



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA
ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

JOSÉ SEBASTIÁN LÓPEZ OSORIO

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. TANIA GUEDELIA NÚÑEZ MAGAÑA

VILLAHERMOSA, TABASCO, MÉXICO.

NOVIEMBRE DEL 2024.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 18 del mes de septiembre del año 2024, los que suscriben **José Sebastián López Osorio** alumno del Programa de **Ingeniería Ambiental** con número de matrícula **192G24179** adscritos a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Ambiental** y titulada "**Modelo de Hargreaves para la estimación de la conectividad hidrológica en la zona urbana Centro, Tabasco**", dirigida por la **Dra. Tania Gudelia Núñez Magaña**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 18 de septiembre 2024.



José Sebastián López Osorio

Nombre y Firma del Tesista



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
MEXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 18 de Septiembre de 2024

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. JOSÉ SEBASTIÁN LÓPEZ OSORIO** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

**UJAT.
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
MEXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

SEPTIEMBRE 18 DE 2024

C. JOSÉ SEBASTIÁN LÓPEZ OSORIO
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
PRESENTE

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO"**, asesorado por la Dra. Tania Gudelia Núñez Magaña, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Miguel Ángel Palomeque de la Cruz, M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera, Dra. Tania Gudelia Núñez Magaña, Dr. Adalberto Galindo Alcántara y M. en C. Manuel Fidel Azueta Domínguez.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE


DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

18 de septiembre de 2024

C. José Sebastián López Osorio
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental.
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su documento de tesis "**Modelo de Hargreaves para la estimación de la conectividad hidrológica en la zona urbana Centro, Tabasco**".

OBSERVACIONES:

Se incluyó citas, se excluyeron bibliografía y fuentes pequeñas (o palabras), y se limitó el tamaño de coincidencias a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	7 %
	17610 palabras, 36 coincidencias y 31 fuentes

Finalmente, se le solicita al **C. José Sebastián López Osorio**, integrar en la versión final del trabajo recepcional (Tesis), este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"


DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p. Dra. Tania Gudelia Núñez Magaña. Directora de tesis
C.c.p. Archivo



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA

Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

Modelo de Hargreaves para la estimación de la conectividad hidrológica en la zona urbana Centro, Tabasco

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Internet	77 palabras — < 1%
2	www.slideshare.net Internet	76 palabras — < 1%
3	docplayer.es Internet	58 palabras — < 1%
4	www.researchgate.net Internet	54 palabras — < 1%
5	repositorio.ucsg.edu.ec Internet	46 palabras — < 1%
6	repositorio.unas.edu.pe Internet	46 palabras — < 1%
7	revistas.chapingo.mx Internet	46 palabras — < 1%
8	www.researchsquare.com Internet	44 palabras — < 1%
9	bibliotecadigital.exactas.uba.ar Internet	39 palabras — < 1%

10	pub.geus.dk Internet	38 palabras — < 1%
11	jwsd.um.ac.ir Internet	37 palabras — < 1%
12	repositorio.utc.edu.ec Internet	37 palabras — < 1%
13	eos.com Internet	35 palabras — < 1%
14	research-portal.uu.nl Internet	34 palabras — < 1%
15	revistas.unal.edu.co Internet	34 palabras — < 1%
16	tesis.unap.edu.pe Internet	34 palabras — < 1%
17	zenodo.org Internet	34 palabras — < 1%
18	cerac.unlpam.edu.ar Internet	30 palabras — < 1%
19	eprints.imdea-agua.org:13000 Internet	29 palabras — < 1%
20	es.slideshare.net Internet	26 palabras — < 1%
21	link.springer.com Internet	26 palabras — < 1%

web.unican.es

22	Internet	26 palabras — < 1%
23	publicaciones.unirioja.es Internet	24 palabras — < 1%
24	arrecife.urjc.es Internet	23 palabras — < 1%
25	redivia.gva.es Internet	20 palabras — < 1%
26	K.-S. Han. "Statistical estimate of the hourly near-surface air humidity in eastern Canada in merging NOAA/AVHRR and GOES/IMAGER observations", International Journal of Remote Sensing, 11/10/2005 Crossref	18 palabras — < 1%
27	repositorio.unne.edu.ar Internet	17 palabras — < 1%
28	www.inia.org.uy Internet	17 palabras — < 1%
29	mafiadoc.com Internet	16 palabras — < 1%
30	redesus.files.wordpress.com Internet	16 palabras — < 1%
31	riunet.upv.es Internet	16 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

DESACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 16 PALABRAS

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 23 de septiembre 2024.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORES en la producción, creación y realización de la obra denominada **“Modelo de Hargreaves para la estimación de la conectividad hidrológica en la zona urbana Centro, Tabasco”** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



José Sebastián López Osorio



Dra. Tania Gudelia Núñez Magaña

TESTIGOS

Manuel Fidel Domínguez Azotla
Manuel F. Domínguez



Manuel Ángel Palomeque



AGRADECIMIENTOS

A mis padres

Con respeto y admiración por apoyarme en cada momento de esta travesía con su amor y cariño brindado.

A mi familia

Quienes me han apoyado y motivado para seguir mejorando personalmente.

A mis Maestros

Les doy gracias por los conocimientos y experiencias que compartían con nosotros y que me han servido como guías para mi formación académica.

A la Doctora Tania

Por esas motivaciones e inspiraciones que me han ayudado para ser una persona más responsable y comprometido con lo que deseo y ser un ejemplo al éxito.

A mis amigos

A todos los que me acompañaron al brindarme su amistad y compartir su preciado tiempo en cada momento de estos años.

A Kenia Leticia

Por ser una maravillosa persona y haberme apoyado

Al comité de revisión

También quiero agradecer al Dr. Miguel, el Maestro Sergio, la Dr. Tania, al Dr. Adalberto y al Maestro Fidel por tomarse el tiempo de revisar el trabajo y los aportes que mejoraron este trabajo.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



DEDICATORIA

“A todas las personas que han sido mi refugio en los momentos difíciles, mi impulso en los momentos de duda y mi alegría en los momentos de triunfo. Su apoyo, amor y confianza han sido el motor que me ha llevado hasta aquí. Este logro es tanto mío como de ustedes, y lo llevo en el corazón con gratitud eterna.”

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.





ÍNDICE GENERAL

Contenido

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEORICO	5
2.1. Modelo de Hargreaves	5
2.1.1. Evapotranspiración Potencial (ET_0)	5
2.1.2. Radiación Solar Incidente (R_s)	6
2.1.3. Evapotranspiración Potencial (ET_0)	8
2.1.4. Radiación Solar Extraterrestre (R_0)	9
III. ANTECEDENTES	12
3.1. Proceso de Evapotranspiración	12
3.2. Proceso de Vaporización	13
3.3. Factores que Promueven la Vaporización	13
3.3.1. Factores Climáticos	13
3.3.2. Variabilidad Térmica	14
3.3.3. Factores Influyentes en el Desarrollo de la Planta	14



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



3.3.4. Tipo de Suelo y Cobertura	15
3.4. Proceso de Transpiración.....	16
3.5. Tipos de Evapotranspiración	17
3.5.1. Evapotranspiración Potencial (ET_0 o ETP).....	17
3.5.2. Evapotranspiración Real (ETR)	17
3.5.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (Etc).....	18
3.5.4. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj).....	18
3.5.5. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0)	19
3.6. MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ETP	20
3.7. MÉTODOS DE MEDICIÓN	21
3.7.1. Lisímetros.....	21
3.7.2. Atmómetros.....	22
3.7.3. Balance Hídrico.....	22
3.7.4. Eddy Covariance	22
3.7.5. Teledetección	23
3.8. Estudios sobre la Medición de la Evapotranspiración.....	24
3.9. Características Climatológicas de la zona en estudio	26
3.10. Hidrología urbana en Tabasco	26
IV. JUSTIFICACIÓN.....	27
V. OBJETIVOS	28
5.1. Objetivo General.....	28
5.2. Objetivos Específicos	28
5.3. Hipótesis	28
VI. METODOLOGÍA.....	29



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



6.1. Área de Estudio.....	29
6.2. Selección del Modelo.....	30
6.3. Obtención de Datos.....	31
6.4. Procesamiento de Datos.....	32
6.5. Aplicación del Modelo de Hargreaves.....	32
6.5.1. Cálculo promedio de las Variables.....	33
6.5.2. Cálculo de la Radiación Solar Extraterrestre (R_0).....	33
6.5.3. Cálculo de la Radiación Solar Incidente (R_s).	34
6.5.4. Cálculo de la ETP (Ecuación Original).	35
6.5.5. Cálculo de La ETP (Ecuación Simplificada).	35
6.5.6. Análisis de Precipitación Acumulada.....	36
6.6. Metodología de la Investigación.....	37
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
7.1. Análisis y Evolución de la Radiación Solar Incidente.....	38
7.2. Precipitación y Evapotranspiración Potencial	41
7.3. Análisis y Evolución de la Precipitación	43
7.4. Evolución de la Evapotranspiración (Ecuación Simplificada).	45
7.5. Evolución de la Evapotranspiración (Ecuación Original).	46
7.6. Análisis y Evolución de la Temperatura.....	47
7.6.1. Construcción de Serie de Tiempo de Temperatura	47
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
IX. REFERENCIAS	53



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de Conversión para Medición de la Evapotranspiración.	10
Tabla 2. Tabla de Radiación solar extraterrestre (R_0) en mm/día (Original en $MJ \cdot m^2 \cdot día$; $1 mm/día = 2,45 MJ \cdot m^2 \cdot día$)	11
Tabla 3. Valores de albedo para diversos tipos de superficies.	16
Tabla 4. Promedios de ET_0 para diferentes zonas agroclimáticas.	18
Tabla 5. Modelos para la estimación de la Evapotranspiración.	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Proceso de Evapotranspiración. Fuente: editada de Zhang et al. (2020).	12
Figura 2. Pérdida de agua mediante la apertura de un Estoma. Fuente: Allen et al. (2006c).	17
Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c aj}$). Fuente: Allen et al. (2006a).	19
Figura 4. Ubicación geográfica de la región de la laguna “Las Ilusiones” en la ciudad de Villahermosa, Centro, Tabasco. Coordenadas (UTM): E 507378.864 y N 1991243.837. Elaboración propia.	29
Figura 5. Ubicación geográfica de la región de la Laguna “El viento” en Centla, Tabasco. Coordenadas (UTM): E 537734.555 y N 2016643.445. Fuente: elaboración propia.	30
Figura 6. Estructura de la metodología general implementada. Fuente: Elaboración Propia.	37
Figura 7. Serie de tiempo de radiación solar incidente.	39



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



Figura 8. Comparación del comportamiento de la radiación solar incidente mensual en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) en la región de las ilusiones y el viento. 40

Figura 9. Precipitación y ETP con la Ecuación Simplificada en las regiones “Las ilusiones” y “El viento”. 42

Figura 10. Precipitación y ETP con la ecuación original en las regiones “Las ilusiones” y “El viento”. 43

Figura 11. Comparación del comportamiento de la precipitación mensual en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) para la región las ilusiones y el viento. 44

Figura 12. Evolución de la evapotranspiración con la ecuación simplificada en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) para la región las ilusiones y el viento. 46

Figura 13. Evolución de la evapotranspiración con la ecuación original en dos periodos (1982-2011) y 82012-2022) para la región las ilusiones y el viento. 47

Figura 14. Serie de tiempo de temperatura para la región las ilusiones y el viento. 48

Figura 15. Serie de tiempo de temperatura mensual en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) para la región las ilusiones y el viento. 49



RESUMEN

La pérdida de recursos hídricos es uno de los desastres naturales asociados al cambio climático. Como medida de acción, este estudio estima la evolución de la conectividad hidrológica vertical en un periodo de 40 años en la región de “Las Ilusiones” y “El Viento” del estado de Tabasco aplicando el modelo de Hargreaves y Samani. Los resultados indican que, en los años 1988, 1992 y 1995, la tasa de ETP obtuvo valores característicos de 1721 mm/año para la región de “Las Ilusiones” y 1699 mm/año para la de “El Viento”. Durante estos años, ambas regiones experimentaron las mayores precipitaciones, con 2749 mm y 2810 mm, respectivamente. Sin embargo, a partir del año 2012, se observó un incremento en la tasa de ETP del 4,39% y una disminución del 28,68% en las precipitaciones. Al análisis de estos resultados se integró el estudio del comportamiento de las variables climáticas estrechamente relacionadas con la ETP, tales como la radiación solar incidente y la temperatura. En los primeros años del estudio, la radiación solar incidente fue superior en la región de “Las Ilusiones”, con un valor promedio de 9,5 MJulios/m²/año. Desde 1997, los valores de radiación solar en la región de “El Viento” comenzaron a aumentar hasta alcanzar el mismo valor que en “Las Ilusiones” en 2013. Mientras tanto, la temperatura se mantuvo relativamente constante durante gran parte del período estudiado. No obstante, a partir de 2012, se observó un aumento en ambos sitios de estudio. Este incremento fue de 1 °C, lo que podría estar relacionado con el aumento de la radiación solar. Finalmente, los resultados muestran un desequilibrio entre la oferta hídrica y la demanda evaporativa, directamente relacionado con el cambio del régimen de precipitaciones y el incremento de la temperatura, por lo que es necesario tomar acciones para promover entornos más sostenibles.

Palabras clave: Evapotranspiración, Variabilidad, Disponibilidad, Caracterización.



ABSTRACT

The loss of water resources is one of the natural disasters associated with climate change. As a measure of action, this study estimates the evolution of vertical hydrological connectivity over a period of 40 years in the “Las Ilusiones” and “El Viento” region of the state of Tabasco applying the Hargreaves and Samani model. The results indicate that, in the years 1988, 1992 and 1995, the ETP rate obtained characteristic values of 1721 mm/year for the “Las Ilusiones” region and 1699 mm/year for the “El Viento” region. During these years, both regions experienced the highest rainfall, with 2,749 mm and 2,810 mm, respectively. However, starting in 2012, an increase in the ETP rate of 4.39% and a decrease of 28.68% in precipitation was observed. The analysis of these results was integrated with the study of the behavior of climatic variables closely related to the ETP, such as incident solar radiation and temperature. In the first years of the study, incident solar radiation was higher in the “Las Ilusiones” region, with an average value of 9.5 MJoules/m²/year. Since 1997, solar radiation values in the “El Viento” region began to increase until reaching the same value as in “Las Ilusiones” in 2013. Meanwhile, the temperature remained relatively constant for much of the period studied. However, starting in 2012, an increase was observed at both study sites. This increase was 1 °C, which could be related to the increase in solar radiation. Finally, the results show an imbalance between water supply and evaporative demand, directly related to the change in the precipitation regime and the increase in temperature, so it is necessary to take actions to promote more sustainable environments.

Keywords: Evapotranspiration, Variability, Availability, Characterization.



I. INTRODUCCIÓN

La conectividad hidrológica es un proceso fundamental para la sostenibilidad ambiental, el equilibrio climático y para el funcionamiento saludable de los ecosistemas (Bautista y Mayor, 2021). Por lo tanto, conocer el comportamiento de los flujos de energía y masa entre la superficie terrestre y la atmósfera es fundamental para poder monitorear el clima y mejorar el cultivo en la industria agrícola. En este contexto, la evapotranspiración que incluye el proceso de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas, emerge como un flujo superficial clave que describe el movimiento del vapor de agua hacia la atmósfera. Una estimación precisa de la evapotranspiración en sistemas agrícolas es esencial para un uso eficiente del agua y una programación precisa del riego, mejorando así la eficiencia en el uso de los recursos hídricos (Ghiat et al., 2021).

Ward (1989) estableció cuatro dimensiones para describir las interacciones en un ambiente fluvial: la longitudinal, lateral, vertical y temporal. La conectividad longitudinal describe las interacciones que ocurre a lo largo del curso del río (aguas arriba y aguas abajo), afectando la distribución y disponibilidad de agua en diferentes partes del río. La dimensión lateral aborda las interacciones entre el río y sus costados, incluyendo las llanuras de inundación, donde las áreas riparias suelen ser muy activas en términos de evapotranspiración debido a la alta disponibilidad de agua y la densidad de vegetación. La conectividad vertical se refiere a la interacción existente entre el río y las aguas subterráneas, influyendo en la disponibilidad de agua en el perfil del suelo, crucial para la evapotranspiración. Finalmente, la dimensión temporal abarca los cambios en los patrones y procesos hidrológicos a lo largo del tiempo. La evapotranspiración varía estacionalmente y anual debido a factores climáticos como la temperatura, la radiación solar, la humedad y la disponibilidad de agua en la superficie terrestre.

Investigaciones recientes como las de Suárez y Vega (2017) y Bautista y Mayor (2021), sostienen que la circulación atmosférica y la formación de precipitación son factores



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



que predominan en el control de la humedad atmosférica y regular la variabilidad climática. Sin embargo, la conectividad hidrológica permite la transferencia de materia, energía y organismos entre los elementos del ciclo hidrológico, permitiendo evaluar el efecto de la actividad antrópica sobre los sistemas fluviales. Consecuentemente, este proceso regula la producción alimentaria y agrícola, además garantizando el desarrollo sostenible y manteniendo la estabilidad ambiental y humana (Espinoza et al., 2021).

En este contexto, los procesos de circulación atmosférica, los periodos y la formación de la precipitación juegan un papel importante para mantener el funcionamiento óptimo de los ecosistemas (Miracle Sol, 2006). Durante los eventos de precipitación, una parte del agua que llega a la superficie del suelo es absorbida por la cobertura vegetal, otra se almacena en embalses y el resto se encuentra en el subsuelo. Este proceso se denomina como distribución del agua, crucial para mantener el equilibrio hídrico en los ecosistemas (Pedro Emilio, 2006).

Según la Comisión Nacional del Agua (2021), México recibe 1,449,471 hm³/año, el 71.4% de esa agua se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2% se distribuye por los ríos o arroyos y el 6.4% del resto se infiltra al subsuelo de forma natural para la recarga de los acuíferos. Esto indica que en México el proceso de mayor preponderancia en la circulación del agua es la evapotranspiración. La evapotranspiración vincula dos procesos esenciales para los ecosistemas: la evaporación llevada a cabo en la superficie y la transpiración realizada por las plantas se ven influenciados por factores naturales como la temperatura, viento, radiación solar, plantas, suelo y estaciones del año (Allen et al., 2006a; Li et al., 2009b).

Aguilera Contreras & Martínez Elizondo (1996), Chávez-Ramírez et al. (2013), Muñoz (2023) y Peña et al. (2001) destacan la importancia de estos elementos en el contexto hidrológico, subrayando su conexión con la mejora de la planificación y gestión de los recursos hídricos. Estos factores son fundamentales en la agricultura para determinar áreas, volúmenes y periodos de riego de las plantas. Esto garantiza un suministro adecuado de



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



agua a la vegetación, impactando la biodiversidad y contribuyendo al ciclo de nutrientes (Pérez Yágüez, 2022).

Bajo este contexto, el proceso de evapotranspiración es crucial para abordar desafíos climáticos ante la disminución de recursos hídricos y asegurar el uso sostenible del agua en diversas aplicaciones esenciales para la vida (Monterroso-Rivas et al., 2021a).

La tecnología resulta ser una herramienta esencial para aumentar la eficiencia del uso del agua en la agricultura y se posiciona como una aliada clave en las estrategias de ahorro de agua (Alcón et al., 2009; Martos-López, 2016). Además, la generación de información precisa sobre la disponibilidad del agua en el suelo previene riesgos naturales a futuro, como inundaciones y sequías (Huntington, 2006). Por esta razón, este proceso se vuelve fundamental en el desarrollo de planes de gestión integral del agua, ordenamiento territorial y generación de conocimiento sobre la evaporación del agua (Magallanes-Quintanar et al., 2017).

En las últimas décadas, las actividades humanas han afectado las precipitaciones y la temperatura, intensificando la radiación solar y aumentando la evapotranspiración potencial (ETP) (Bremauntz, 2004). La temperatura desempeña un papel central y los patrones hidrológicos desafían nuestra capacidad de gestión. El avance del aprendizaje automático ha revolucionado la estimación de la ETP, permitiendo a los investigadores desarrollar herramientas más eficientes para comprender patrones y su impacto en el ciclo hidrológico. En los últimos 20 años, se han empleado diversas metodologías, desde modelos simples hasta los más precisos, seleccionados según la complejidad del área de estudio.

Este progreso en la investigación contribuye al conocimiento y afrontamiento de desafíos ambientales (Hurtado et al., 2002; Dou y Yang, 2018; García Sánchez, 2019). En estas circunstancias Gastelo Roque et al. (2017) y Lima Junior et al. (2016) justifican el empleo del modelo de Hargreaves y Samani (HS) debido a su simplicidad y eficiencia en la estimación de la ETP en situaciones donde no se disponen de los parámetros climáticos



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



necesarios para otros modelos. Este modelo se destaca por su capacidad de ser calibrado según las necesidades específicas, requiriendo solo datos de temperaturas mínimas, máxima y promedio del aire. Investigaciones como las de Almorox et al. (2012) y Sibilia y Sayago (2017) han implementado este modelo con éxito en diversos contextos geográficos y climáticos, respaldando su robustez y aplicabilidad.

El objetivo de esta investigación es evaluar y analizar los procesos de transferencia de agua hacia la atmósfera a lo largo de un periodo de 40 años, empleando el modelo de Hargreaves y Samani. Este modelo es ampliamente reconocido por su precisión y eficiencia en la estimación de las tasas de evapotranspiración, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para el estudio de las dinámicas hídricas en diversas condiciones climáticas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



II. MARCO TEORICO

2.1. Modelo de Hargreaves

El modelo de Hargreaves es una metodología eficiente y confiable que se basa en variables climáticas (Lima Junior et al., 2016). Por lo que, este modelo es ampliamente utilizado para estudios hidrológicos, climáticos, agricultura, ecología e ingeniería ambiental. Otras de las ventajas de este modelo radican en que puede ser aplicado en zonas donde no se cuenta con estaciones meteorológicas o escasos registros históricos de las variables climáticas. Estas características lo convierten en una herramienta factible para poder evaluar la demanda potencial de este recurso hídrico en una región con estas limitaciones (Santiago-Rodríguez et al., 2012; Sibilía & Sayago, 2017).

2.1.1. Evapotranspiración Potencial (ET_0)

El modelo de Hargreaves y Samani cuenta con dos ecuaciones para estimar las tasas de ET_0 . La ecuación simplificada del modelo es la más citada en los diversos estudios debido a su facilidad de uso, debido a que requiere menos datos específicos. Sin embargo, la ecuación original proporciona una estimación más precisa y realista de la evapotranspiración potencial. Aunque la mayor cantidad de variables puede ser una limitación en algunas regiones debido a la falta de datos, la ecuación original es recomendada cuando se busca una precisión más eficaz.

Esta precisión adicional de la ecuación original es crucial en estudios donde los detalles y la exactitud son esenciales si se necesita mayor exactitud. Aunque requiere más datos, su uso se justifica por la mejora en la exactitud de las estimaciones, lo que la convierte en la preferida en investigaciones y aplicaciones donde se dispone de la información necesaria para su aplicación. Sin embargo, la ecuación simplificada se utiliza con frecuencia debido a su simplicidad y menor cantidad de datos requeridos, siendo ideal para zonas donde la disponibilidad de datos es limitada.



- Ecuación Original

En este modelo, la Ecuación 1 se encuentra en función de la radiación solar extraterrestre que se obtiene a través de la Tabla 2 y de la diferencia entre la temperatura media. Esta ecuación proporciona una estimación cuantificada de la cantidad de agua teórica que puede evaporarse y transpirar en un área en un período específico con más exactitud. Texeira et al. (2021) afirman que este modelo es uno de los más adecuados dado a los resultados aproximados y confiables para la estimación de esta variable.

El modelo de Hargreaves se utiliza para estimar la evapotranspiración potencial (ET_0) en función de variables climáticas clave (Hargreaves y Samani, 1985). La ecuación fundamental del modelo es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0135(T_{med} + 17.78)R_s \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria $\frac{mm}{día}$

T_{med} = Temperatura media diaria, °C

R_s = Radiación solar incidente, convertida en $\frac{mm}{día}$

Para poder estimar los valores de ET_0 se necesita determinar la radiación incidente (R_s) que se obtiene a partir de la Ecuación 2.

2.1.2. Radiación Solar Incidente (R_s)

La radiación solar incidente hace referencia a la cantidad de energía radiante proveniente del sol que llega a la superficie terrestre, destacando por ser esencial para que se lleven a cabo los distintos procesos naturales, donde se incluye el proceso de fotosíntesis, el ciclo del agua y la formación del clima, destacando por ser una variable de suma importancia y en muy pocas estaciones del mundo es medida (Gavilán, s. f.). Esta energía se transfiere en la



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



manera de ondas electromagnéticas y esta varía según los diversos factores como la ubicación geográfica, la hora del día, la estación del año y las condiciones atmosféricas presentes (Montero Torres, 2022; Ygos González et al., 2022).

De acuerdo con Aparicio (2020) y Felicísimo y Cepedal (1984), esta energía solar puede dividirse en tres componentes principales:

Radiación Directa: Es la energía que llega directamente a través de los rayos solares a la Tierra sin que esta se disperse a causa de la atmósfera.

Radiación Difusa: Es la radiación que se dispersa en la atmósfera y llega a la superficie terrestre en diferentes direcciones. Debido a esto la radiación difusa es el resultado de la dispersión de la luz solar por las partículas en la atmósfera y por la presencia de nubes.

Radiación Reflejada o Albedo: Es la radiación que se refleja por acción de la superficie terrestre y la presencia de otros objetos en la atmósfera. La cantidad de radiación que se refleja va a depender del tipo de superficie. La unidad típicamente utilizada para medir la radiación solar incidente es el vatio por metro cuadrado (W/m^2).

De acuerdo con Samani (2000), la radiación solar incidente puede ser estimada a partir de Ecuación 2. Esta es directamente proporcional a la radiación solar extraterrestre (R_0) que se encuentra en la tabla 1 y depende de los hemisferios norte y sur, meses y la latitud.

$$R_S = R_0 * KT * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde

R_S = Radiación solar incidente

R_0 = Radiación solar Extraterrestre

KT = Coeficiente

T_{max} = Temperatura máxima diaria

T_{min} = Temperatura mínima diaria



El coeficiente KT (Ajuste empírico de radiación solar), es un valor que se requiere en la Ecuación (2) y puede determinarse mediante datos de presión atmosférica. Sin embargo, Samani (2000) sugiere valores específicos para KT según la ubicación geográfica, para esto recomienda utilizar el valor de 0,162 para regiones adentro (zonas alejadas del mar) y $KT = 0,19$ para regiones en proximidad al mar.

Esta recomendación está basada y justificada en investigaciones anteriores que nos proporciona una opción práctica y ajustada a diferentes condiciones climáticas de cada región.

Es importante tener en cuenta que estos valores son empíricos y podrían ser adaptados en función de datos específicos de la región de interés, si están disponibles.

2.1.3. Evapotranspiración Potencial (ET_0)

- Ecuación Simplificada

$$ET_0 = 0.0023(T_{med} + 17.78)R_0 * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde:

$ET_0 =$ Evapotranspiración potencial diaria $\frac{mm}{dia}$

$T_{med} =$ Temperatura media diaria, $^{\circ}C$

$R_0 =$ Radiación solar extraterrestre, $MJ/m^2 dia$ o $\frac{mm}{dia}$ (En tabla 2)

$T_{max} =$ Temperatura máxima diaria, $^{\circ}C$

$T_{min} =$ Temperatura mínima diaria, $^{\circ}C$

La ecuación simplificada del modelo de Hargreaves es más citada debido a su simplicidad y facilidad de uso. Al utilizar menos variables, es más práctico y accesible, lo que facilita su aplicación en diversas situaciones y regiones donde los datos climáticos pueden ser limitados.



Aunque es menos detallada que la ecuación original, sigue proporcionando estimaciones razonablemente precisas de la evapotranspiración potencial, resaltando por ser preferida en muchos estudios e investigaciones.

2.1.4. Radiación Solar Extraterrestre (R_0)

La radiación solar extraterrestre hace referencia a la energía que una superficie de la tierra recibe, comúnmente es definida como la cantidad de radiación solar que llega a la parte superior de la tierra. Esta radiación se mide en densidad de flujo de radiación solar y sus unidades en el Sistema Internacional son (MJ/m^2) o (Wh/m^2) (García-Badell, 1982).

Por lo tanto, Artiga Miranda (2024) la define como la energía solar incidente en el espacio exterior cerca de la atmósfera terrestre como la energía solar que logra penetrar la atmosfera, haciéndola fundamental en diversos campos de la investigación debido a su interacción en el clima, la meteorología y en el aprovechamiento de la energía. La radiación máxima posible en condiciones atmosféricas ideales, denominada R_0 , se calcula utilizando factores geográficos como la latitud y día. R_0 representa el flujo de energía solar que llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas, permitiendo la transferencia de energía del Sol a la superficie terrestre.

Dada a la posición del sol esta va a variar en el transcurso del día al igual que las distintas estaciones del año. Estas variaciones dependen de la geometría de la órbita anual de la Tierra alrededor del Sol y de la rotación diaria de la Tierra sobre su eje. La inclinación de los rayos solares incide sobre una superficie y proporciona lo necesario para la determinación de la intensidad de la radiación solar que esta recibe. Si los rayos solares se proporcionan perpendicularmente sobre la superficie, esta recibe aún más radiación solar. En muchas investigaciones esta se denota como S y está relacionada con el parámetro solar S_0 (densidad de flujo de radiación recibida en una superficie perpendicular a los rayos solares). Esta relación depende de la inclinación de los rayos solares, también conocida como altura solar (Carrascosa y Inmaculada, 2016).



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



En la Tabla 2, se presentan los valores de R_o expresados en mm/día. Estos valores dependen de la altitud, los meses del año y la ubicación del área de estudio proporcionados para el hemisferio norte y sur. Dado a que los valores originales de R_o se expresan en MJ/m² día (una medida de energía), pero se convierten a mm/día (una medida de agua).

Esta conversión se realiza utilizando el calor latente de vaporización del agua a temperatura ambiente, que es aproximadamente 2.45 MJ/kg. Dado que 1 mm de agua en una superficie de 1 m² equivale a 1 litro o 1 kg de agua, se puede hacer la conversión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Para } 1 \text{ MJ/m}^2/\text{día se tiene: } \frac{\text{mm}}{\text{día}} &= \frac{\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ día}}}{\frac{2.45 \text{ MJ}}{\text{kg}}} = \\ &= \frac{\text{kg MJ}}{2.45 \text{ MJ m}^2 \text{ día}} = \frac{\text{kg}}{2.45 \text{ m}^2 \text{ día}} = \\ &= \frac{\text{mm}}{2.45 \text{ m}^2 \text{ día}} \approx 0.408 \frac{\text{mm}}{\text{día}} \end{aligned}$$

Allen et al. (2006c) proporciona en la tabla 1 los factores de conversión para representar la evapotranspiración en diferentes unidades, permitiendo convertir entre distintas formas de medir la cantidad de agua que se evapora o transpira desde una superficie.

Tabla 1. Coeficientes de Conversión para Medición de la Evapotranspiración.

	Altura de agua	Volumen por unidad de área		Energía por unidad de área
	Mm día ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	l s ⁻¹ ha ⁻¹	MJ m ⁻² día ⁻¹
1 mm día ⁻¹	1	10	0.116	2.45
1 m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	0.1	1	0.012	0.245
1 l s ⁻¹ ha ⁻¹	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ m ⁻² día ⁻¹	0.408	4.082	0.047	1

Fuente: Allen et al. (2006c)



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



Tabla 2. Tabla de Radiación solar extraterrestre (R_0) en mm/día (Original en $MJ \cdot m^2 \cdot día$; $1 \text{ mm/día} = 2,45 \text{ MJ} \cdot m^2 \cdot día$)

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.6	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	15.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.5	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Fuente: Allen et al. (1998b).



III. ANTECEDENTES

3.1. Proceso de Evapotranspiración

El proceso que constituye la pérdida de agua desde el suelo superficial hacia la atmósfera, es denominado como evapotranspiración y es uno de los componentes más importantes en el ciclo hidrológico (Domingo et al., 2003).

Este proceso principalmente se divide en dos; la evaporación ocurre cuando el agua cambia de su estado líquido o sólido a gaseoso, esto se debe al cambio que ocurre en las fluctuaciones y variaciones de la temperatura del aire. En cuanto al proceso de transpiración, este se lleva a cabo a través de la cobertura vegetal, este ocurre durante la apertura de las estomas, la combinación de estos dos procesos naturales está estrechamente ligados a la temperatura y las condiciones naturales del suelo y la cobertura vegetal (Allen, 1998a). A continuación, en la figura 1 se observa el proceso de evapotranspiración:



Figura 1. Esquema del Proceso de Evapotranspiración. Fuente: editada de Zhang et al. (2020).



3.2. Proceso de Vaporización

La evaporación es definida como el proceso físico donde el agua experimenta un cambio en su estructura física y química, esto sucede cuando el agua pasa de estado líquido o sólido a gaseoso. Este proceso principalmente inicia cuando las moléculas de agua que se encuentran expuestas a la superficie se cargan lo suficiente de energía térmica. Esta energía se puede obtener de diferentes fuentes, como la radiación solar, la temperatura del aire, el viento y la presión de vapor en la atmósfera, principalmente inicia cuando las moléculas de agua alcanzan una energía cinética lo suficientemente alta para romper sus enlaces intermoleculares y convertir el agua en vapor. Esto ocurre en cualquier cuerpo de agua y principalmente este proceso se desencadena cuando las moléculas de agua adquieren suficiente energía térmica, ya sea de manera natural en el entorno o a través de intervenciones humanas (Barco et al., 2000; Allen et al., 2006c).

3.3. Factores que Promueven la Vaporización

3.3.1. Factores Climáticos

Orsini (1982), Allen et al. (2006c) y Hidalgo-Sánchez et al. (2021) explican los factores climáticos que influyen directamente en el proceso de evaporación como;

- La radiación solar proporciona la cantidad de energía que se necesita para evaporar el agua, dependiendo de la intensidad en la que se presente esta afectara directamente la tasa de evaporación.
- Las temperaturas del aire entre más altas se encuentren, la capacidad del aire para retener vapor de agua aumentara considerablemente.
- La diferencia entre la presión del vapor del agua en la superficie y la atmósfera resultara en una mayor velocidad de evaporación. Cuando la presión de vapor en la atmósfera es más alta, el aire circundante se satura, ralentizando el proceso de ET.
- La velocidad del viento facilita el enfriamiento, pues las moléculas de agua que se evaporan absorben energía térmica, reduciendo la temperatura del líquido restante.



- Precipitación: Las lluvias influyen la cantidad de agua disponible para evaporación. Altas precipitaciones incrementan el nivel de humedad del suelo y consumo de las plantas y, por ende, la cantidad de agua disponible para evaporarse.

3.3.2. Variabilidad Térmica

Calcular la variabilidad térmica nos permite interpretar los cambios en la temperatura a lo largo del tiempo, así como las variaciones mensuales, estacionales y anuales. Sin embargo, las temperaturas cambian constantemente dependiendo de los factores locales como la topografía y la latitud (Olave-Solar et al., 2008).

Baethgen & Martino (2000) mencionan otros factores que provocan cambios en la temperatura, donde las actividades humanas han afectado y alterado la composición química de la atmósfera, debido a este cambio el balance de la radiación solar se ha visto afectado. La energía solar que llega a la tierra se transforma en calor, gran parte se devuelve hacia la atmósfera, donde gases como CO₂, N₂O, CH₄ y O₃ absorben ese calor, este calor mantiene la temperatura terrestre gracias al efecto invernadero natural. Desde el inicio de la era industrial, la dependencia de los combustibles fósiles, el uso desmedido de ellos y sumándole la deforestación, en los últimos años han aumentado las concentraciones de estos gases, intensificando el efecto invernadero y elevando la temperatura a nivel global. Según el IPCC, la temperatura del aire ha incrementado entre 0.3 y 0.6 °C desde finales del siglo XIX, y se estima un aumento adicional de entre 1 y 3.5 °C para el año 2100 provocando en los eventos cambios extremos, alterando los patrones de precipitación y afectando la temperatura global.

3.3.3. Factores Influyentes en el Desarrollo de la Planta

Otro de los factores relacionados con la evapotranspiración incluye las características del cultivo, el manejo y el entorno de crecimiento, el tipo y variedad del cultivo al igual que la etapa de desarrollo. Marín Morales (2018) menciona que Mitscherlich y Spillman demostraron que para el crecimiento óptimo de las plantas se debe cuando todos los factores necesarios están presentes en las cantidades adecuadas.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Allen et al. (2006c) define otros factores incluyen como:

- Factores climáticos como la precipitación, temperatura, y energía radiante.
- Factores bióticos genéticos y cultivos asociados.
- Factores como las características físicas y químicas del suelo.
- Factores como las características del cultivo, el manejo y entorno de desarrollo.
- Factores específicos como la salinidad o baja fertilidad del suelo, uso inadecuado de los fertilizantes, los suelos duros o impermeables y la falta del control de las enfermedades y parásitos que afectan gravemente el cultivo.

3.3.4. Tipo de Suelo y Cobertura

El tipo de suelo, la cobertura vegetal y la disponibilidad de agua están influenciada para llevar a cabo el proceso de la evapotranspiración, donde la lluvia, el riego y el ascenso capilar mantienen la superficie del suelo húmeda, pero en condiciones de escaso reabastecimiento, la evaporación se ve afectada por las variables meteorológicas. Sin el líquido necesario, la evaporación disminuye rápidamente y con ello el ciclo hidrológico (Allen et al., 2006c; Barco et al., 2000).

Por ejemplo, la Tabla 3 presenta los valores de albedo según los tipos de superficies, ilustrando cómo diferentes superficies reflejan la radiación solar de manera distinta, lo que a su vez afecta la tasa de evaporación.



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



Tabla 3. Valores de albedo para diversos tipos de superficies.

Tipos de Superficies	Subtipos	Albedo
Suelos	Arena fina	0.37
	Suelo negro seco	0.14
	Campo arado húmedo	0.14
	Suelo húmedo negro	0.8
Superficies de agua	Nieve densa limpia y seca	0.86-0.95
	Granja leñosa, cubierta de Nieve	0.33-0.40
	Hielo marino	0.36
	Capa de hielo con cubierta de agua	0.26
Vegetación	Trigo de invierno	0.16-0.23
	Robles	0.18
	Bosque caducifolio	0.17
	Bosque de pinos	0.14
	Pradera	0.12-0.13
	Pantano	0.10-0.14

Fuente: Barrett (2013).

3.4. Proceso de Transpiración

La transpiración es un proceso mediante el cual el agua que se encuentra almacenada en los tejidos de las plantas se transforma en vapor que se libera hacia la atmósfera. Este intercambio ocurre mediante la apertura en los estomas. Ocurre como pequeñas grietas en las hojas y durante ese proceso también son liberados otros gases. Para llevarse a cabo este proceso, primero las plantas deben absorber el agua y nutrientes desde las raíces, posteriormente transpórtalos hacia las hojas y donde se llevará a cabo la vaporización. La apertura de estos es fundamental para la salida del vapor y gases hacia el exterior. Durante este proceso existen factores ambientales como la radiación solar, el viento, temperatura, humedad atmosférica, vegetación circundante, tamaño de la planta y tipo de planta, disponibilidad de agua y el tipo de suelo son claves para una estimación precisa de la Evapotranspiración Potencial, ya que están íntimamente relacionados con este proceso (Allen et al., 2006c).



La Figura 2 muestra una representación esquemática de una estoma y los diferentes componentes presentes que están involucrados en el proceso de transpiración.

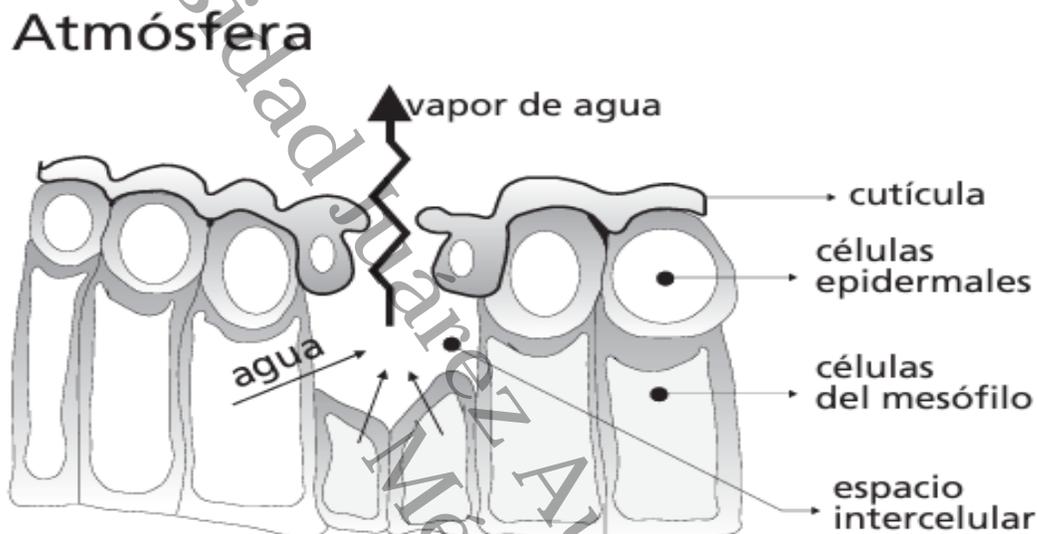


Figura 2. Pérdida de agua mediante la apertura de un Estoma. Fuente: Allen et al. (2006c).

3.5. Tipos de Evapotranspiración

3.5.1. Evapotranspiración Potencial (ET_0 o ETP)

Definida como la máxima cantidad de agua en teoría que se evapora y transpira en cualquier superficie terrestre, en especial en una superficie con cubierta vegetal o sobre un suelo en condiciones ideales sin problemas de agua (Thornthwaite, 1948).

3.5.2. Evapotranspiración Real (ETR)

La evapotranspiración real (ETR) hace representación a la cantidad de agua real que se transfiere de la superficie terrestre a la atmósfera en determinadas áreas.



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



Este proceso se ve influenciado por factores como la disponibilidad de agua y la cobertura vegetal. Cabe destacar que la ETR en ocasiones puede ser menor que la evapotranspiración potencial (ETP) cuando existen limitaciones en estos factores (Sánchez et al., 2005). Las variables climatológicas y condiciones de la zona son factores determinantes. La siguiente tabla incluye estimaciones de los rangos de valores necesarios para las diferentes zonas agroclimáticas.

Tabla 4. Promedios de ET0 para diferentes zonas agroclimáticas.

Temperatura media diaria	Fría: en torno a 10°C (50°F), mm/día	Moderada: en torno a 20°C (68°F), mm/día	Cálida: más de 30°C (86°F), mm/día
Húmeda y subhúmeda	2-3	3-5	5-7
Árido y semiárido (tropical/subtropical)	2-4	4-6	6-8
Húmeda y subhúmeda (zona templada)	1-2	2-4	4-7
Árida y semiárida (zona templada)	1-3	4-7	6-9

Fuente: Allen et al. (2006a).

3.5.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (Etc)

La Etc se refiere a esa cantidad total de agua que se requiere en un cultivo de estudio bajo condiciones estándar ideales para su desarrollo y crecimiento óptimo.

3.5.4. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj)

Hace referencia a la cantidad de agua que un cultivo necesita para su crecimiento y desarrollo en condiciones que no son óptimas (Allen et al., 1998b). Estas condiciones pueden incluir la



presencia de plagas y enfermedades, suelos que no son lo suficientemente adecuados, salinidad del suelo baja o alta, malezas, baja fertilidad del suelo y disponibilidad de agua, ya sea por exceso o por falta de ella (Allen et al., 2006c).

3.5.5. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0)

La ET_c se define como la cantidad de agua que se evapora y transpira en un cultivo de estudio que se utiliza como referencia, desarrollado en condiciones climáticas óptimas para su crecimiento adecuado (Allen et al., 2006a).

A continuación, se muestra una representación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) en condiciones estándar (ET_c) y en condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$).

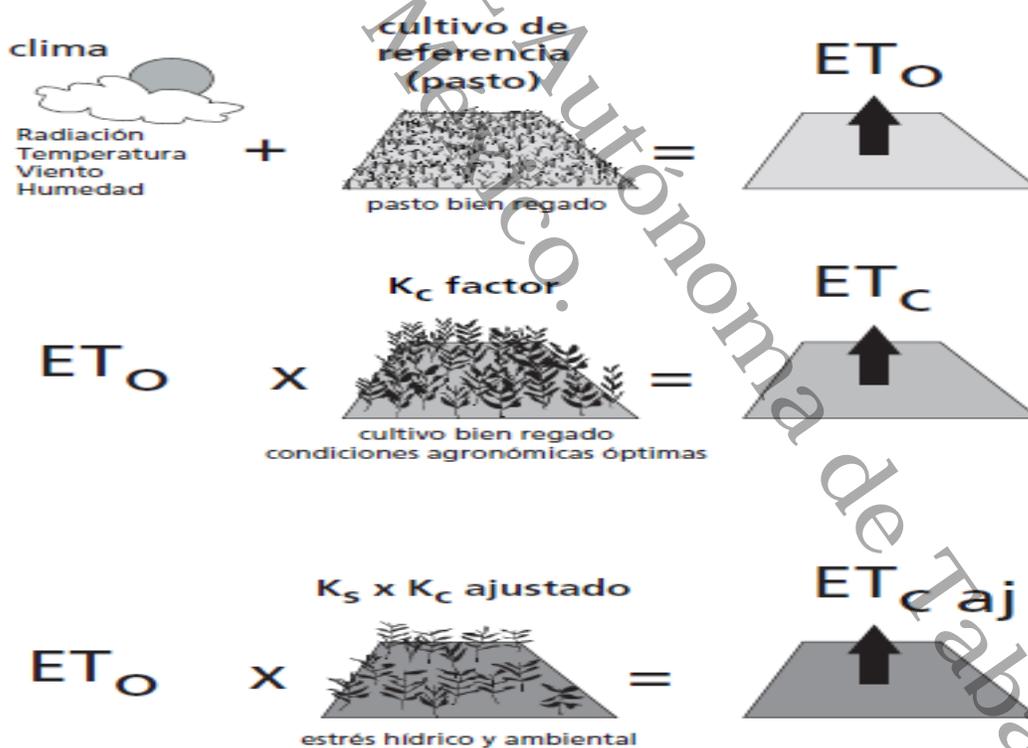


Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$). Fuente: Allen et al. (2006a).



3.6. Modelos para la Estimación de la ETP

Existen diversos modelos matemáticos que nos permiten estimar la Evapotranspiración Potencial en diversos estudios hidrológicos y agrícolas. La exactitud de estos modelos varía en función del número y tipo de variables requeridas, así como de la calidad de la información disponible. La correcta aplicación de un modelo específico depende de la disponibilidad y precisión de los datos. A continuación, se presentan algunos ejemplos de modelos comúnmente utilizados:

Tabla 5. Modelos para la estimación de la Evapotranspiración.

Autor	Variables Necesarias	Ecuación	Datos Adicionales	Fuente
Thornthwaite	Temperatura y índice de calor anual	$ETP = 1.6 \left[\frac{10T_a}{I} \right]^a$ $I = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{ai}}{5} \right]^{1.5}$ $a = 0.49 + 0.01791I - 0.0000771I^2 + 0.000000675I^3$	La latitud se obtiene de tabla por horas solares	[1]
Jense-Haise	Temperaturas, Altitud y Radiación Solar	$ET_0 = R_s * (0.025 * T_m + 0.08)$	Radiación Solar se estima a partir de tablas	[2]
Blaney-Criddle	Temperaturas	$ETP = p((0.46 * T_{med}) + 8)$	Coficiente que depende del sol (KT, R0, RS).	[3]
Turc	Temperatura y Horas Reales del Sol	$ETP = 0.013 * (R_s + 50) * \left(\frac{T_m}{T_m + 15} \right) * 1 + \left(\frac{65 - HR}{120} \right)$	Radiación Global incidente calculada	[4]
Hargreaves-Samani	Temperatura	$ET_0 = 0.0135 (T_{med} + 17.78)R_s$ $ET_0 = 0.0023 (T_{med} + 17.78)R_0 * (T_{max} - T_{min})^{0.5}$	Valores definidos por mes, latitud y hemisferio	[5]
Penman Montheit	Temperatura, Horas Reales del Sol, Velocidad del Viento y Humedad Relativa	$ETP = f * E_0$ $E_0 = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) * \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right) + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) * f u_2 * (e_s - e_a)$	Parámetros que se obtienen en tablas	[6]



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



Priestley-Taylor	Radiación neta (RN)	$ET_0 = 1.26 * \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) * (R_n - G)$	Constante psicométrica, pendiente de la curva de saturación de vapor Y flujo de calor del suelo	[7]
-------------------------	---------------------	---	---	-----

Fuente: elaboración propia basado en [1] Thornthwaite (1948), [2] Rosenberg et al. (1983), [3] Dunne y Leopold (1978), [4] Correa Frías y Merlet Bádilla (1997), [5] Hargreaves y Samani (1985), [6] Sánchez (1992) y [7] Jensen et al. (1990).

3.7. Métodos de Medición

Existen diferentes formas de estimar las tasas de evapotranspiración, comúnmente esta se representa en mm/tiempo y la aplicación respectiva de cada uno será diferente respecto a las condiciones naturales que se encuentre en el área de estudio seleccionado.

Cherlinka (2023) menciona cuáles son los diversos métodos con el propósito de estimar el proceso de la evapotranspiración. A continuación, se describen cuáles estos métodos:

3.7.1. Lisímetros

Para obtener resultados más precisos y confiables en los estudios hidrológicos y agrícolas, los investigadores y agricultores recurren al uso de lisímetros, es considerado uno de los instrumentos más exactos en comparación con otros métodos convencionales (Villalobos Martín, 1988). Este dispositivo tiene una forma cilíndrica o también de caja, que se coloca bajo el suelo superficial, en su interior se inserta una muestra de suelo junto con las plantas a utilizar en la superficie del sistema. Este instrumento permite una representación más fiel de las condiciones naturales, lo que facilita el estudio de la interacción entre el suelo y las plantas, de igual manera tomando en cuenta la influencia de las condiciones naturales en estos procesos. Particularmente los lisímetros están equipados con sensores para la humedad y una balanza para medir los cambios de peso en el suelo, lo que es crucial para obtener datos más precisos sobre la entrada y salida de agua en el dispositivo (Allen et al., 2006a).



3.7.2. Atmómetros

El atmómetro es un instrumento que se utiliza especialmente para poder calcular la pérdida de agua en la superficie de un área. Este instrumento cuenta con un recipiente con agua y una superficie de evaporación en forma de placa que se encuentra expuesta al aire libre. El agua que contiene, está continuamente se evapora del plato. La pérdida de agua del recipiente se relaciona con la tasa de evapotranspiración en la ubicación exacta donde se coloca el atmómetro (Cherlinka, 2023).

3.7.3. Balance Hídrico

La aplicación de este método se utiliza comúnmente en zonas de estudios con áreas extensas donde los factores como la precipitación, flujo de la temperatura, capacidad del suelo, cobertura vegetal y profundidad de las raíces son los factores predominantes en el comportamiento y fluidez del agua y donde la presencia de otras variables naturales es mínima. Su aplicación se basa en una estimación confiable sobre la cantidad promedio de agua perdida en la evapotranspiración. Es un método muy útil y eficaz en situaciones donde se presentan limitaciones para la obtención de los datos requeridos, además proporciona una estimación considerable sobre la pérdida de agua del suelo y planta. Sin embargo, su aplicación requiere una consideración de las características específicas del área de estudio para su implementación sea eficaz (Santillán Gutiérrez et al., 2013; Schosinsky, 2006; Souza et al., 2006).

3.7.4. Eddy Covariance

Principalmente este método se basa especialmente en un equilibrio energético, evitando medir cada componente del balance individualmente para determinar la ETP. Para este proceso se inicia insertando sensores sobre la superficie vegetal, así permitiendo poder estimar la pérdida de agua en las plantas sin presentar problemas en la superficie del suelo. Constantemente mide la velocidad del viento en tres direcciones y los cambios del vapor de agua en la atmosfera. Sin embargo, se conoce que la salida de energía del suelo difiere de la



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



entrada de energía y en pocas veces se logra un equilibrio óptimo y perfecto entre las entradas y salidas. Este método resulta ser útil en las estimaciones de la evapotranspiración, destacando por ser una técnica precisa que ofrece ventajas significativas sobre otros modelos para la medición, destacando en una estimación a nivel de ecosistemas, evaluar intercambios en todo el ecosistema, cubre una amplia variedad de cobertura a diferentes medidas integradas y diversas escalas temporales, mínima alteración, especialmente en entornos complejos, aunque su implementación puede ser desafiante y costosa (Reverter, 2008; An et al., 2017; Burba, 2013; Denager et al., 2020).

3.7.5. Teledetección

El uso del método de teledetección para el análisis de la evapotranspiración a grandes escalas geográficas, últimamente se ha vuelto más popular en la agricultura debido al cambio climático que afecta los cultivos permitiendo estimar la evapotranspiración diaria real. Este método se basa a través de la evaluación de datos meteorológicos satelitales, incluyen información sobre la vegetación del área e infrarroja térmica que permite a los agricultores conocer la cantidad de agua perdida en las cosechas en determinados periodos (Sánchez et al., 2005; Gordillo et al., 2014; Li et al., 2014a; Skidmore et al., 2015).

Sin embargo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se destaca como valores adicionales que son importantes para calcular las tasas de pérdida, dado a que está ligada durante este proceso de evapotranspiración potencial, en especial en cada combinación única en la vegetación acumulada durante el periodo vegetativo (Cihlar et al., 1991).



3.8. Estudios sobre la Medición de la Evapotranspiración

Diversos autores han utilizados diferentes modelos en estudios relacionados con la ETP para diversas zonas de estudios, aplicando el modelo necesario dependiendo de sus limitaciones. Pereyra Díaz et al. (2011) llevaron a cabo su estudio en la cuenca del río La Antigua, localizada en el suroeste del Golfo de México. Su investigación se basó en la evapotranspiración real (ETR) para distintos escenarios climáticos. Para esto se desarrollaron mapas de ETR para un escenario base en un periodo establecido (1961-1990) y para escenarios futuros se les denominaron (A2 y B2). La información se obtuvo de 16 estaciones climatológicas con registros de al menos 15 años en el periodo base entre los años 20 y 50. Los modelos de temperatura y precipitación utilizados provenientes de los modelos globales ECHAM, GFDLR y el modelo regional PRECIS. Para esto se aplicaron los modelos de Turc, Coutage y Hargreaves. Se observó un incremento en la ETR en los escenarios futuros comparado con el escenario base. Estos hallazgos que se obtuvieron sugieren que, con el aumento de temperatura proyectado, la ETR incrementará considerablemente en la cuenca, con máximos en las zonas bajas y mínimos en las áreas montañosas. Lo cual, este incremento debe ser considerado para la planificación y gestión de los recursos hídricos para usos agrícolas, industriales y urbanos.

Monterroso-Rivas et al. (2021), realizaron un análisis en México, enfocándose en la distribución espacial de la evapotranspiración potencial (ETP) y la duración del periodo de crecimiento (PECRE) bajo condiciones climáticas actuales y futuras. Para esto hicieron uso del modelo de Penman-Monteith para calcular la ETP mensual y determinar el inicio, fin y duración del PECRE. Sus resultados revelaron un incremento generalizado de la ETP debido al aumento de las temperaturas y menor humedad relativa. Dedujeron que las regiones con ETP menores a 1000 mm anuales podrían ver una ligera disminución, mientras que aquellas con ETP superiores a 1000 mm aumentarían en promedio un 20% para 2040-2069 y casi un 50% para 2070-2099. A nivel estatal, se observaron variaciones en el PECRE, sugiriendo la necesidad de ajustar la planificación agrícola y la gestión del



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



agua para mitigar los efectos del cambio climático y evitar impactos adversos a futuro.

Sosa y Ramírez (2020) basaron su estudio en el estado de Tabasco sobre la producción de cacao, una región clave para este cultivo en México. Analizaron los posibles efectos del cambio climático para esta área entre los años 2015 y 2039, encontrando que las temperaturas promedio aumentarían en 1°C y que las precipitaciones anuales disminuirían entre 100 y 200 mm. Este cambio provocaría que durante 4 a 5 meses al año las precipitaciones caigan por debajo de los 100 mm. Estos cambios climáticos se traducirían en un incremento de la evapotranspiración potencial (ETP) entre 3 y 5 meses, específicamente de enero a mayo. Los efectos adversos de esta situación incluyen una menor floración, producción de vainas de cacao más pequeñas y una maduración temprana del fruto, lo cual podría causar pérdidas significativas en el sector agrícola de la región. Estos resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de manejo y adaptación para mitigar el impacto del cambio climático en la producción de cacao.

Sin embargo, Cai et al., (2015) explican que estos estudios proporcionan una comprensión más completa de los impactos del cambio climático en la gestión del agua y la agricultura. Los requisitos de agua para uso agrícola, su disponibilidad y calidad han sido afectados por el aumento de la temperatura, lo que reduce el rendimiento de los cultivos y aumenta el riesgo de desaparición a largo plazo. Es crucial considerar las tendencias climáticas y los fenómenos extremos en estudios locales, regionales y globales para gestionar eficazmente estos impactos. A pesar de la incertidumbre en las predicciones del cambio climático, estos estudios son fundamentales para la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias de adaptación adecuadas.



3.9. Características Climatológicas de la zona en estudio

Según la información proporcionada en la página “Regiones de Tabasco” (s.f.), el estado de tabasco se divide en 17 municipios, repartidos en dos regiones principales, son distintas debido a su cuenca hidrográfica, lo cual se encuentran: la Región del Grijalva y Usumacinta, cinco regiones productivas o subregiones, como la Sub Región Centro, Chontalpa, Sierra, Pantanos y de los Ríos, su capital Villahermosa, ubicada en el Centro Tabasco. El 95.5% de la superficie del estado presenta un clima cálido húmedo, el resto 4.5% es clima cálido subhúmedo hacia la parte este del estado. El clima cálido-húmedo con lluvias abundantes en verano. La temperatura media anual es de 33.6°C, las temperaturas máximas son en mayo (29.8°C) y las mínimas en diciembre y enero (22.8°C). Las precipitaciones anuales son de 2,237 mm, las máximas en septiembre (300 mm) y mínimas en abril (50 mm). Las velocidades de viento registradas pueden alcanzar las máximas en octubre y noviembre (hasta 30 km/h), mientras las más bajas son en junio con velocidades de hasta 18 km/h.

3.10. Hidrología urbana en Tabasco

El estado de Tabasco se caracteriza por su extensa red hidrológica, la cual juega un papel clave en el drenaje del 30% del agua superficial de México. Los ríos caudalosos y las planicies palustres del estado son responsables de la creación de áreas inundadas durante la mayor parte del año, que a su vez albergan lagunas y una gran diversidad de ecosistemas, incluyendo vegetación acuática y manglares. Estas condiciones hidrológicas determinan el uso del suelo en las planicies aluviales, afectando actividades humanas como la agricultura debido a frecuentes inundaciones. Entre los recursos hídricos más destacados se encuentran el río Grijalva y otros cuerpos de agua importantes como Samaria, Carrizal y río Viejo, así como lagunas notables como las Ilusiones, El Camarón y El Negro, que cubren un 6.4% del área y son cruciales para la región (Lopez-Castañeda, 2019).



IV. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, numerosos estudios hidrológicos han abordado los posibles efectos del cambio climático a nivel global. La región del Estado de Tabasco, rica en recursos naturales y abundante en agua, enfrenta crecientes problemas en los recursos hidrológicos. A pesar de los estudios previos sobre hidrología en la región, la carencia de información sobre la evapotranspiración y sus posibles impactos crean un problema alarmante. La limitada disponibilidad de datos en las áreas de estudio destaca la importancia de comprender el dinamismo del agua para establecer estrategias para abordar los problemas relacionados con este recurso esencial y para planificar el crecimiento urbano de manera más sostenible.

Este problema adquiere aún mayor relevancia al considerar el crecimiento poblacional exponencial y los desafíos planteados por el cambio climático que demandan una gestión ineficiente del recurso hídrico. La viabilidad de nuestra investigación se basa en la aplicación del modelo de Hargreaves y Samani, reconocido por su simplicidad y eficiencia, especialmente en lugares con limitada disponibilidad de datos climáticos, un factor crucial en la gestión del agua.

Los resultados de esta investigación proporcionarán información esencial para una gestión más efectiva de los recursos hídricos. Esta información beneficiará a los investigadores, también será de gran utilidad para la comunidad en general permitiendo mejorar la conservación de los cuerpos de agua y poder optimizar la planificación y el uso del agua en la región de Tabasco desde una perspectiva metodológica. De igual manera este estudio contribuirá significativamente al avance en los campos de la hidrología y la agricultura proporcionando un conocimiento teórico valioso sobre la conectividad hidrológica en entornos urbanos sirviendo como una base sólida para futuras investigaciones y permitirá desarrollar nuevas habilidades de investigación y análisis.



V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Evaluar la conectividad hidrológica en el área urbana del centro, Tabasco, durante un periodo de 40 años mediante la aplicación del modelo de Hargreaves-Samani para establecer las características de transferencia de agua hacia la atmosfera y comprender su evolución a lo largo del tiempo.

5.2. Objetivos Específicos

- Construir una base de datos de las variables hidrometeorológicas de la serie de tiempo 1982-2022.
- Estimar la ETP en la laguna las ilusiones de la zona urbana de la durante 40 años.
- Estimar la ETP en la laguna “el Viento” Centla, tabasco durante 40 años.
- Analizar los resultados con los obtenidos en el área de la laguna el Viento y la laguna las ilusiones en la zona urbana de Villahermosa, Tabasco.

5.3. Hipótesis

La pérdida de agua por Evapotranspiración (ETP) ha aumentado en relación con la cantidad de agua recibida, afectando los patrones del ciclo hidrológico en el Estado de Tabasco durante los últimos 40 años. Este aumento se atribuye principalmente al incremento de la temperatura debido al cambio climático. Se espera que este fenómeno se refleje en variaciones significativas en las tasas de ETP, que podrían explicar la presencia de eventos de sequía meteorológica en la región.



VI. METODOLOGÍA

6.1. Área de Estudio

La selección del área de estudio incluye dos regiones que contienen los cuerpos de agua: la laguna “Las Ilusiones” (Figura 4) y “El Viento” (Figura 5). La selección de estas dos áreas se sustentó por la influencia urbana que recibe la laguna “Las Ilusiones” y la región de la laguna “El Viento” por encontrarse en un área protegida y con menor intervención humana. Esto permitirá comparar e identificar los impactos sobre las etapas de desarrollo del ciclo hidrológico en regiones con influencia urbana.

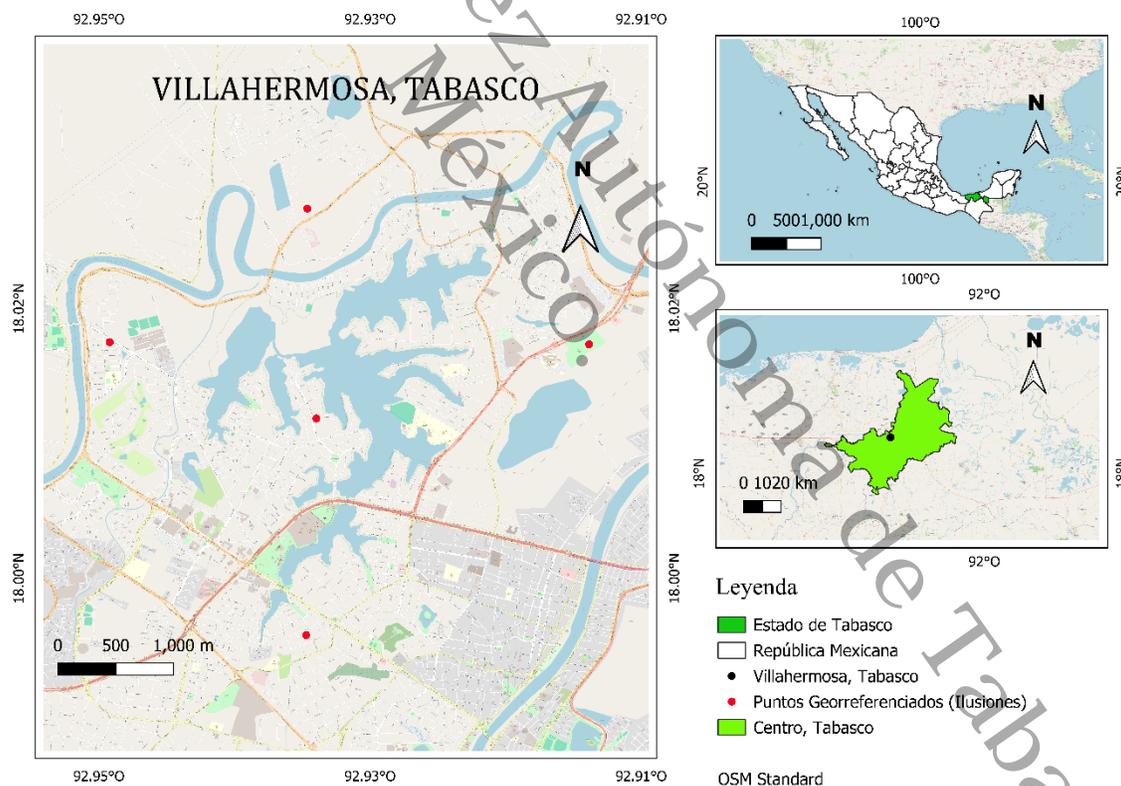
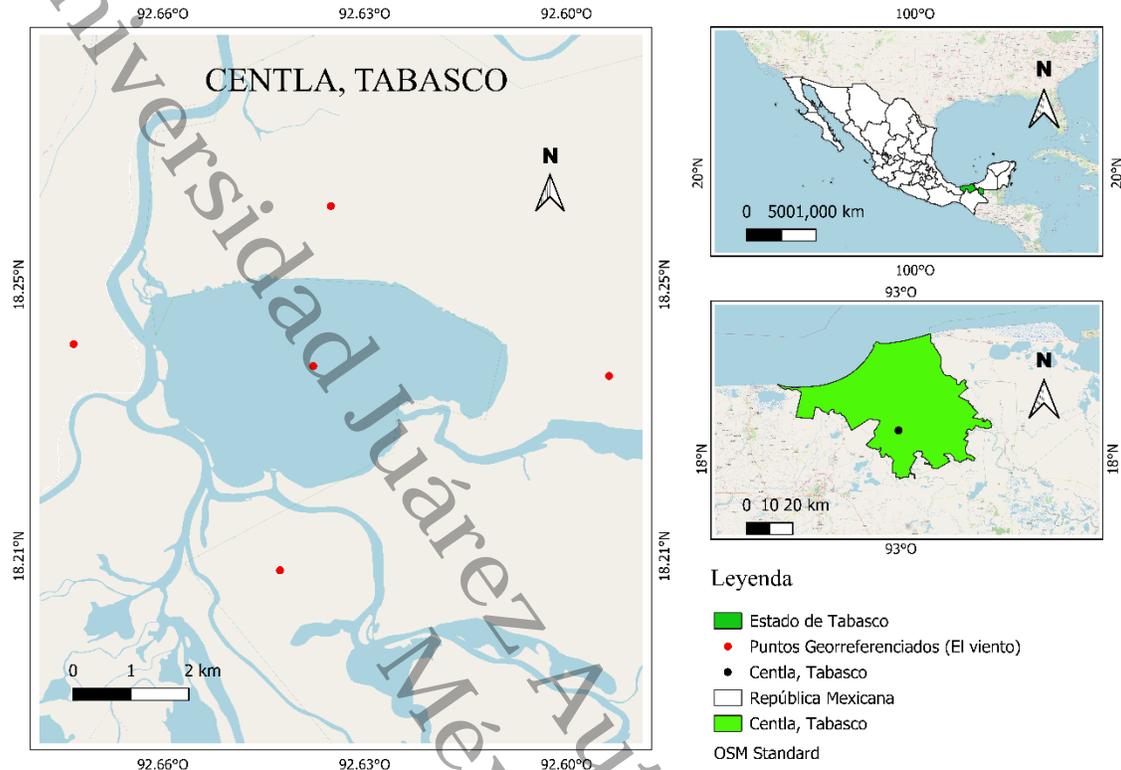


Figura 4. Ubicación geográfica de la región de la laguna “Las Ilusiones” en la ciudad de Villahermosa, Centro, Tabasco. Coordenadas (UTM): E 507378.864 y N 1991243.837. Elaboración propia.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



6.2. Selección del Modelo

La elección de este modelo se basó en la disponibilidad limitada de datos meteorológicos en nuestras áreas de estudio. El modelo seleccionado para este estudio fue el de Hargreaves y Samani. Este modelo es ampliamente utilizado en áreas con condiciones climáticas diferentes unas de otras y debido a su facilidad de aplicación y la presentación de resultados fiables. Sin embargo los valores de este modelo pueden ser ajustados si se requieren (Lima Junior et al., 2016; Lujano et al., 2023).

Hargreaves y Samani es una opción práctica y eficiente para nuestra investigación. Este modelo requiere un número reducido de variables, lo que facilita su uso en condiciones y



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



limitaciones específicas. Esto es particularmente ventajoso en comparación con el método de Penman-Monteith, que requiere datos más detallados como la humedad relativa y la velocidad del viento, los cuales no estaban disponibles en nuestro caso.

Además, el modelo de Hargreaves y Samani ha sido validado en estudios previos, lo que proporciona una mayor confianza en su aplicabilidad y precisión en nuestro estudio. Aunque se consideró el método de Penman-Monteith debido a su precisión y reconocimiento, su implementación no fue posible debido a restricciones en la disponibilidad de datos.

6.3. Obtención de Datos

Se determinaron 5 puntos de observación georreferenciados alrededor de cada laguna a una distancia de 70m y 150m con el objetivo de lograr una homogeneidad espacial (Núñez et al., 2022).

Para este estudio, definimos un período de 40 años (1982-2022), con el fin de garantizar un marco temporal adecuado y observar el comportamiento o evolución de variables como la precipitación, la evapotranspiración, la radiación solar y la variabilidad térmica. Luego, los puntos, ingresamos las coordenadas geográficas en formato DMS (grados, minutos y segundos) utilizando la plataforma Daymet, disponible en el sitio web <https://daymet.ornl.gov/single-pixel/>. Configuramos los parámetros necesarios, como el periodo de estudio, las variables y la ubicación.

Después de configurar el tiempo y las variables de interés para la implementación del modelo, procedimos con la obtención de los datos meteorológicos. Estos datos incluyeron información detallada sobre la precipitación, temperaturas máximas y mínimas diarias y nieve.

La plataforma Daymet proporciona estos datos diarios interpolados a partir de estaciones meteorológicas y satélites, lo que garantiza una alta resolución espacial y temporal.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Posteriormente, se aplicó en la técnica de análisis de datos meteorológicos interpolados, utilizado por diversos investigadores (BRASA RAMOS, 1996; Ramos et al., 1997; Sánchez et al., 2005; de Tomás et al., 2013).

6.4. Procesamiento de Datos

Este consistió en realizar una limpieza de las variables que el modelo de Hargreaves no requiere. Dado que este modelo depende de las variables de temperatura y radiación solar extraterrestre, se eliminó cualquier variable que no contribuía al cálculo de la evapotranspiración potencial (ET₀).

No obstante, se optó por conservar los datos de precipitación con el fin de realizar una comparación entre la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación a lo largo del período de estudio. Esta comparación es crucial para la evaluación y la formulación de conclusiones.

Posteriormente, se realizó el proceso de filtración de datos con el objetivo de eliminar datos adicionales y reducir el número de variables. Al centrarse únicamente en las variables requeridas, donde se facilita el procesamiento.

6.5. Aplicación del Modelo de Hargreaves

Para la aplicación del modelo de Hargreaves, se utilizaron las Ecuaciones 1 y 3 del mencionado modelo con el fin de comparar sus resultados. La Ecuación 1 es la original y, según estudios, proporciona datos más confiables al incluir la radiación solar incidente.

Por otro lado, la Ecuación 3 es una versión simplificada que no incluye la radiación solar incidente, lo cual facilita su aplicación, pero puede comprometer la precisión de los resultados.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Esta comparación permitirá evaluar la precisión y aplicabilidad de ambas ecuaciones en diferentes contextos y condiciones.

6.5.1. Cálculo promedio de las Variables

Para obtener un valor promedio de las variables (Precipitación, Evapotranspiración, Radiación Solar Incidente y Variabilidad Térmica), se procedió a organizar los datos de manera cronológica, asegurando la correcta secuenciación temporal de las observaciones. Los datos restantes, correspondientes al periodo de estudio, se agruparon por mes y año. Posteriormente, se calcularon los valores promedio mensuales y anuales de la temperatura.

Se recopilaron los valores mensuales de las cuatro variables mencionadas para los puntos georreferenciados correspondientes a cada laguna.

Cada punto georreferenciado fue analizado individualmente en una hoja de cálculo para asegurar la precisión de los datos. Este paso incluyó la organización y verificación de los datos para evitar errores y garantizar la exactitud.

Se agregaron filtros a las hojas de cálculo para facilitar la obtención de los valores mensuales de cada año. Esto permitió una manipulación más eficiente de los datos y un acceso rápido a la información.

Finalmente, se calculó el promedio general de cada variable para cada mes. Esto proporcionó un promedio mensual consolidado para cada variable, ofreciendo una visión completa de su comportamiento a lo largo de los diferentes meses del año.

6.5.2. Cálculo de la Radiación Solar Extraterrestre (R_0)

La variable de radiación solar extraterrestre (R_0) se obtiene a partir de una tabla proporcionada por Samani, reconocido por su trabajo en modelos de estimación de radiación solar. Esta tabla contiene valores calculados para diferentes latitudes, abarcando



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



desde 0° hasta 70° para ambos hemisferios norte y sur, y asignando valores específicos para cada mes del año (Tabla 2).

Para este estudio, se seleccionaron los valores correspondientes a la latitud 18° en el hemisferio norte debido a la ubicación geográfica del área de estudio. Esta selección asegura la relevancia y precisión de los datos en el contexto local.

Dado que los valores de la tabla están expresados en $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$, fue necesario realizar una conversión de unidades. Utilizando un factor de conversión de 0.408, los valores se expresaron en milímetros por día ($\text{mm}/\text{día}$). Esta conversión es esencial ya que permite una comparación directa con otras variables del modelo de Hargreaves que están en unidades de mm. Posteriormente, se realizó otra conversión multiplicando el valor diario por el número de días de cada mes para obtener los valores en milímetros por mes (mm/mes) y, finalmente, en milímetros por año ($\text{mm}/\text{año}$).

El cálculo preciso de R_0 es crucial, ya que esta variable influye significativamente en la estimación de la evapotranspiración potencial, afectando así la precisión y aplicabilidad del modelo de Hargreaves en diferentes condiciones climáticas y geográficas.

6.5.3. Cálculo de la Radiación Solar Incidente (R_s).

Al obtener los valores de (R_0), se procedió al cálculo de la Radiación Solar Incidente (R_s) que se requiere en la Ecuación 1. Este cálculo es esencial para la aplicación de la Ecuación 1 las cuales dependen directamente de R_s para estimar la evapotranspiración potencial.

Para el cálculo de R_s , se emplearon los valores mensuales y anuales de R_0 .

El coeficiente de transmisión solar (KT) es un parámetro clave en la Ecuación 2, Samani proporciona un valor de 0.162 para regiones interiores (zonas alejadas del mar) y 0.19 para regiones costeras. Dada la ubicación de las lagunas de estudio, se seleccionó el valor de 0.162, esto debido a que estas lagunas no se encuentran en proximidad al mar, clasificándolas como regiones de interiores.



La Ecuación 2 también requiere el uso de los valores promedio de las temperaturas máximas y mínimas de cada mes del año, para esto se utilizaron los valores mensuales ya calculados.

6.5.4. Cálculo de la ETP (Ecuación Original).

Para calcular la Evapotranspiración Potencial (ETP) se utilizó la Ecuación Original (Ecuación 1), se sustituyeron los valores mensuales de R_s obtenidos previamente. El valor de 0.0135 recomendado por Hargreaves en la ecuación se utiliza para asegurar la compatibilidad con las unidades específicas empleadas en este estudio (temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y radiación en $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$).

Asimismo, el valor de 17.78 se utilizó para ajustar la formula, siguiendo las recomendaciones de Hargreaves y Samani. Este valor es fundamental para escalar adecuadamente las temperaturas y garantizar que los cálculos estén en las mismas escalas que el coeficiente de evaporación.

El proceso de cálculo de la ETP mediante la Ecuación 1 se realizó de la siguiente manera:

- Uso de Valores de Temperatura Media Mensual: Se inician los cálculos utilizando los valores mensuales de la temperatura media, obtenidos previamente, que se sustituyen en la Ecuación Básica.
- Sustitución de Valores de Radiación Solar Incidente (R_s): Posteriormente, se sustituyen los valores mensuales de R_s en la ecuación.

6.5.5. Cálculo de La ETP (Ecuación Simplificada).

Para calcular la Evapotranspiración Potencial, se utilizó la Ecuación simplificada (Ecuación 3), esta relaciona la ETP con las variaciones de las temperaturas y la radiación solar extraterrestre (R_0). Esta ecuación se fundamenta en investigaciones teóricas y empíricas en



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



meteorología, reflejando la estrecha relación entre la evaporación y la transpiración bajo diversas condiciones climáticas.

En el cálculo se incluyeron los valores mensuales de las temperaturas máximas, media y mínima, así como los valores de R_0 . El valor de 0.0023 en la ecuación tiene la finalidad de convertir la temperatura media diaria a grados Celsius, asegurando que esté en una unidad adecuada para la ecuación.

El proceso de cálculo de la ETP mediante la Ecuación 3 se realizó de la siguiente manera:

Recopilación de Datos: Se usaron los valores mensuales de las temperaturas máximas, media y mínima, así como los valores mensuales de R_0 .

Sustitución de Valores en la Ecuación: Se sustituyeron los valores mensuales de las temperaturas y R_0 en la Ecuación simplificada.

6.5.6. Análisis de Precipitación Acumulada

Para el análisis de la precipitación, se consideraron los valores mensuales y anuales acumulados a lo largo de los 40 años. Este análisis se realizó con el objetivo de comprender el comportamiento y la evolución de la precipitación en las dos áreas de estudio y su relación con la evapotranspiración.

El proceso de análisis de la precipitación se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Recopilación de Datos Diarios: Se recopilaron los datos diarios de precipitación para cada una de las áreas de estudio.
- Cálculo del Total Mensual: Los valores diarios de precipitación se sumaron para obtener el total mensual.
- Cálculo del Total Anual: Los totales mensuales obtenidos se sumaron para calcular el total anual de precipitación.



6.6. Metodología de la Investigación

Esta sección proporciona una visión integral detallada de la metodología para la realización de la investigación, desde el enfoque hasta la obtención de datos, brindando transparencia y claridad en el proceso metodológico empleado.

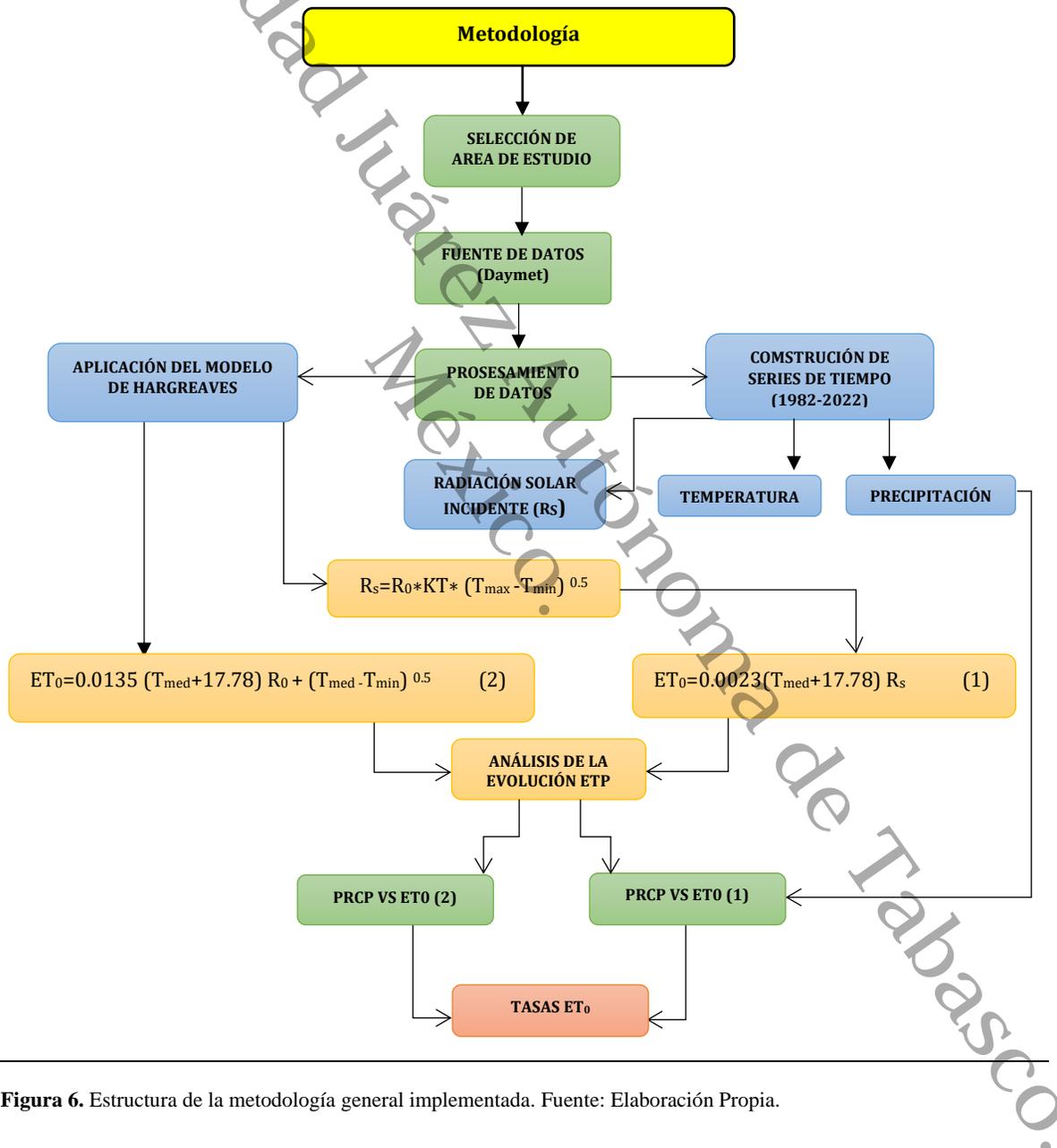


Figura 6. Estructura de la metodología general implementada. Fuente: Elaboración Propia.



VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Análisis y Evolución de la Radiación Solar Incidente

En la Figura 7 muestra las fluctuaciones a lo largo de los años obtenidos en la región de la laguna las ilusiones. Se observan picos notables alrededor de 1986, con un valor máximo de 253 MJ/m²/año, siendo este el valor más alto registrado. El valor más bajo se encuentra en el año 2010, con 232MJ/m²/año. Entre los años 1982 y 2009, los valores oscilan entre 235 y 247 MJ/m²/año, a excepción del pico de 1986.

En los años más recientes (2012-2022), la radiación muestra una tendencia a estabilizarse alrededor de 249-250 MJ/m²/año. Sin embargo, en la región de la laguna el viento presenta valores desde un mínimo de 224 MJ/m²/año en 1995 hasta un máximo de 255 MJ/m²/año en 2007. Los descensos más notables se observan alrededor de 1982 y entre 1992 y 1996, con valores por debajo de 230 MJ/m²/año. Similar a Las Ilusiones, la radiación en El Viento tiende a estabilizarse en los años más recientes, manteniéndose alrededor de 249-250 MJ/m²/año.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.

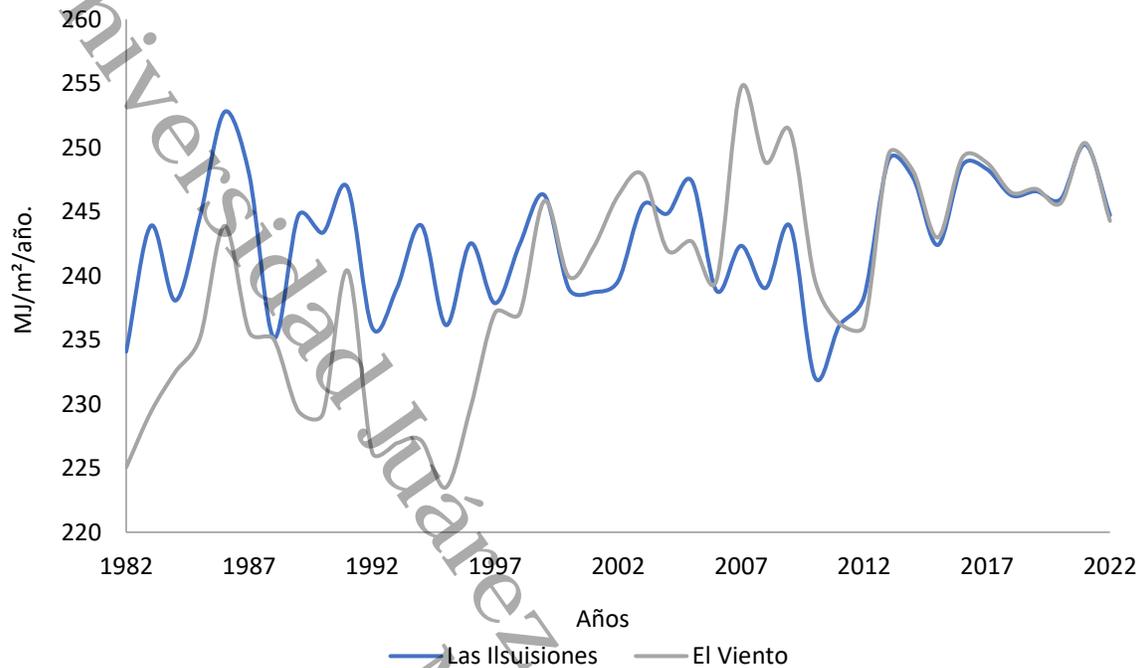


Figura 7. Serie de tiempo de radiación solar incidente.

Los valores mensuales de radiación solar (R_s) que se muestran en la Figura 8 durante el periodo de 1982-2011, la R_s comienza con un valor aproximado de 178 MJ/m²/mes en enero. A lo largo de los primeros meses del año, la radiación solar aumenta gradualmente, alcanzando su valor máximo alrededor de mayo y junio, con valores cercanos a 280 y 265 MJ/m²/mes, respectivamente.

Posteriormente, la radiación solar disminuye ligeramente durante los meses de julio y agosto, continuando la disminución progresiva en los últimos meses del año y terminando con valores alrededor de 166 MJ/m²/mes en diciembre.

En el periodo de 2012-2022, la radiación solar incidente en enero es ligeramente más alta que la del periodo anterior, comenzando aproximadamente en 192 MJ/m²/mes. A medida que avanza el año, la radiación solar también aumenta, alcanzando su pico máximo entre mayo y julio, aunque con valores ligeramente menores en este periodo: 262 MJ/m²/mes en mayo y 271 MJ/m²/mes en julio.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Después del pico máximo, la radiación solar muestra una tendencia de disminución durante los meses de agosto y septiembre, similar al patrón del periodo anterior. La disminución continúa en los últimos meses del año, aunque la radiación solar en diciembre es ligeramente superior en comparación con el periodo de 1982-2011, terminando alrededor de 182 MJ/m²/mes.

Se observa que la radiación solar incidente en el periodo de 2012-2022 es ligeramente superior en comparación con el periodo de 1982-2011, especialmente durante los primeros tres meses del año y los últimos cuatro meses. Este aumento puede ser indicativo de cambios en la atmósfera y patrones climáticos que afectan la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre.

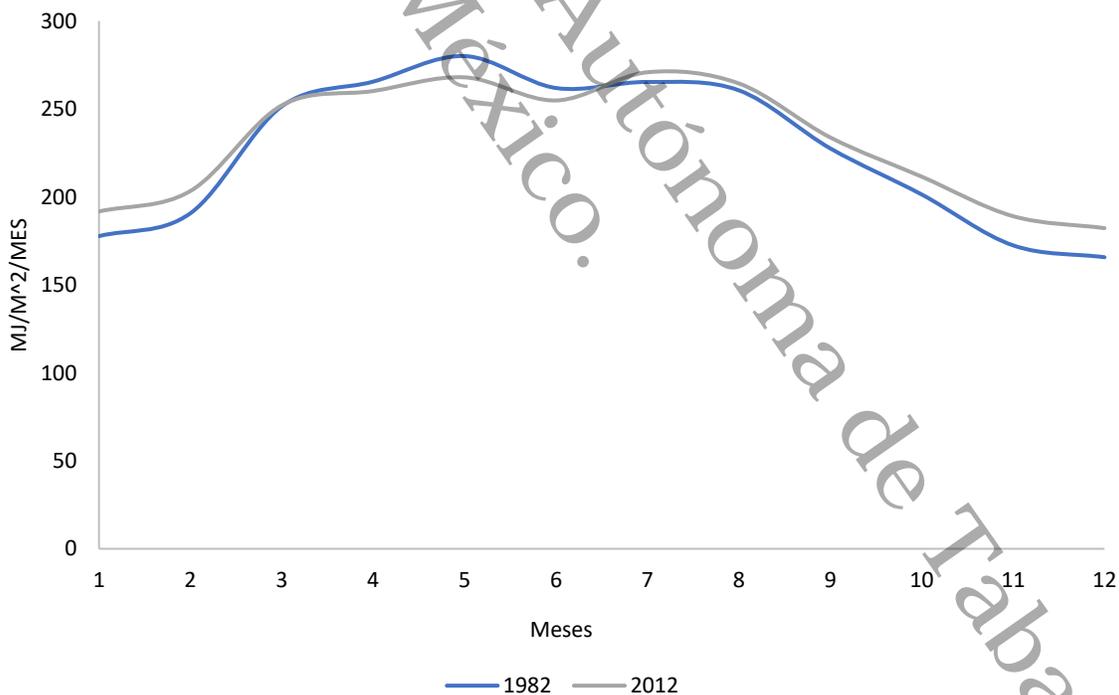


Figura 8. Comparación del comportamiento de la radiación solar incidente mensual en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) en la región de las ilusiones y el viento.



7.2. Precipitación y Evapotranspiración Potencial

Se observa en la Figura 9 que los años 1992 y 1995 fueron los más húmedos, con precipitaciones máximas de 2749 mm y 2810 mm, respectivamente. Durante esos mismos años, los valores de la Evapotranspiración Potencial (ETP) con la Ecuación Simplificada fueron de 1705 mm en 1992 y 1721 mm en 1995. Esto representa una pérdida del 62% y 61% de la precipitación total, respectivamente. A partir de 2012, los valores de ETP registrados comenzaron a coincidir con los de la región de laguna “El Viento”.

En contraste, el año 2021 registró la precipitación mínima para la región de la laguna Las Ilusiones, con un valor de 884 mm y una ETP de 1823 mm, lo que indica que la ETP presentó aproximadamente el -48% de pérdida total.

Para la Ecuación Original (Figura 10), en los años 1992 y 1995, la pérdida de agua fue de 1620 mm y 1634 mm, representando una pérdida del 59% y 58%, con una diferencia de 85 mm y 87 mm menos que la Ecuación Simplificada (3).

En el año 2021, la pérdida fue de 1760 mm, con un valor de -50% de pérdida y una diferencia de 63 mm menos.

El análisis revela que la Ecuación Simplificada sobrestima la ETP en comparación con la Ecuación Original. En 1992, la sobrestimación fue del 5.25%, en 1995 fue del 5.32%, y en 2021 fue del 3.58%. Esta información es crucial para evaluar la precisión y aplicabilidad de ambas ecuaciones en diferentes contextos y condiciones.

En esta región, se puede observar en la Figura 7 que los años 1992 y 1995 fueron los más húmedos, con una precipitación de 2274 mm y 2565 mm, respectivamente.

En esos mismos años, la ETP con la Ecuación Simplificada fue de 1641 mm y 1635 mm (Figura 9), representando una ETP del 72% y 63%, respectivamente. De igual manera, se observa que a partir del año 2012 los valores de ETP coinciden con los de la región de Las Ilusiones. En contraste, el año 2021 registró la precipitación mínima para la región El



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Viento, con un valor de 870 mm y una ETP de 1825 mm, lo que indica que la ETP presentó aproximadamente el -47% de la pérdida total.

Para la Ecuación Original (Figura 10), en los años 1992 y 1995, la pérdida de agua fue de 1564 mm y 1560 mm, representando una ETP del 68% y 60%, con una diferencia de 77 mm y 75 mm menos que la Ecuación Simplificada. En el año 2021, la ETP fue de 1736 mm, con un valor del -50% de ETP y una diferencia de 89 mm menos que la Ecuación Simplificada.

El análisis revela que la Ecuación Simplificada sobrestima la ETP en comparación con la Ecuación Original. En 1992, la sobrestimación fue del 4.93%, en 1995 fue del 4.81%, y en 2021 fue del 5.13%.

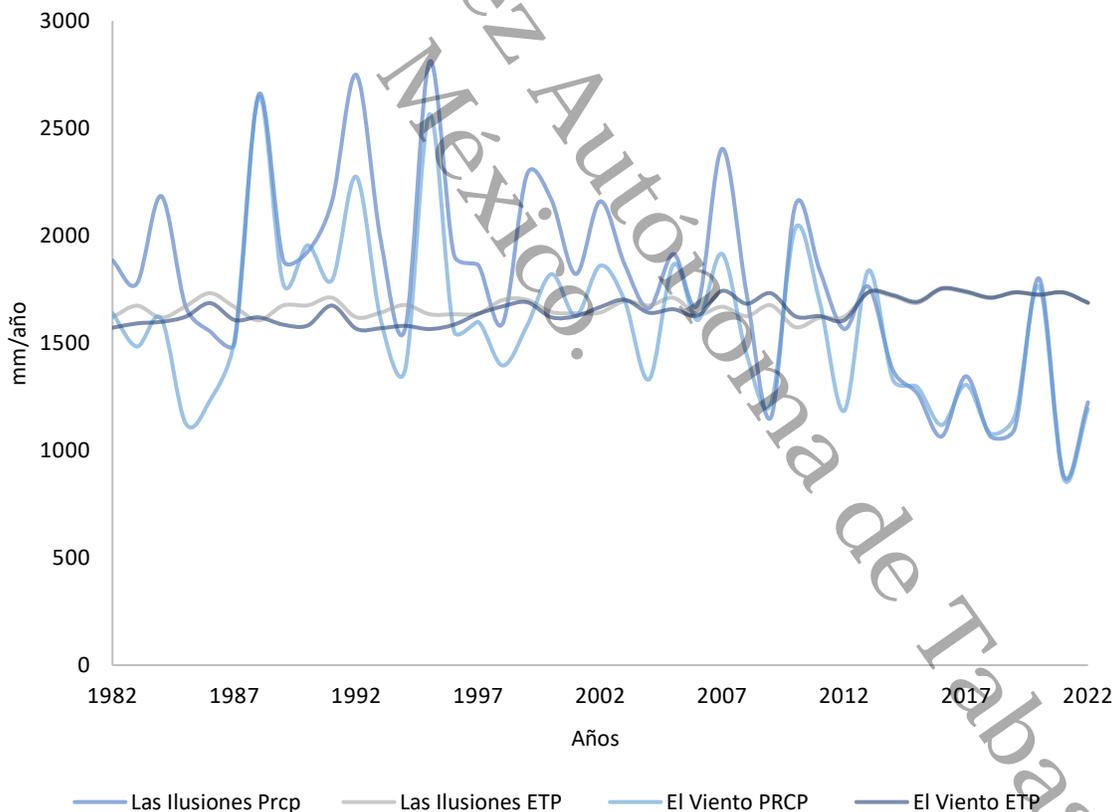


Figura 9. Precipitación y ETP con la Ecuación Simplificada en las regiones “Las ilusiones” y “El viento”.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.

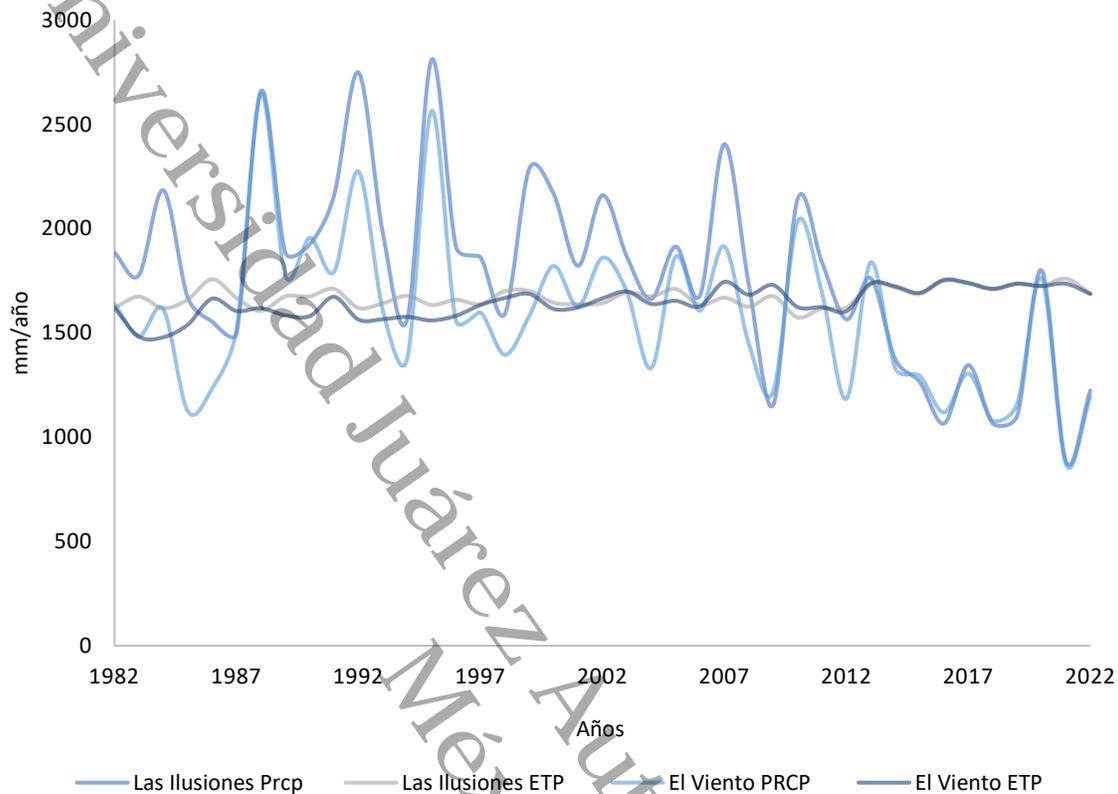


Figura 10. Precipitación y ETP con la ecuación original en las regiones “Las ilusiones” y “El viento”.

7.3. Análisis y Evolución de la Precipitación

El análisis se realizó a partir de las estimaciones mensuales de la precipitación, como se muestra en la Figura 11. En el periodo de 1982-2011, se observa un aumento gradual desde el inicio del año, alcanzando su primer pico alrededor del mes de junio con un valor cercano a los 8 mm/mes. Posteriormente, la precipitación disminuye ligeramente en julio, antes de aumentar nuevamente para alcanzar su máximo valor anual en septiembre, con un promedio cercano a los 10 mm/mes. A partir de octubre, la precipitación disminuye progresivamente hasta finales de año.

La tendencia de la precipitación para el periodo de 2012-2022 sigue un patrón similar, pero con diferencias notables en la magnitud de los valores. El primer pico de precipitación se



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



observa también en junio, pero con un valor ligeramente inferior, alrededor de los 6 mm/mes. El segundo pico se presenta en septiembre, alcanzando un valor de aproximadamente 8 mm/mes, que es inferior al máximo registrado en el periodo anterior. A partir de octubre, la precipitación disminuye de manera similar al periodo anterior, aunque con valores ligeramente más bajos en los últimos meses del año.

Como se puede notar en la Figura 11, la magnitud de la precipitación ha disminuido en el periodo más reciente (2012-2022) en comparación con el periodo anterior (1982-2011), lo que indica una tendencia de disminución de la precipitación en las regiones. A pesar de la disminución en la magnitud, el patrón estacional de la precipitación se mantiene consistente en ambos periodos, con picos durante los meses de junio y septiembre.

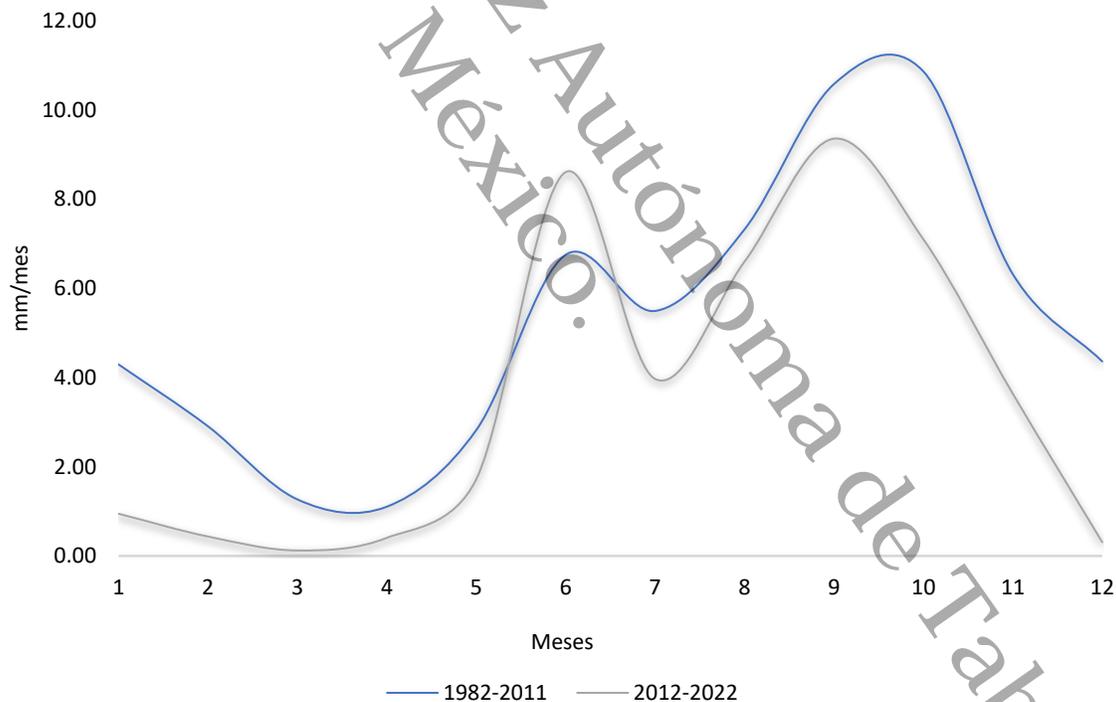


Figura 11. Comparación del comportamiento de la precipitación mensual en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) para la región las ilusiones y el viento.



7.4. Evolución de la Evapotranspiración (Ecuación Simplificada).

La región “Las Ilusiones” (Figura 12a) muestra un patrón claro en la distribución mensual de la Evapotranspiración Potencial (ETP), con aumentos notables en los meses de primavera y un pico pronunciado durante el verano. En el período 2012-2022, se observa un incremento más significativo en los meses de agosto y septiembre, con un aumento de 4 a 6 mm en comparación con el período 1982-2011. Este incremento sugiere una tendencia hacia mayores tasas de ETP en estos meses, lo cual puede tener implicaciones importantes para la gestión hídrica en la región.

La región de la laguna “El Viento” (Figura 12b) presenta un patrón estacional claro, con incrementos en la ETP durante la primavera y el verano. En el período 2012-2022, se observa un aumento generalizado en la mayoría de los meses en comparación con el período 1982-2011. Aunque ambos periodos presentan picos en los meses de verano, el período 2012-2022 muestra un cambio prolongado durante los meses de julio a diciembre. Este incremento sugiere una mayor uniformidad en la distribución de la ETP a lo largo del año en comparación con el período 1982-2011.

Ambas regiones muestran una tendencia hacia un aumento en la ETP mensual en el período 2012-2022 en comparación con el período 1982-2011. Sin embargo, hay diferencias notables en la magnitud y distribución de estos aumentos. La región de la “Laguna las Ilusiones” muestra incrementos más pronunciados en los meses de septiembre a diciembre, mientras que la región “El Viento” presenta un aumento más uniforme y prolongado desde julio hasta diciembre. Este último también destaca por un incremento significativo durante los meses de primavera. Estas diferencias sugieren que, aunque ambas lagunas experimentan mayores tasas de ETP, los patrones estacionales y la magnitud de estos cambios varían entre los dos cuerpos de agua.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.

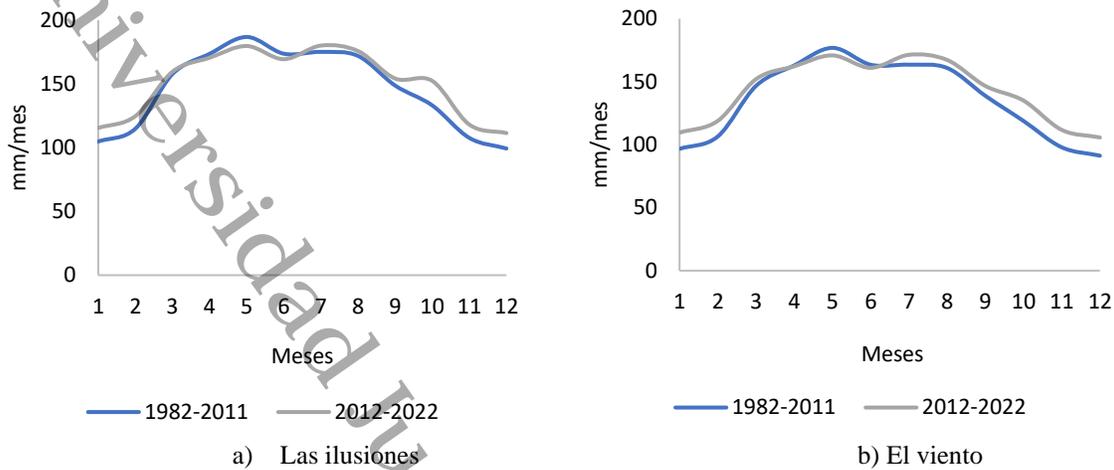


Figura 12. Evolución de la evapotranspiración con la ecuación simplificada en dos periodos (1982-2011) y (2012-2022) para la región las ilusiones y el viento.

7.5. Evolución de la Evapotranspiración (Ecuación Original).

La ecuación simplificada de Hargreaves proporciona resultados de ETP que son comparables a los obtenidos con la ecuación original, con diferencias que varían solo entre 8 y 12 mm, sugiriendo que la ecuación simplificada es una herramienta viable para estimar la ETP, especialmente en situaciones donde la disponibilidad de datos es limitada. Las diferencias observadas entre los dos períodos de estudio son consistentes, independientemente de la ecuación utilizada, lo que refuerza la validez de los hallazgos sobre el aumento en la ETP en la región durante el período más reciente



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.

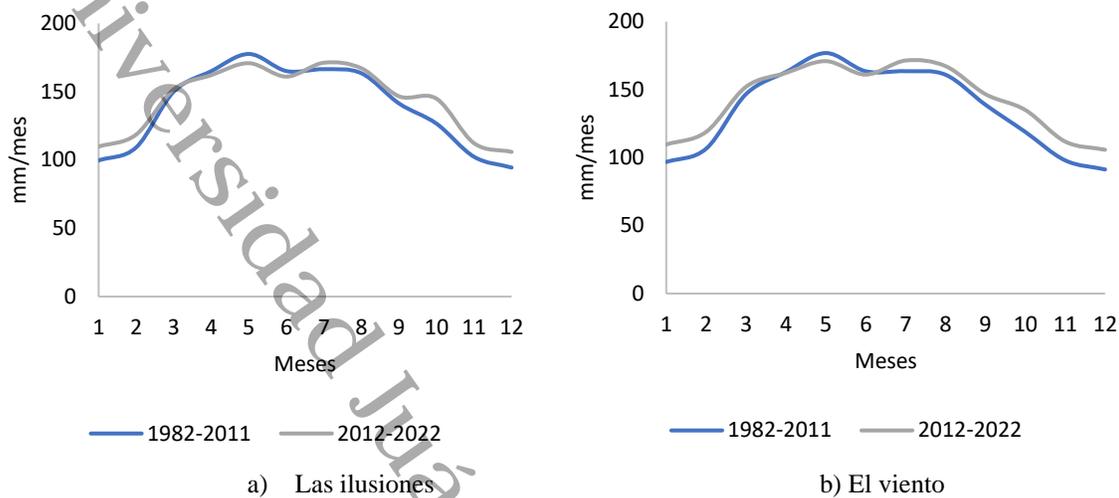


Figura 13. Evolución de la evapotranspiración con la ecuación original en dos periodos (1982-2011) y 2012-2022 para la región las ilusiones y el viento.

7.6. Análisis y Evolución de la Temperatura

7.6.1. Construcción de Serie de Tiempo de Temperatura

La Figura 14 muestra la evolución de las temperaturas máximas, medias y mínimas durante el período de estudio, de 1982 a 2022. Durante la mayor parte de este período, las temperaturas máximas se mantuvieron relativamente constantes, fluctuando entre 32°C y 33°C. Sin embargo, a partir de 2012, se observa un incremento de aproximadamente 1°C en las temperaturas máximas, lo que podría indicar un cambio significativo en la tendencia climática de la región. Este incremento en las temperaturas máximas, junto con las variaciones en las temperaturas medias, sugiere una posible influencia de factores externos, como el cambio climático. Esta tendencia al alza podría tener implicaciones importantes para el balance energético y la dinámica climática de la región, resaltando un cambio en el comportamiento climático que merece atención y análisis detallado.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.

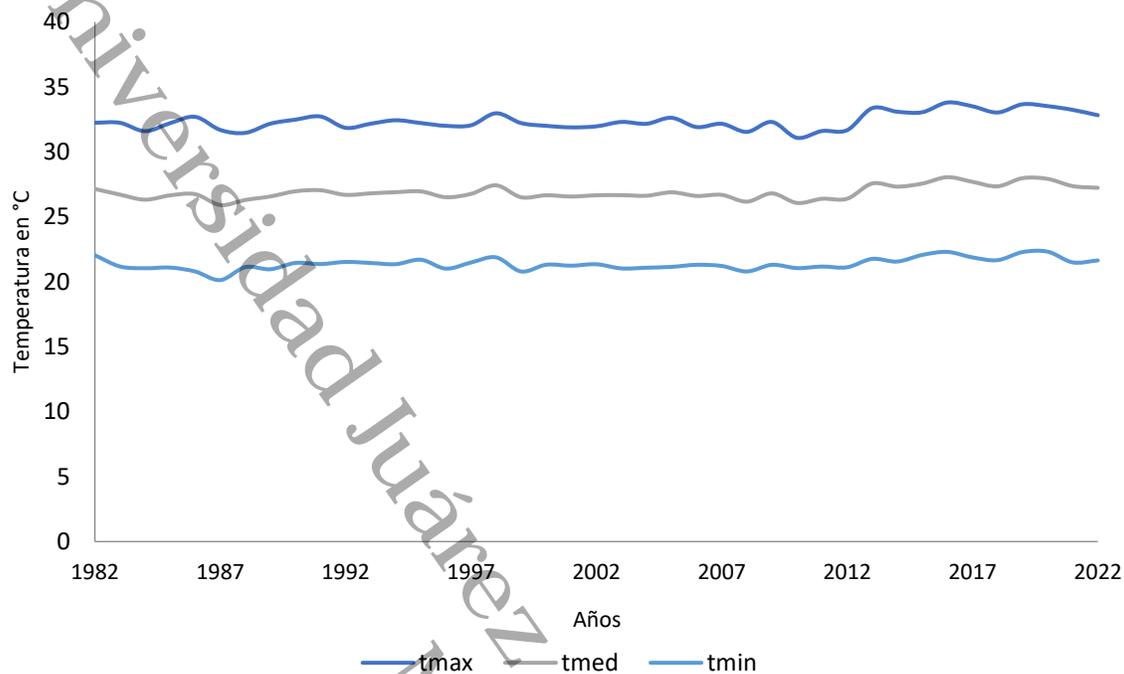


Figura 14. Serie de tiempo de temperatura para la región las ilusiones y el viento.

La Figura 15 muestra las variaciones de las temperaturas mensuales durante el período de estudio. Se observa que las temperaturas comienzan a aumentar a partir de marzo, alcanzando su punto máximo entre los meses de mayo y septiembre, con valores que oscilan entre 34°C y 36°C, siendo mayo, junio y julio los meses más calientes. Este incremento de temperatura puede atribuirse al aumento gradual de la radiación solar y a la prolongación de las horas de luz a medida que nos acercamos al verano (Figura 8).

A partir de octubre, las temperaturas comienzan a descender gradualmente, alcanzando sus valores más bajos entre diciembre y enero. Este descenso se debe a la reducción de la radiación solar, característica de los meses de otoño e invierno (Figura 8). Durante los meses más fríos, diciembre y enero, las temperaturas máximas descienden a un rango de 29°C a 31°C, mientras que las temperaturas mínimas pueden llegar a 23°C.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Al analizar los datos en más detalle, se observa una diferencia significativa entre los dos períodos de estudio: 1982-2011 y 2012-2022. Las temperaturas en el período más reciente (2012-2022) son consistentemente más altas en comparación con el período anterior (1982-2011). Estos dos períodos fueron separados para identificar el año en que las variables comenzaron a experimentar aumentos significativos.

Las temperaturas máximas en el período 2012-2022 son ligeramente más altas que en el período 1982-2011 durante la mayor parte del año. Esta diferencia es especialmente notable en los meses de verano, donde las temperaturas máximas recientes alcanzan valores más altos, y persiste durante los meses de invierno.

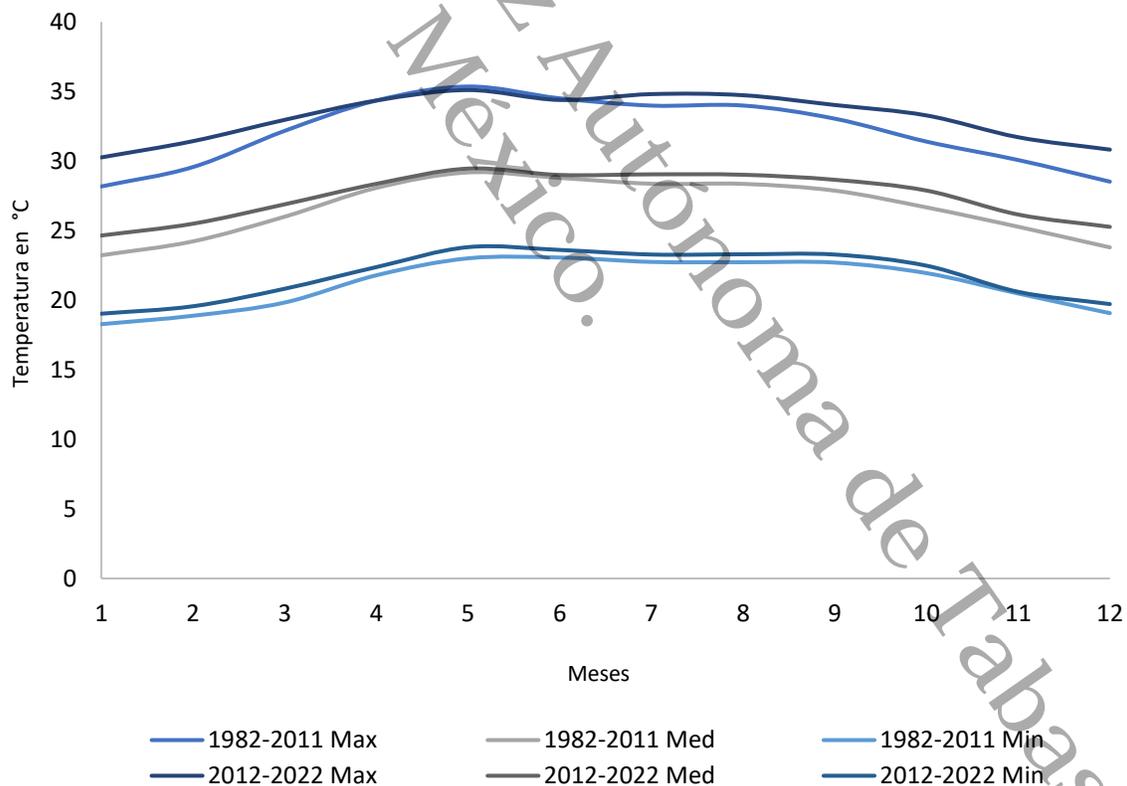


Figura 15. Serie de tiempo de temperatura mensual en dos períodos (1982-2011) y (2012-2022) para la región las ilusiones y el viento.



VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los resultados mostraron patrones de ETP indican ligeras diferencias mensuales y anuales a lo largo del periodo de estudio.

La comparación entre la precipitación y la ETP entre las dos regiones revelan que, a partir de 2012, la precipitación tiende a ser menor que la ETP, lo que sugiere una mayor demanda evaporativa en comparación con la oferta hídrica. Esta tendencia subraya la necesidad de evaluar el impacto de estos cambios en los recursos hídricos y en la gestión del agua en la región. La ETP estimada con la ecuación original de Hargreaves y Samani demostró ser más adecuada para estudios detallados, ya que considera la radiación solar incidente como una variable de suma importancia y se adapta mejor a entornos con una alta variabilidad en las variables climáticas. En cambio, la Ecuación Simplificada proporciona una referencia rápida y simple, aunque se encontró que esta sobre estima un 5% en promedio a la ETP en comparación con la Ecuación Original.

La radiación solar incidente mostró fluctuaciones significativas. Estas diferencias podrían atribuirse a factores geográficos, topográficos y climáticos, así como a cambios en el uso del suelo y niveles de contaminación atmosférica. La estabilidad de esta variable entre las regiones de estudio a partir del 2012 refleja una igualdad en condiciones medio-ambientales lo que sugiere que la región protegida podría estar en deterioro hídrico.

La temperatura se mantuvo relativamente constante sin variaciones significativas hasta el año 2011, a partir de 2012 se observó un leve incremento de aproximadamente 1°C, posiblemente relacionado con el aumento de la radiación solar. Esta tendencia al alza en las



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



temperaturas destaca la importancia de monitorear los cambios climáticos locales y sus posibles impactos en el ecosistema de la región.

En conclusión, este estudio destaca la importancia de considerar la variabilidad hidrológica y el cambio climático en la planificación y gestión de recursos hídricos en la región. La formulación de estrategias de gestión del agua que tengan en cuenta estas variaciones temporales y su posible impacto en la disponibilidad de agua y la ejecución es de vital relevancia para la gestión hídrica en una región que ha experimentado eventos de sequías meteorológicas inéditas.

El aumento progresivo en la ETP en el período 2012-2022 en comparación con el período 1982-2011 en la región de “Las Ilusiones” se pronuncia en los meses de septiembre a diciembre. Mientras que, la región “El Viento” presentó un aumento uniforme de julio a diciembre. Ambas ecuaciones proporcionaron resultados similares con una diferencia de 8 a 12 mm. Este resultado sugiere viable aplicar los resultados obtenidos por la ecuación simplificada.

En cuanto a la precipitación, se observó una disminución en el período más reciente (2012-2022) en comparación con el período anterior (1982-2011). Sin embargo, el patrón estacional de la precipitación se mantiene consistente en ambos periodos, con picos durante los meses de junio y septiembre. Estos hallazgos sugieren una tendencia hacia mayores tasas de ETP en la región. Por otro lado, en las temperaturas mensuales se observó un incremento de 1 °C.

La radiación solar incidente aumentó en el período más reciente (2012-2022) en comparación con el período anterior (1982-2011). La radiación solar incidente en el período de 2012-2022 es ligeramente superior en comparación con 1982, especialmente durante los primeros 3 meses de inicio del año y en los últimos 4 meses.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Este aumento puede ser indicativo de cambios en la atmósfera y patrones climáticos que afectan la cantidad de radiación solar que llega a la superficie.

Finalmente concluimos que el incremento de temperatura y radiación solar incidente promovieron el incremento de las tasas evapotranspiración y periodos de conectividad hidrológica perturbados más el déficit de precipitación en ambas regiones ocasionan eventos de sequías meteorológica anormalmente secos.

Recomendaciones

Durante la realización de esta investigación se presentaron algunas dificultades que podrían minimizarse tomando en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Contar con registros completos de temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y presión atmosférica si se requiere una mayor precisión para un análisis más exacto y reducir errores en la estimación
2. Comparar los resultados con múltiples modelos para no depender únicamente del modelo de Hargreaves siempre y cuando que los datos necesarios estén disponibles para su uso.
3. Se recomienda adaptar y calibrar el valor de KT a las condiciones específicas del área de estudio para mejorar la estimación de resultados.
4. Interpolación o estimación de coordenadas faltantes: En la tabla proporcionada no se disponen de datos para ciertas latitudes, se recomienda utilizar una interpolación o estimación para completar los registros.



IX. REFERENCIAS

- Aguilera Contreras, M., & Martínez Elizondo, R. (1996). *Relaciones agua suelo planta atmósfera*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo (México).
- Alcón, F. J., Arcas, N., De-Miguel, M. D., & Fernández-Zamudio, M. A. (2009). Adopción de tecnologías ahorradoras de agua en la agricultura. En *Electronico* (pp. 127-146). Cajamar Caja Rural. <https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/6859>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006a). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, 298(0). https://www.academia.edu/download/56775147/Tabla_del_Coeficiente_del_cultivo_Kc.pdf
- Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes y Smith, M. (1998b).- Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 (<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>)
- Almorox, J., Elisei, V., Aguirre, M. E., & Commegna, M. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 44(1), 101-109.
- An, N., Hemmati, S., & Cui, Y.-J. (2017). Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 239-246.
- Aparicio, M. P. (2020). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo.
- Artiga Miranda, S. (2024). *Caracterización de la radiación solar y la temperatura para aplicaciones fotovoltaicas en Jaén*. <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/21647>
- Baethgen, W., & Martino, D. (2000). Cambio climático, gases de efecto invernadero e implicancias en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay. *Resúmenes del Taller sobre el Protocolo de Kyoto. Ministerio de Vivienda, ordenamiento territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Uruguay*. http://www.inia.uy/Documentos/Privados/GRAS/Cambio-climatico-clima/cc_gei_agrop_forestal.pdf
- Barco, J., Cuartas, A., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J. I., Mantilla, R., Hoyos, C., Mejía, J. F., Botero, B., & Montoya, M. (2000). Estimación de la evaporación en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 07, Article 07.



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



- Barrett, E. C. (2013). *Introduction to environmental remote sensing*. Routledge. <https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.4324/9780203761038&type=googlepdf>
- Bautista, S., & Mayor, Á. G. (2021). El papel de la (des)conectividad ecohidrológica en el funcionamiento y el manejo de las zonas áridas: *Ecosistemas*, 30(3), Article 3. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2265>
- BRASA RAMOS, A. (1996). *Determinación mediante teledetección de la evapotranspiración en regadíos extensivos* [PhD Thesis, Universidad de Castilla-La Mancha]. <https://producciocientifica.uv.es/documentos/5d5ba6de2999520e90d04441?lang=gl>
- Bremauntz, A. F. (2004). *Cambio climático: Una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología.
- Burba, G. (2013). Eddy covariance method. *Li-COR Biogeosciences, Lincoln, NE*, 630. https://www.researchgate.net/profile/George-Burba/publication/237079959_Eddy_Covariance_Method_for_Scientific_Industrial_Agricultural_and_Regulatory_Applications_A_Field_Book_on_Measuring_Ecosystem_Gas_Exchange_and_Areal_Emission_Rates/links/54b6a0d70cf2e68eb27ebb16/Eddy-Covariance-Method-for-Scientific-Industrial-Agricultural-and-Regulatory-Applications-A-Field-Book-on-Measuring-Ecosystem-Gas-Exchange-and-Areal-Emission-Rates.pdf
- Cai, X., Zhang, X., Noël, P. H., & Shafiee-Jood, M. (2015). Impacts of climate change on agricultural water management: A review. *WIREs Water*, 2(5), 439-455. <https://doi.org/10.1002/wat2.1089>
- Carrascosa, B., & Inmaculada, M. (2016). *Cálculo de la radiación solar extraterrestre en función de la latitud y la declinación solar*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/68296>
- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L., Dzul-López, E., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Chávez-Simental, J. A. (2013). Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(4), 115-126.
- Cihlar, J., Laurent, L. S.-, & Dyer, J. A. (1991). Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. *Remote sensing of Environment*, 35(2-3), 279-298.
- Correa Frías, C., & Merlet Badilla, H. (1997). *Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile*. https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/20.500.13082/9303/1/CNR-0029_1.pdf



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



- De Tomás, A., Nieto, H., Guzinski, R., Sandholt, I., & Berliner, P. (2013). Aplicaciones de la teledetección en hidrología: Estimación de la evapotranspiración mediante el método del triángulo. *La aplicación de técnicas espaciales por la hidrología ambiental*, 103.
- Denager, T., Looms, M. C., Sonnenborg, T. O., & Jensen, K. H. (2020). Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods. *Vadose Zone Journal*, 19(1), e20032. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20032>
- Domingo, F., Villagarcía, L., & Were, A. (2003). ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración? Estado actual y evolución: *Ecosistemas*, 12(1), Article 1. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/251>
- Dou, X., & Yang, Y. (2018). Estimating forest carbon fluxes using four different data-driven techniques based on long-term eddy covariance measurements: Model comparison and evaluation. *Science of The Total Environment*, 627, 78-94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.202>
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. Macmillan.
- Espinoza, J. C., Armijos, E., IRD, M. P., & Espinoza, R. (2021). *Scientific Analysis Briefing*. https://www.ird.fr/sites/ird_fr/files/2021-09/Motion%2013%20UICN_IRD_EN.pdf
- Estadísticas del Agua en México 2021 (Conagua). (2024, enero 3). *Agua.org.mx*. <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-del-agua-en-mexico-2021-conagua/>
- FELICÍSIMO, A. M., & Cepedal, G. (1984). Estimación de la radiación solar incidente sobre superficies con pendiente y orientación variables. *Studia OEcologica*, 5, 267-284.
- G. Allen, R., S. Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006c). *Evapotranspiración del cultivo*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147846>
- García Sánchez, F. J. (2019). Planeamiento urbanístico y cambio climático: La infraestructura verde como estrategia de adaptación. *Cuadernos de investigación urbanística Año XI, Núm. 122, enero - febrero 2019 1-101 pp.* <https://doi.org/10.20868/ciur.2019.122>
- García-Badell, J. J. (1982). *Cálculo de la energía solar*. IGME.
- Gastelo Roque, J. A., Morales Acevedo, A., & Tineo Soto, J. E. (2017). Estimación de la radiación solar diaria y ángulos de inclinación óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani. *Revista de Investigación Científica*, 4-5.



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



- Gavilán, P. (s. f.). *MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE MEDIDAS DE LA TEMPERATURA*. Recuperado 29 de julio de 2024, de https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Gavilan/publication/280665962_Modelos_de_estimacion_de_la_radiacion_solar_diaria_a_partir_de_medidas_de_la_temperatura/links/6103a0a60c2bfa282a0d8b16/Modelos-de-estimacion-de-la-radiacion-solar-diaria-a-partir-de-medidas-de-la-temperatura.pdf
- Ghiat, I., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2021). A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications. *Water*, 13(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/w13182523>
- Gordillo Salinas, V. M., Flores Magdaleno, H., Tijerina Chávez, L., & Arteaga Ramírez, R. (2014). Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1), 143-155. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342014000100012&script=sci_abstract&tlng=pt
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hidalgo-Sánchez, M., Ángeles-Pérez, G., Yépez, E. A., Plascencia-Escalante, F. O., Delgado-Balbuena, J., & González-Martínez, T. M. (2021). Evapotranspiración e intercambio de energía en un bosque templado de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-11>
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1), 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- Hurtado, R. H., Fernández Long, M. E., & Barberis, J. G. (2002). Planillas de cálculo de balance hidrológico climático y evapotranspiración potencial. *Actas dl XIII congreso Brasileiro de Agrometeorología. Santa Maria. RS Brasil*. <http://sbagro.org/files/biblioteca/754.pdf>
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements: A manual. *ASCE manuals and reports on engineering practice (USA)*. no. 70. <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/64736418e17b74d2225420a0>
- Li, Z., Xu, D., & Guo, X. (2014a). Remote sensing of ecosystem health: Opportunities, challenges, and future perspectives. *Sensors*, 14(11), 21117-21139. <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/11/21117>



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. (2009b). A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/s90503801>
- Lima Junior, J. C. de, Arraes, F. D. D., Oliveira, J. B. de, Nascimento, F. A. L. do, & Macêdo, K. G. de. (2016). Defining parameters for the Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in the State of Ceará, Brazil. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 447-454. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160054>
- Lopez-Castañeda, A. (2019). *Hidrología del estado de Tabasco* (p. 372).
- Lujano, A., Sanchez-Delgado, M., & Lujano, E. (2023). Improvement of Hargreaves–Samani Reference Evapotranspiration Estimates in the Peruvian Altiplano. *Water*, 15(7), 1410.
- Magallanes-Quintanar, R., López Hernández, A. M., Galván-Tejada, C. E., Magallanes-Quintanar, R., López Hernández, A. M., & Galván-Tejada, C. E. (2017). Análisis de la evaporación y cambio climático en el centro de México. *Nova scientia*, 9(18), 76-93. <https://doi.org/10.21640/ns.v9i18.750>
- Marín Morales, J. G. (2018). *Factores que afectan el crecimiento de las plantas*. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-bac-20.500.12324-22033/Description>
- Martos-López, Á. (2016). *La importancia del agua para nuestro planeta*. <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/2374>
- Miracle Sol, M. R. (2006). Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. *Polis. Revista Latinoamericana*, 14, Article 14. <https://journals.openedition.org/polis/5105>
- Montero Torres, J. (2022). Relación de la radiación solar con la producción de plantas: Agroproductivas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 9(1), 48-62.
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- MUÑOZ, M. M. (2023). *Tendencia de la evapotranspiración en Cuautitlán Izcalli, México y su importancia en las actividades agrícolas* [PhD Thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000847753/3/0847753.pdf>



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



- Núñez-Magaña, T. G., Ruíz-Acosta, S. del C., Palomeque de la Cruz, M. Á., Galindo-Alcántara, A., Núñez-Magaña, T. G., Ruíz-Acosta, S. del C., Palomeque de la Cruz, M. A., & Galindo-Alcántara, A. (2022). Comportamiento de índices de sequía meteorológica a través de las dimensiones espaciales y temporales. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(2). <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3298>
- Olave-Solar, C., Santana, A., Butorovic, N., & Acuña, P. (2008). VARIABILIDAD TÉRMICA EN LA REGIÓN NORORIENTAL DE LA PENÍNSULA DE BRUNSWICK, MAGALLANES, CHILE, EMPLEANDO DATOS LANDSAT. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 36(2), 5-12. <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2008000200001>
- Orsini, J. A. M. (1982). Estimación de la evapotranspiración en el bosque húmedo tropical de la Amazonía. *Revista forestal del Perú*, 11(1-2), 1-13.
- PEDRO EMILIO, M. A. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Peña, R. V., Chávez, L. T., Nolasco, A. Q., & Pichardo, G. C. (2001). Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. *Terra Latinoamericana*, 19(3), 281-291.
- Pereyra Díaz, D., Cruz Torres, D. G., & Pérez Sesma, J. A. A. (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: Estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones geográficas*, 75, 37-50.
- Pérez Yágüez, F. (2022). *Unidad didáctica: La hidrosfera importancia del agua para los seres vivos y la gestión sostenible de los recursos hídricos*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/57636>
- Ramos, A. B., Saus, M. L. A., & Ramos, A. B. (1997). *Determinación mediante teledetección de la evapotranspiración en regadíos extensivos [Microforma]*. Univ de Castilla La Mancha.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=M1fO7VdvEvkC&oi=fnd&pg=PR1&dq=metodo+de+teledeteccion+de+evapotranspiraci%C3%B3n&ots=YI7G39VnuU&sig=IVLG11YAw2WH-W0mBmFVOrDZTDA>
- Regiones de Tabasco | Portal Tabasco*. (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2024, de <https://tabasco.gob.mx/regiones-de-tabasco>
- Reverter, B. R. (2008). *Procesamiento y QC/QA de datos micrometeorológicos [PhD Thesis, Tesis de Maestría en Técnicas Avanzadas en Física. Universidad de Granada ...]*. <https://www.ugr.es/~andyk/Theses/TesisMTAF.pdf>



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. B. (1983). *Microclimate: The biological environment*. John Wiley & Sons. https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=c6MI6VvTqTsC&oi=fnd&pg=PR17&dq=ROSENBERG,+N.+J.%3B+BLAD,+B.+L.+.%26+VERMA,+S.+B.+Microclimate,+the+biological+environment.+New+York:+John+Wiley+%26+Sons,+second+edition,+1983.&ots=GrwLbggQ95&sig=UMGF_eAi_N3fwsN47xFfqa15o1I
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))
- Sánchez, J. M., Caselles, V., Nicolòs, R., Valor, E., & Coll, C. (2005). Cálculo de la evapotranspiración real diaria en la zona norte de Finlandia empleando técnicas de teledetección. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 5, Article 5.
- Sánchez-Toribio, M. I. (1992). *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*. Sociedad Española de Geomorfología.
- Santiago-Rodríguez, S., Arteaga-Ramírez, R., Sangerman-Jarquín, D. M., Cervantes-Osornio, R., & Navarro Bravo, A. (2012). Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(8), 1535-1549.
- Santillán Gutiérrez, E., Davila-Vazquez, G., Sánchez, J. de A., & Díaz Torres, J. de J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8, 104-117.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35, 13-30.
- Sibilia, S., & Sayago, S. (2017, septiembre 29). *Radiación solar diaria a partir de un modelo de estimación y datos de satélite*. IX Congreso Argentino de AgroInformática (CAI) - JAIIO 46-CLEI 43 (Córdoba, 2017). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62718>
- Skidmore, A. K., Pettorelli, N., Coops, N. C., Geller, G. N., Hansen, M., Lucas, R., Múcher, C. A., O'Connor, B., Paganini, M., Pereira, H. M., Schaepman, M. E., Turner, W., Wang, T., & Wegmann, M. (2015). Environmental science: Agree on biodiversity metrics to track from space. *Nature*, 523(7561), 403-405. <https://doi.org/10.1038/523403a>
- Sosa, E. P., & Ramírez, G. R. G. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*, 3, Article 3. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



- Souza, M. J. H. de, Ribeiro, A., Leite, H. G., Leite, F. P., & Minuzzi, R. B. (2006). Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. *Revista Árvore*, 30, 399-410.
- Suárez, P. A., & Vega, M. (2017). *Utilización de la conectividad hidrológica para evaluar la transferencia de metales entre sedimentos fluviales*. <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/28215>
- Texeira, P., Pannunzio, A., & Brenner, J. (2021). Calibración de la ecuación de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o) en Salto, Uruguay. *Rev. Climatol*, 21, 80-88.
- Thornthwaite, C. W. (1948a). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Vasyl Cherlinka. (2023, octubre 9). *Evapotranspiración: Cómo Medirla E Influencia En La Agricultura*. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/evapotranspiracion/>
- Villalobos Martín, F. (1988). *Los procesos de evaporación, transpiración y precipitación en los modelos de programación de riegos*. [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Córdoba (ESP)]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=109433>
- Ward, J. V. (1989). The Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 8(1), 2-8. <https://doi.org/10.2307/1467397>
- Ygos González, F., Vilaragut Llanes, M., Martínez García, A., Salgado Duarte, Y., & Szpytko, J. (2022). Modelos de radiación solar a emplear en PowerFactory para la simulación de Sistemas Fotovoltaicos. *Ingeniería Energética*, 43(2), 19-26.
- Zhang, J., Bai, Y., Yan, H., Guo, H., Yang, S., & Wang, J. (2020). Linking observation, modelling and satellite-based estimation of global land evapotranspiration. *Big Earth Data*, 4(2), 94-127. <https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1743612>



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Modelo de Hargreaves para la estimación de la conectividad hidrológica en la zona urbana, tabasco.
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	José Sebastián López Osorio
ORCID:	https://orcid.org/0009-0001-3366-9339
Resumen de la Tesis:	<p>La pérdida de recursos hídricos es uno de los desastres naturales asociados al cambio climático. Como medida de acción, este estudio estima la evolución de la conectividad hidrológica vertical en un periodo de 40 años en la región de “Las Ilusiones” y “El Viento” del estado de Tabasco aplicando el modelo de Hargreaves y Samani. Los resultados indican que, en los años 1988, 1992 y 1995, la tasa de ETP obtuvo valores característicos de 1721 mm/año para la región de “Las Ilusiones” y 1699 mm/año para la de “El Viento”. Durante estos años, ambas regiones experimentaron las mayores precipitaciones, con 2749 mm y 2810 mm, respectivamente. Sin embargo, a partir del año 2012, se observó un incremento en la tasa</p>



**MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.**



	<p>de ETP del 4,39% y una disminución del 28,68% en las precipitaciones. Al análisis de estos resultados se integró el estudio del comportamiento de las variables climáticas estrechamente relacionadas con la ETP, tales como la radiación solar incidente y la temperatura. En los primeros años del estudio, la radiación solar incidente fue superior en la región de “Las Ilusiones”, con un valor promedio de 9,5 MJulios/m²/año. Desde 1997, los valores de radiación solar en la región de “El Viento” comenzaron a aumentar hasta alcanzar el mismo valor que en “Las Ilusiones” en 2013. Mientras tanto, la temperatura se mantuvo relativamente constante durante gran parte del período estudiado. No obstante, a partir de 2012, se observó un aumento en ambos sitios de estudio. Este incremento fue de 1 °C, lo que podría estar relacionado con el aumento de la radiación solar. Finalmente, los resultados muestran un desequilibrio entre la oferta hídrica y la demanda evaporativa, directamente relacionado con el cambio del régimen de precipitaciones y el incremento de la temperatura, por lo que es necesario tomar acciones para promover entornos más sostenibles.</p>
--	---



MODELO DE HARGREAVES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN LA ZONA URBANA CENTRO, TABASCO.



Palabras claves de la Tesis:	Palabras clave: Evapotranspiración, Variabilidad, Disponibilidad, Caracterización.
Referencias citadas:	<p>Aguilera Contreras, M., & Martínez Elizondo, R. (1996). <i>Relaciones agua suelo planta atmósfera</i>. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo (México).</p> <p>Alcón, F. J., Arcas, N., De-Miguel, M. D., & Fernández-Zamudio, M. A. (2009). Adopción de tecnologías ahorradoras de agua en la agricultura. En <i>Electronico</i> (pp. 127-146). Cajamar Caja Rural. https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/6859</p> <p>Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006a). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. <i>Roma: FAO</i>, 298(0). https://www.academia.edu/download/56775147/Tabla_del_Coeficiente_del_cultivo_Kc.pdf</p> <p>Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes y Smith, M. (1998b).- Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 (http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents)</p> <p>Almorox, J., Elisei, V., Aguirre, M. E., & Commegna, M. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina. <i>Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo</i>, 44(1), 101-109.</p>