés hídrico en los cultivos

B: Si el  $ITA < 100$  Existe estrés hídrico en los cultivos

**INTERPRETACIÓN:**

1.- $ITA_{ETc}$ : Representa el porcentaje de la evapotranspiración del cultivo que no se aplicó y/o el porcentaje de la lámina de riego neta requerida que no se aplicó al cultivo.

2.- $ITA_{cwu}$ : Representa el porcentaje del volumen neto total de agua requerida por el cultivo que no se aplicó

3.- $ITA_{HH}$ : Representa el porcentaje de la disminución del rendimiento potencial unitario del cultivo por el estrés hídrico al que se somete por la falta de agua.

**Índice de Eficiencia del Riego de los cultivos (IER).** El resultado final de la aplicación de la metodología explicada ampliamente en el capítulo correspondiente, son la creación de cuatro expresiones matemáticas multidimensionales para evaluar el Índice de Eficiencia del Riego o el porcentaje de la eficacia para suministrar los requerimientos de riego por los cultivos, al que se someten los cultivos en zonas de riego por la escasez de agua para riego en las fuentes de abastecimiento y la variación de la precipitación pluvial, ocasionados en gran parte, por los efectos del cambio climático global (CCG) y las políticas inadecuadas del manejo de los recursos hídricos; las cuales se detallan a continuación:

**Índice de Eficiencia del Riego en función de la evapotranspiración del cultivo (IER<sub>ETc</sub>).** La creación del Índice de Eficiencia del Riego de los cultivos en función de la evapotranspiración del cultivo, (IER<sub>ETc</sub>); se expresa como la suma de la lámina de agua que proporciona la lluvia sin estrés hídrico más la lámina de agua extraída de las fuentes de abastecimiento y aplicada realmente a los cultivos bajo condiciones reales de estrés hídrico, entre la evapotranspiración del cultivo ajustada sin estrés hídrico; el cual se calcula con la siguiente expresión matemática:

$$IER_{ETc} = \left\{ \left[ \frac{ET_{Verde1} + ET_{Azul2}}{ET_{cAjust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 20$$

Donde:

IER<sub>ETc</sub>=Índice de Eficiencia del Riego en función de la evapotranspiración del cultivo, %

ET<sub>Verde1</sub>=Evapotranspiración verde del cultivo sin estrés hídrico, mm

ET<sub>Azul2</sub>=Evapotranspiración azul del cultivo con estrés hídrico, mm

ET<sub>cAjust1</sub>=Evapotranspiración del cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

La expresión matemática mostrada anteriormente, también se puede expresar en función de la precipitación efectiva (Pe), la cual equivale a la huella hídrica verde del cultivo y la lámina de riego neta realmente aplicada al cultivo en condición de estrés hídrico (LRN2), la cual equivale a la huella hídrica azul del cultivo en la condición de estrés; tal como se puede ver a continuación:

$$IER_{ETc} = \left\{ \left[ \frac{Pe + LRN2}{ET_{cAjust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 21$$

Donde:

IER<sub>ETc</sub>=Índice de Eficiencia del Riego en función de la precipitación y lámina de riego, %

Pe=Precipitación efectiva, mm

LRN2=Lámina de riego neta aplicada al cultivo con estrés hídrico, mm

ET<sub>cAjust1</sub>=Evapotranspiración del cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

**Índice de Eficiencia del Riego en función de los volúmenes de agua (IER<sub>CWU</sub>).** La creación del Índice de Eficiencia del Riego de los cultivos en función de los volúmenes de agua realmente aplicados al

Cultivo, ( $IER_{CWU}$ ); se expresa como la suma del volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más el volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre el volumen total de agua requerido por el cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$IER_{CWU} = \left\{ \left[ \frac{CWU_{Verde2} + CWU_{Azul2}}{CWU_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 22$$

Donde:

$IER_{CWU}$  = Índice de Eficiencia del Riego en función del volumen de agua aplicado, %

$CWU_{Verde2}$  = Consumo de agua verde por el cultivo con estrés hídrico,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

$CWU_{Azul2}$  = Consumo de agua azul por el cultivo con estrés hídrico,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

$CWU_1$  = Consumo de agua total por el cultivo sin estrés hídrico,  $m^3 \cdot ha^{-1}$

**Índice de Eficiencia del Riego en función de las huellas hídricas de los cultivos ( $IER_{HH}$ ).** La creación del Índice de Eficiencia del Riego de los cultivos en función de las huellas hídricas de los cultivos, ( $IER_{HH}$ ); se expresa como la suma de la huella hídrica verde proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más la huella hídrica azul que equivale al volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre la huella hídrica total del cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$IER_{HH} = \left\{ \left[ \frac{HH_{Verde2} + HH_{Azul2}}{HH_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 23$$

Donde:

$IER_{HH}$  = Índice de Eficiencia del Riego en función de las huellas hídricas de los cultivos, %

$HH_{Verde2}$  = Huella hídrica verde del cultivo con estrés hídrico,  $m^3 \cdot t^{-1}$

$HH_{Azul2}$  = Huella hídrica azul del cultivo con estrés hídrico,  $m^3 \cdot t^{-1}$

$HH_1$  = Huella hídrica total del cultivo sin estrés hídrico,  $m^3 \cdot t^{-1}$

**Criterio e interpretación del Índice de Eficiencia del Riego (IER).** Los criterios y la interpretación creados para el Índice de Eficiencia del Riego (IER) evaluado con las cuatro expresiones matemáticas planteadas anteriormente para cualquier cultivo establecido en el mundo, se plantea a continuación:

## CRITERIO:

A: Si el  $IER \geq 100$  No hay déficit en el riego

B: Si el  $IER < 100$  Si hay déficit en el riego

## INTERPRETACIÓN:

1.- $IER_{ETc}$ : Representa el porcentaje de la evapotranspiración del cultivo que se aplicó y/o el porcentaje de la lámina de riego neta requerida que se aplicó al cultivo.

2.- $IER_{CWU}$ : Representa el porcentaje del volumen neto total de agua requerida por el cultivo que se aplicó

3.- $IER_{HH}$ : Representa el porcentaje del rendimiento potencial por obtener del cultivo por el estrés hídrico al que se somete por la falta de agua.

## Estudio de Caso: Módulo de Riego III-4 Hidráulica los Ángeles

Para comprobar la veracidad de las expresiones matemáticas creadas en la presente investigación científica, las cuales permiten evaluar de cuatro formas diferentes el estrés hídrico total al que se someten los cultivos por la escasez de agua para riego en un caso real, se utilizó la información de operación de 10 ciclos agrícolas que generó el módulo de riego III-4 denominado “**Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles, A.C.**”, del Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas; México; como caso de estudio piloto. Figura 1.

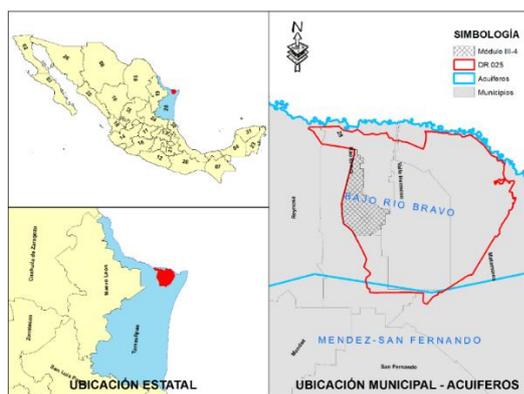


Figura 1. Localización geográfica del módulo de riego III-4.

(Fuente: Elaboración propia del autor).

El módulo de riego III-4 se localiza en la región Norte del estado de Tamaulipas, zona que pertenece al Organismo de Cuenca Número VI Río Bravo; Región Hidrológica número 24 Bravo Conchos; Cuenca

Río Bravo-Matamoros-Reynosa; Subcuenca Río Bravo-Reynosa; a nivel local se localiza en el municipio de Río Bravo, Tamaulipas.

La zona de estudio tiene un clima cálido subtropical con veranos húmedos y calurosos e inviernos secos. Los vientos húmedos procedentes del Golfo predominan durante la primavera, verano y otoño; originando una precipitación media anual de 605 mm. Las lluvias, en forma de tormentas, se distribuyen en 2 periodos: uno que ocurre a fines de mayo y principios de junio; otro, que se presenta en septiembre. Los meses restantes, aunque con algunas lluvias, se consideran secos. Esta irregularidad en la precipitación hace necesario el riego para cubrir las necesidades de agua de los cultivos. Además, con frecuencia también afectan las labores de preparación del suelo, cosecha, control de plagas, programación de riegos y secado de los granos; lo cual se acentúa en las áreas con problemas de drenaje. SARH., (1983).

**Huella hídrica de los cultivos para la Línea Base (LB).** La huella hídrica de los cultivos para la “Línea Base”, evaluada con la metodología explicada ampliamente en el apartado correspondiente, se puede ver en el cuadro siguiente para la condición óptima de humedad y el potencial de producción máximo de los cultivos.

Cuadro 1. Huella hídrica de los cultivos del módulo de riego sin estrés hídrico (Línea Base).

CULTIVO	ET <sub>CAdj</sub> (mm)	ET <sub>Verde</sub> (mm)	ET <sub>Azul</sub> (mm)	CWU (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	CWU <sub>Verde</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	CWU <sub>Azul</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	REND. (t.ha <sup>-1</sup> )	HH <sub>C</sub> (m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> )	HH <sub>Verde</sub> (m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> )	HH <sub>Azul</sub> (m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> )
Maíz A.	949.00	245.80	703.29	9,490.90	2,458.00	7,032.90	8.00	1,186.36	307.25	879.11
Maíz B.	973.65	277.80	724.93	9,736.50	2,778.00	7,249.30	8.00	1,217.06	347.25	906.16
Sorgo	790.68	195.90	613.72	7,906.80	1,959.00	6,137.20	6.00	1,317.80	326.50	1,022.87
Algodón	1,215.40	279.00	936.40	12,154.00	2,790.00	9,364.00	5.00	2,430.80	558.00	1,872.80
Soya	827.26	195.90	631.36	8,272.60	1,959.00	6,313.60	2.50	3,309.04	783.60	2,525.44
Rye Grass	728.76	175.90	552.86	7,287.60	1,759.00	5,528.60	2.00	3,643.80	879.50	2,764.30
<b>PROM/TOT</b>	<b>914.13</b>	<b>228.38</b>	<b>693.76</b>	<b>9,141.40</b>	<b>2,283.83</b>	<b>6,937.60</b>	<b>5.25</b>	<b>13,104.86</b>	<b>3,202.10</b>	<b>9,970.68</b>

ET<sub>CAdj</sub>=Evapotranspiración del cultivo ajustada

ET<sub>Verde</sub>=Evapotranspiración del cultivo de la lluvia

ET<sub>Azul</sub>=Evapotranspiración del cultivo del riego

CWU=Volumen de agua total usado por el cultivo

CWU<sub>Verde</sub>=Volumen de agua usado de lluvia

CWU<sub>Azul</sub>=Volumen de agua usado del riego

REND.=Rendimiento

HH<sub>C</sub>=Huella hídrica total del cultivo

HH<sub>Verde</sub>=Huella Hídrica de la lluvia

HH<sub>Azul</sub>=Huella Hídrica del riego

El cultivo del algodón es el que mayor agua requiere (**ET<sub>CAdj</sub>**), seguido del maíz blanco, el maíz amarillo, la soya, el sorgo y el cultivo que menor agua requiere es el pasto. Con respecto a la evapotranspiración de los cultivos producto de la precipitación efectiva (**ET<sub>Verde</sub>**), el cultivo del algodón es el que mayor

evapotranspiración verde presenta, luego le sigue el maíz blanco, seguido por el maíz amarillo, luego el sorgo junto con la soya y finalmente el pasto. Por otro lado, la evapotranspiración de los cultivos producto del riego ( $ET_{Azul}$ ) se tiene que el cultivo del algodón es el que mayor agua evapotranspira, en segundo lugar se tiene al maíz blanco, luego le sigue el maíz amarillo, en cuarto lugar se tiene la soya, en quinto el sorgo y finalmente los pastos.

Con respecto a los volúmenes totales de agua requerida por los cultivos ( $CWU$ ), el algodón es el que mayor volumen de agua requiere, luego le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes de la lluvia ( $CWU_{Verde}$ ), se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el algodón, luego le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar el sorgo y la soya está en quinto lugar, y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes del riego ( $CWU_{Azul}$ ), se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el algodón, en segundo lugar le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos.

Los rendimientos potenciales de los cultivos (**Rend.**) del módulo de riego en cuestión, sin que les falte el riego, son los siguiente: el maíz amarillo  $8.0 \text{ t.ha}^{-1}$ , el maíz blanco  $8.0 \text{ t.ha}^{-1}$ , el sorgo  $6.0 \text{ t.ha}^{-1}$ , el algodón  $5.0 \text{ t.ha}^{-1}$ , la soya  $2.50 \text{ t.ha}^{-1}$  y los pastos tipo Rye Grass  $2.0 \text{ t.ha}^{-1}$ .

Con respecto a la huella hídrica total de los cultivos (**HHc**) sin restricción de agua (**LB**), se tiene que los pastos son los que mayor agua requieren para producir una tonelada ( $3,643.80 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), luego le sigue la soya ( $3,309.04 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en tercer lugar está el algodón ( $2,430.80 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en cuarto lugar el sorgo ( $1,317.80 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en quinto lugar el maíz blanco ( $1,217.06 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) y finalmente el maíz amarillo ( $1,186.36 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ).

Con respecto a la huella hídrica verde, se tiene que los pastos presentan la mayor huella hídrica verde ( $879.50 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), luego le sigue la soya ( $783.60 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en tercer lugar está el algodón ( $558.00 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en cuarto lugar está el maíz blanco ( $347.25 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en quinto lugar está el sorgo ( $326.50 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) y finalmente el maíz amarillo ( $307.25 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ). Con respecto a la huella hídrica azul, se tiene que los pastos presentan la mayor huella hídrica azul ( $2,764.30 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), luego le sigue la soya ( $2,525.44 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en tercer lugar se tiene el algodón ( $1,872.80 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en cuarto lugar el sorgo ( $1,022.87 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ), en quinto lugar el maíz blanco ( $906.16 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ) y en último lugar el maíz amarillo ( $879.11 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ ).

**Huella hídrica de los cultivos para la Condición Real (CR).** La Huella Hídrica de los cultivos para la “Condición Real”, es decir; para la condición promedio histórica con escasez de agua, evaluada con la metodología explicada ampliamente en el apartado correspondiente, se puede ver en el cuadro siguiente para la condición real de sequía y la producción promedio histórica real de los cultivos agrícolas.

Cuadro 2. Huella hídrica de los cultivos del módulo de riego con estrés hídrico (CR)

CULTIVO	ET <sub>CAdj</sub> (mm)	ET <sub>Verde</sub> (mm)	ET <sub>Azul</sub> (mm)	CWU (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	CWU <sub>Verde</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	CWU <sub>Azul</sub> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	REND. (t.ha <sup>-1</sup> )	HH <sub>c</sub> (m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> )	HH <sub>Verde</sub> (m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> )	HH <sub>Azul</sub> (m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> )
Maíz A.	949.09	245.80	244.21	4,900.10	2,458.00	2,442.10	6.72	729.29	365.83	363.46
Maíz B.	973.65	277.80	268.01	5,458.10	2,778.00	2,680.10	7.12	767.13	390.44	376.68
Sorgo	790.68	195.90	175.79	3,716.90	1,959.00	1,757.90	4.71	789.15	415.92	373.23
Algodón	1,215.40	279.00	239.64	5,186.40	2,790.00	2,396.40	3.36	1,544.49	830.85	713.64
Soya	827.26	195.90	243.16	4,390.60	1,959.00	2,431.60	2.20	1,995.73	890.45	1,105.27
Rye Grass	728.76	175.90	139.10	3,150.00	1,759.00	1,391.00	1.40	2,250.00	1,256.43	993.57
<b>TOTAL/PROMEDIO</b>	<b>914.13</b>	<b>228.38</b>	<b>218.32</b>	<b>4,467.02</b>	<b>2,283.83</b>	<b>2,183.18</b>	<b>4.25</b>	<b>8,074.22</b>	<b>4,149.11</b>	<b>3,925.11</b>

El cultivo del algodón es el que mayor agua requiere (**ET<sub>CAdj</sub>**), luego le sigue el cultivo del maíz blanco, en tercer lugar tenemos el maíz amarillo, cuarto lugar la soya, en quinto lugar el sorgo y el cultivo que menor agua requiere es el pasto. Con respecto a la evapotranspiración de los cultivos producto de la precipitación efectiva (**ET<sub>Verde</sub>**), el cultivo del algodón es el que mayor evapotranspiración verde presenta, luego le sigue el maíz blanco, seguido por el maíz amarillo, luego el sorgo junto con la soya y finalmente el pasto. Por otro lado, la evapotranspiración de los cultivos producto del riego (**ET<sub>Azul</sub>**) se tiene que el cultivo del maíz blanco es el que mayor agua evapotranspira, en segundo lugar se tiene al maíz amarillo, luego le sigue la soya, en cuarto lugar se tiene el algodón, en quinto el sorgo y finalmente los pastos.

Con respecto a los volúmenes totales de agua consumida por los cultivos (**CWU**), el cultivo del maíz blanco es el que mayor volumen de agua requiere, luego le sigue el algodón, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes de la lluvia (**CWU<sub>Verde</sub>**), se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el algodón, luego le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar el sorgo y la soya y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes del riego (**CWU<sub>Azul</sub>**), se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el maíz blanco, en segundo lugar le sigue el maíz amarillo, en tercer lugar está la soya, en cuarto lugar está el algodón, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos.

Los rendimientos reales promedio históricos de los cultivos (**Rend.**) del módulo de riego, con estrés hídrico, son los siguiente: el maíz amarillo 6.72 t.ha<sup>-1</sup>, el maíz blanco 7.12 t.ha<sup>-1</sup>, el sorgo 4.71 t.ha<sup>-1</sup>, el algodón 3.36 t.ha<sup>-1</sup>, la soya 2.20 t.ha<sup>-1</sup> y los pastos tipo Rye Grass 1.40 t.ha<sup>-1</sup>. Con respecto a la huella hídrica total de los cultivos con restricción de agua, se tiene que los pastos son los que mayor agua requieren para producir una tonelada (2,250.00 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), luego le sigue la soya (1,995.73 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en tercer lugar está el algodón (1,544.49 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en cuarto lugar el sorgo (789.15 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en quinto lugar el maíz blanco (767.13 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>) y finalmente el maíz amarillo (729.29 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>).

Con respecto a la huella hídrica de la lluvia, se tiene que los pastos presentan la mayor huella hídrica verde (1,256.43 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), luego le sigue la soya (890.45 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en tercer lugar está el algodón (830.85 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en cuarto lugar está el sorgo (415.92 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en quinto lugar está el maíz blanco (390.44 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>) y finalmente el maíz amarillo (365.83 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>). Con respecto a la huella hídrica del riego, se tiene que la soya presentan la mayor huella hídrica azul (1,105.27 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), luego le sigue el pasto (993.57 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en tercer lugar se tiene el algodón (713.64 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en cuarto lugar el maíz blanco (376.68 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>), en quinto lugar el sorgo (373.23 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>) y en último lugar el maíz amarillo (363.46 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup>).

**Índice de Tensión del Agua e Índice de Eficiencia del Riego.** Aplicando las expresiones matemáticas 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, y 23 creadas; se obtienen los valores numéricos de las cuatro formas de calcular el Índice de Tensión del Agua y el Índice de Eficiencia del Riego, así como su interpretación, los cuales se reportan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Índices de Tensión del Agua (ITA) e Índice de Eficiencia del Riego (IER).

CULTIVO	ÍNDICE DE TENSION DEL AGUA (ITA)			ÍNDICE DE EFICIENCIA DEL RIEGO (IER)		
	EN (%)			EN (%)		
	ITA <sub>ETc</sub>	ITA <sub>CWU</sub>	ITA <sub>HH</sub>	IER <sub>ETc</sub>	IER <sub>CWU</sub>	IER <sub>HH</sub>
Maíz amarillo	48.37	48.37	38.53	51.63	51.63	61.47
Maíz blanco	43.94	43.94	36.97	56.06	56.06	63.03
Sorgo	52.99	52.99	40.12	47.01	47.01	59.88
Algodón	57.33	57.33	36.46	42.67	42.67	63.54
Soya	46.93	46.93	39.69	53.07	53.07	60.31
Rye Grass	56.78	56.78	38.25	43.22	43.22	61.75
<b>TOTAL/PROMEDIO</b>	<b>51.06</b>	<b>51.06</b>	<b>38.34</b>	<b>48.94</b>	<b>48.94</b>	<b>61.66</b>

**1.-Cultivo del maíz amarillo:** Este cultivo se somete a un 48.37% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, solo se le aplicó el 51.63%, con lo cual se espera el 61.47% de su rendimiento potencial.

**2.-Cultivo del maíz blanco:** Este cultivo se somete a un 43.94% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 56.06%, con lo cual se espera tan solo el 63.03% de su rendimiento potencial.

**3.-Cultivo del sorgo:** Este cultivo se somete a un 52.99% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 47.01 %, con lo cual se espera tan solo el 59.88% de su rendimiento potencial.

**4.-Cultivo del algodón:** Este cultivo se somete a un 57.33% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 42.67 %, con lo cual se espera tan solo el 63.54% de su rendimiento potencial.

**5.-Cultivo de la soya:** Este cultivo se somete a un 46.93% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 53.07 %, con lo cual se espera tan solo el 60.31% de su rendimiento potencial.

**6.-Cultivo del Rye Grass:** Este cultivo se somete a un 56.78% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 43.22 %, con lo cual se espera tan solo el 61.75% de su rendimiento potencial.

## **DISCUSIÓN**

El concepto de Agua Virtual considera los requerimientos de agua para la producción de bienes y servicios, incluyendo el embalaje y el transporte hasta los consumidores finales, como lo definen algunos autores, entre ellos John Anthony Allan (1993), citado por Rocha (2016) y otros autores más; sin embargo, este concepto no toma en cuenta los volúmenes reales de agua aplicados a los cultivos en condiciones de escasez de agua generados por los efectos del cambio climático, mucho menos diferencia entre volúmenes netos y brutos realmente aplicados a los cultivos como se realiza en el presente estudio. Las metodologías para calcular las huellas hídricas de los cultivos (huella hídrica verde, huella hídrica azul, huella hídrica gris y huella hídrica total), definido por Hoekstra *et al.*, (2009) y trabajado por Chapagain y Hoekstra (2004) y diversos autores más; no proponen alguna forma para comparar los resultados calculados de las huellas hídricas de los cultivos en alguna zona con los requerimientos de éstos; de tal forma que no se puede saber si dichos valores satisfacen sus requerimientos hídricos para alcanzar su potencial productivo. La creación del Índice de Tensión del Agua (ITA) y el Índice de

Eficiencia del Riego (IER), permite definir dos escenarios, el primero para la Línea Base como Escenario Óptimo (sin escasez de agua para riego) y el segundo para la Condición Real (CR); con lo cual se podrá calificar los resultados de los valores de las huellas hídricas de los cultivos (huellas hídricas reales y potenciales).

En otros trabajos se ha calculado la huella hídrica para el sector agrícola en función de las estadísticas agrícolas de producción, información geográfica e información agroclimática, y a la escala temporal para un año en particular, tal como lo reportó en su publicación Arévalo *et al.*, (2012); sin embargo, el presente trabajo utilizó las estadísticas de producción agrícola del módulo de riego piloto de los últimos diez ciclos agrícolas y se trabajó con los promedios históricos en lo que respecta a los rendimientos unitarios de los cultivos y los volúmenes netos y brutos de agua que realmente se aplicaron a los cultivos en condiciones reales de sequía (CR).

Con respecto al Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI, por sus siglas en inglés), se han desarrollado diversas investigaciones al respecto, todas ellas tratan de cuantificar la falta de humedad en la zona radicular de las plantas y su transpiración en función de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor de agua en el entorno de la planta, tal como lo reporta inicialmente Idso *et al.*, (1981), Jackson *et al.*, (1981), Keener y Kircher (1983), Garrot *et al.*, (1990), todos ellos citados por López *et al.*, (2009).

Por lo tanto, el Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos ha cobrado gran importancia en la programación del riego en tiempo real en regiones áridas y semiáridas, tal como lo reportan Calado *et al.*, (1990); Itier *et al.*, (1993); Anconelli *et al.*, (1994); Jones (1999); Orta *et al.*, (2003); Yuan *et al.*, (2004); Simsek *et al.*, (2005); Erdem *et al.*, (2005); citados por López *et al.*, (2009). Sin embargo, el enfoque empírico del CWSI desarrollado por los investigadores citados con anterioridad no calculan el estrés hídrico total al que se someten los cultivos en todo su ciclo vegetativo y mucho menos estiman el porcentaje de agua que les faltó por aplicar derivado de la escasez de agua que provocan los diversos efectos del cambio climático global y las políticas inadecuadas del manejo de los recursos hídricos; sin embargo, el Índice de Tensión del Agua (ITA) y el Índice de Eficiencia del Riego (IER) creados en la presente investigación científica si calculan el estrés hídrico total al que se someten los cultivo al final de su ciclo agrícola, la

eficacia para suministrarles los requerimientos de riego; así como sus impactos en la producción agrícola.

## **CONCLUSIONES**

Las expresiones matemáticas para calcular el Índice de Tensión del Agua (ITA) y del Índice de Eficiencia del Riego (IER), creadas en función de la evapotranspiración de los cultivos (ET<sub>o</sub>), los volúmenes de agua aplicados (CWU) y las huellas hídricas de los cultivos (HH), permiten evaluar el estrés hídrico total al que se someten los cultivos en los distritos y unidades de Riego durante todo su ciclo vegetativo; lo que se debe principalmente a la falta de agua suficiente y oportuna para riego, ocasionada en gran medida por los efectos del cambio climático global (CCG) y las políticas inadecuadas del manejo de los recursos hídricos.

El Índice de Tensión del Agua (ITA) y el Índice de Eficiencia del Riego (IER) son indicadores multidimensionales que permiten combinar variables ambientales, económicas y sociales para diferenciar las responsabilidades de los diversos actores, desde los productores hasta los funcionarios del mayor nivel, en el manejo del agua con el enfoque de sostenibilidad y sustentabilidad.

El Índice de Tensión del Agua (ITA) y el Índice de Eficiencia del Riego (IER) aportan información importante para hacer un uso integral, sustentable y sostenible del recurso hídrico y hacerle frente a los efectos devastadores del cambio climático global sobre los recursos hídricos en las fuentes de abastecimiento. De esta manera, contribuyen a mejorar la gobernanza del agua y lograr los objetivos de la agenda 2030 por los módulos de riego, distritos de riego y la Comisión Nacional del Agua.

## **LISTA DE REFERENCIAS**

Alonso, S.A., García-Zanz, L., León-Rodrigo, I., García-Gordo, E., Gil-Álvaro, B. y Ríos-Brea, L.

1990. Métodos de Investigación de enfoque experimental.

DOI: <https://www.postgradoune.edu.pe/pdf/documentos-academicos/ciencias-de-la-educacion/10.pdf>

Arévalo, U.D., Lozano-Arango, J. G. y Sabogal-Mogollón, J. 2012. Estudio nacional de Huella

Hídrica Colombia sector agrícola. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y

Humanismo. Núm. 6. p.p. 101-126.

DOI: <http://hdl.handle.net/2099/11915>

- Allen, R.G., Pereira, S.L., Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, Boletín No. 56. FAO. Rome.
- DOI: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Ahmad, A., Raza, A., Hasnain, M. U., Alharby, H. F., Alzahrani, Y. M., Bamagoos, A. A., Hakeem, K. R., Ahmad, S., Nasim, W., Ali, S., Mansour, F., & EL Sabagh, A. (2022). Impact of climate change on agricultural production; Issues, challenges, and opportunities in Asia. *Frontiers in Plant Science*, 13, 925548. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.925548>
- Chapagain, A.K, y Hoekstra, A.Y. 2004. Water Footprints of nations. Unesco-IHE Institute for Water Education.
- <https://research.utwente.nl/en/publications/water-footprints-of-nations>
- Centro Mario Molina. 2016. Física. Programa de educación en cambio climático. Disponible en línea: <https://centromariomolina.org/libro/libros/LibrodeFisica/3/#zoom=z>
- CEPAL. 2020. La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?, Libros de la CEPAL, No. 160 (LC/PUB.2019/23-P), Santiago de Chile.
- Chen, Y., Yang, J., Wang, Y., Qi, J., & Luan, Q. (2023). The impact on climate change perception and adaptation of smallholder concepts: Evidence from a sugarcane community, China. *Environmental Impact Assessment Review*, 102, 107213.
- <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107213>
- CONAGUA. 2018. Estadísticas del agua en México. DOI: [https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- Fernández, P., Vallejo, G., Livacic-Rojas, P. and Tuero, E. 2014. Validez Estructurada para una investigación cuasi-experimental de calidad. Se cumplen 50 años de la presentación en sociedad de los diseños cuasi-experimentales. *Anales de Psicología/Annals of Psychology*. Vol. 30, Núm. 2, 756-771.
- DOI: <https://doi.org/10.6018/analesps.30.2.166911>

- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Müller Schmied, H., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S. I., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X., & Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science* (New York, N.Y.), 371(6534), 1159–1162. <https://doi.org/10.1126/science.aba3996>
- Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual Water Trade, Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12. The Netherlands. [https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Programs/Virtual\\_Water/VirtualWater\\_Proceedings\\_IHE.pdf#page=13](https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Programs/Virtual_Water/VirtualWater_Proceedings_IHE.pdf#page=13)
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. y Mekonnen, M.M. (2009). Water Footprint Manual: State of the Art. Water Footprint NETWORK. Enschede, The Netherlands. [https://www.researchgate.net/profile/Mesfin-Mekonnen/publication/228356003\\_Water\\_footprint\\_manual/links/02bfe50ced11c8dbef000000/Water-footprint-manual.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mesfin-Mekonnen/publication/228356003_Water_footprint_manual/links/02bfe50ced11c8dbef000000/Water-footprint-manual.pdf)
- Hoekstra, A. Y. 2003a. Virtual water: An introduction. In: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12, IHE, Delft, the Netherlands.
- Hoekstra, A.Y. and Mekonnen, M.M. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol.EarthSyst.Sci.*,15,1577–1600. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Hoestra, A.Y. y Mekonnen, M.M. 2012. The water footprint of humanity. *PNAS*. Vol. 109, No. 9, p. 3232-3237  
DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- IPCC. 2001. 1: The Climate System: an Overview. Disponible en línea en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-01.pdf>

- IPCC. 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T. Stocker y otros (eds.), Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC, F. C. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Clim. Chang.
- Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter Jr, P.J.; Reginato, R.J. y Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol. 24:45-55.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Jackson, R.D.; Idso, S.B., Reginato, R.J. y Printer Jr, P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resour. Res. 17:1133. DOI:  
<https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>
- López, L.R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M.A., López-Cruz, I. y Sánchez-Cohen, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. Agricultura técnica en México. Vol. 35. No. 1, P. 97-111  
DOI: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172009000100010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172009000100010&script=sci_arttext)
- Munia, A.H. et al. (2020). Future Transboundary Water Stress and Its Drives Under Climate Change: A Global Study. Earth's Future. Volumen 8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019EF001321>
- Martínez Austria, P. F., & Patiño Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. Tecnología Y Ciencias Del Agua, 3(1), 5-20. Recuperado a partir de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1>
- Murray-Tortarolo, G. (2023). A breviary of Earth's climate changes using Stephan-Boltzmann law. Atmosfera, 37, 17–32. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.53102>
- Rocha, F.A. 2016. El agua virtual en el mundo del siglo XXI. Perfiles de Ingeniería, 1(10). DOI: [https://doi.org/10.31381/perfiles\\_ingenieria.v1i10.433](https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v1i10.433)
- Raj, S., Roodbar, S., Brinkley, C., & Wolfe, D. W. (2022). Food Security and Climate Change: Differences in Impacts and Adaptation Strategies for Rural Communities in the Global South

and North. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 691191.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.691191>

SARH. 1983. Estudio agrológico detallado del Distrito de Riego Núm. 25 Bajo Río Bravo, Tamaulipas. México.

Simsek, M.; Tonkaz, Z.; Kacira, M.; Comlekcioglu, N.; y Dogan, Z. 2005. The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics Under open field conditions. *Agricultural Water Management*. 73:240-252. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.10.013>

Trenberth, K. y Asrar, G. R. 2014. Challenges and Opportunities in Water Cycle Research: WCRP Contributions. *Surv Geophys* (2014) 35:515–532. DOI <https://10.1007/s10712-012-9214-y>

Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The Changing Character of Precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1218.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>

von der Heydt, A. S., Ashwin, P., Camp, C. D., Crucifix, M., Dijkstra, H. A., Ditlevsen, P., & Lenton, T. M. (2021). Quantification and interpretation of the climate variability record. *Global and Planetary Change*, 197, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103399>