



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS CAMPECHE

POSTGRADO DE BIOPROSPECCIÓN Y SUSTENTABILIDAD  
AGRÍCOLA EN EL TRÓPICO

## EFECTO DEL PERIODO DE LLUVIAS EN LA APTITUD DE TIERRAS PARA LA AGRICULTURA DE SECANO EN CAMPECHE

CECILIA GONZÁLEZ PÉREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

SIHOCHAC, CHAMPOTÓN, CAMPECHE, MÉXICO

2023



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Efecto del periodo de lluvias en la aptitud de tierras para la agricultura de secano en Campeche**, realizada por la estudiante, **Cecilia González Pérez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN  
BIOPROSPECCIÓN Y SUSTENTABILIDAD AGRÍCOLA EN EL TRÓPICO

## CONSEJO PARTICULAR

**CONSEJERO**

DR. ALBERTO SANTILLÁN FERNÁNDEZ

**CODIRECTOR**

DR. PABLITO MARCELO LÓPEZ SERRANO

**ASESOR**

DRA. MARTHA ELVA RAMÍREZ GUZMÁN

**ASESOR**

DR. VICTOR HUGO QUEJ CHI

**ASESOR**

DR. EUGENIO CARRILLO ÁVILA

Sihochac, Champotón, Campeche, México, febrero del 2023

# **EFFECTO DEL PERIODO DE LLUVIAS EN LA APTITUD DE TIERRAS PARA LA AGRICULTURA DE SECANO EN CAMPECHE**

**Cecilia González Pérez, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2023**

## **RESUMEN**

La agricultura de secano se practica en el 83 % de las tierras cultivadas y produce más del 60 % de los alimentos a nivel mundial. Conocer la distribución espacial del régimen hídrico y asociarlo con la capacidad del suelo es importante para hacer uso eficiente de los recursos hídricos, en especial en la agricultura de secano. Por ello, analizar y estudiar el cambio en el patrón espacial y temporal del régimen hídrico es importante para la toma de decisiones. En virtud de ello el objetivo del presente estudio fue identificar y delimitar zonas idóneas para el establecimiento de agricultura de temporal en los diferentes periodos de producción: Anual, Primavera-Verano (P-V) y Otoño-Invierno (O-I) en el estado de Campeche, mediante la modelación geoespacial de variables agroecológicas del territorio. Para ello se utilizó cartografía del Índice de Humedad (IH) y de Capacidad de Uso de Suelo (CUS) para el estado de Campeche. La superposición ponderada de la variable interpolada de IH y la variable Capacidad de Uso de Suelo (CUS) se efectuó en un Sistema de Información Geográfica, lo que delimitó zonas con capacidad: optima, muy adecuada, adecuada, aceptable y no apta.

**Palabras clave:** Índice de humedad, evapotranspiración potencial, evaluación multicriterio, SIG, Kriging ordinario, Variograma.

# **EFFECT OF THE RAINY SEASON ON LAND SUITABILITY FOR RAINFED AGRICULTURE IN CAMPECHE**

**Cecilia González Pérez, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2023**

## **ABSTRACT**

Rainfed agriculture is practiced on 83% of cultivated land and produces more than 60% of the world's food. Knowing the spatial distribution of the water regime and associating it with soil capacity is important to make efficient use of water resources, especially in rainfed agriculture. Therefore, analyzing and studying the change in the spatial and temporal pattern of the water regime is important for decision making. By virtue of this, the objective of this study was to identify and delimit suitable areas for the establishment of seasonal agriculture in the different production periods: Annual, Spring-Summer (P-V) and Autumn-Winter (O-I) in the state of Campeche, through geospatial modeling of agroecological variables of the territory. To this end, mapping of the Moisture Index (MI) and Land Use Capacity (LUC) for the state of Campeche was used. The weighted superposition of the interpolated variables MI and LUC was carried out in a Geographic Information System, which delimited areas with capacity: optimal, very adequate, adequate, acceptable and not suitable.

**Key words:** Humidity index, evapotranspiration potential, multicriteria evaluation, GIS, Ordinary kriging, Variogram.

## **DEDICATORIA**

Porque de él, y por él, y para él, son todas las cosas.

A él sea la gloria por los siglos.

A mi familia, en especial a mi madre, Valentina, por su gran amor y apoyo en todo momento.

A mis sobrinos porque con sus pequeñas sonrisas alegran mis días.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología (CONACyT ) por el financiamiento económico el cual me permitió permanecer y terminar el postgrado.

Al Colegio de Postgraduados Campus Campeche por abrirme las puertas para poder continuar mis estudios de postgrado.

Especial agradecimiento al consejo particular de este trabajo por el apoyo y asesoramiento para mejoras del trabajo, agradezco particularmente al Dr. Alberto Santillán Fernández por guiarme en el trabajo de investigación, por sus conocimientos, su paciencia y el tiempo prestado.

Agradezco al Dr. Jaime Bautista, Dra. Zulema Guadalupe Huicab y a la Lic. Magdalilia Arredondo por animarme siempre para continuar con dicha investigación y de la misma forma por las experiencias vividas, la atención y cariño que mostraron durante la estancia en el Colegio.

Al que me acompaño, me apoyo, permaneció al pendiente durante malos momentos, por su complicidad y confianza, a mi buen amigo Abimael.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES.....	2
OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
Hipótesis.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específico .....	4
CAPITULO I. ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA SOBRE MODELOS PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CULTIVOS AGRÍCOLAS .....	5
1.1 RESUMEN.....	5
1.2 INTRODUCCIÓN.....	5
1.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
1.3.1 Origen de la información .....	7
1.3.2 Indicadores bibliométricos.....	7
1.3.3 Análisis con minería de textos.....	8
1.3.4 Análisis de redes.....	8
1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	8
1.4.1 Producción científica sobre modelos para estimar índice de humedad.....	8
1.4.2 Indicadores bibliométricos.....	11
1.4.3 Redes de autor y colaboradores .....	17
CAPÍTULO II. VARIOGRAMAS TEÓRICOS PARA KRIGING ORDINARIO EN LA VARIACIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE HUMEDAD EN CAMPECHE, MÉXICO (1975-2015).....	18

2.1 RESUMEN.....	18
2.2 INTRODUCCIÓN.....	18
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
CAPÍTULO 3. EFECTO DEL PERIODO DE LLUVIAS EN LA APTITUD DE TIERRAS	
PARA AGRICULTURA DE SECANO EN CAMPECHE.....	31
3.1 RESUMEN.....	31
3.2 INTRODUCCIÓN.....	31
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
3.3.1 Área de estudio.....	33
3.3.2 Insumos geoespaciales. ....	34
3.4 RESULTADOS.....	36
3.4.1 Anual IH PNUMA.....	38
3.4.2 Primavera – Verano IH PNUMA.....	39
3.4.3 Otoño – Invierno IH PNUMA.....	40
3.5 DISCUSIÓN.....	41
CONCLUSIONES GENERALES .....	43
LITERATURA CITADA.....	45

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Indicadores bibliométricos de las principales revistas que publicaron artículos científicos sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, ordenadas según el número de artículos publicados. ....	13
<b>Cuadro 2.</b> Modelos matemáticos de las metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, ordenadas según el número de artículos publicados. ....	14
<b>Cuadro 3.</b> Estadísticas descriptivas de los datos de Índice de Humedad (IH) en cada periodo evaluado para el Estado de Campeche. ....	23
<b>Cuadro 4.</b> Datos de los Modelos de Variogramas Teóricos (MVT) de índice de Humedad (IH) para la interpolación mensual, por temporada y anual. ....	26
<b>Cuadro 5.</b> Unidades de Capacidad de Uso del Suelo. ....	35
<b>Cuadro 6.</b> Variables y su Reclasificación. ....	36

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura de la investigación efecto del periodo de lluvias en la aptitud de tierras para la agricultura de secano en Campeche .....	3
<b>Figura 2.</b> Evolución temporal de la producción científica y citas bibliográficas sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, de 1984 a 2020 .....	9
<b>Figura 3.</b> Relación espacial de la producción de artículos científicos sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, de 1984 a 2020.....	10
<b>Figura 4.</b> Principales naciones y áreas de investigación, según el país de origen del primer autor en los artículos científicos sobre modelos para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, de 1984 a 2020.....	11
<b>Figura 5.</b> Red de autores a nivel mundial que han publicado artículos científicos sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola. El tamaño del nodo corresponde con su productividad. ....	17
<b>Figura 6.</b> Ubicación del área de estudio y distribución de estaciones climatológicas utilizadas para la estimación del Índice de Humedad en el estado de Campeche, México.....	21
<b>Figura 7.</b> Distribución de los datos de Índice de Humedad (IH) en cada periodo evaluado para el Estado de Campeche. ....	22
<b>Figura 8.</b> Gráficos de Modelos de Variograma Teórico (MVT) mejor ajustados al índice de Humedad (IH) en el estado de Campeche.....	25
<b>Figura 9.</b> Validación cruzada los Modelos de Variograma Teórico (MVT) mejor ajustados al índice de Humedad (IH) en el estado de Campeche. ....	28
<b>Figura 10.</b> Mapas de Predicción Mensual de los mejores Modelos de Variograma Teórico (MVT) para el Índice de Humedad (IH) en Campeche. ....	29
<b>Figura 11.</b> Mapa de Error estándar de predicción Mensual de los mejores Modelos de Variograma Teórico (MVT) para el Índice de Humedad (IH) en Campeche.....	30
<b>Figura 12.</b> Uso de suelo del estado de Campeche. Fuente: Elaboración propia con datos de la serie VI. Uso de Suelo y Vegetación INEGI (2021).....	34
<b>Figura 13.</b> Cartografía de Capacidad de Uso de Suelo y la reclasificación de las áreas que calificaron en una capacidad de I a IV en el estado de Campeche. ....	36

**Figura 14.** Representación cartográfica de la variable Índice de Humedad (IH) reclasificada en el estado..... 37

**Figura 15.** Uso potencial del suelo para agricultura de temporal en el periodo anual en Campeche..... 39

**Figura 16.** Uso potencial del suelo para agricultura de temporal en el periodo Primavera-Verano en Campeche. .... 40

**Figura 17.** Uso potencial del suelo para agricultura de temporal en el periodo Otoño-Invierno en Campeche. .... 41

## INTRODUCCIÓN

Los campos en los que se requiere conocer la distribución espacial de la precipitación son diversos, entre éstos se encuentran la hidrología, agricultura y climatología. En hidrología, es un insumo importante para el modelado de la predicción de eventos extremos, como crecientes en el flujo superficial de agua e inundaciones. La presencia de lluvia durante el año es importante, porque influye en la productividad del sector agrícola, en especial, en la agricultura de temporal, que depende directamente de las precipitaciones, lo que la hace vulnerable a la variabilidad interanual e interestacional de la precipitación. Aunado a ello, el cambio climático tiene impactos directos sobre el régimen de precipitación.

El régimen de precipitación afecta directamente a los cultivos de secano e influye en la productividad agrícola de una región (Englehart y Douglas, 2000). Los cultivos para poder crecer y desarrollarse necesitan absorber agua del suelo; cuando el contenido de humedad es bajo, se dificulta la absorción. De acuerdo con Van Ittersum y Rabbinge (1997) y Van Ittersum *et al.* (2003) los factores limitantes (o incrementadores) del crecimiento y rendimiento de un cultivo son: agua y nutrientes. Si la oferta de ellos es limitada, la tasa de crecimiento, y el rendimiento, son menores a los potenciales.

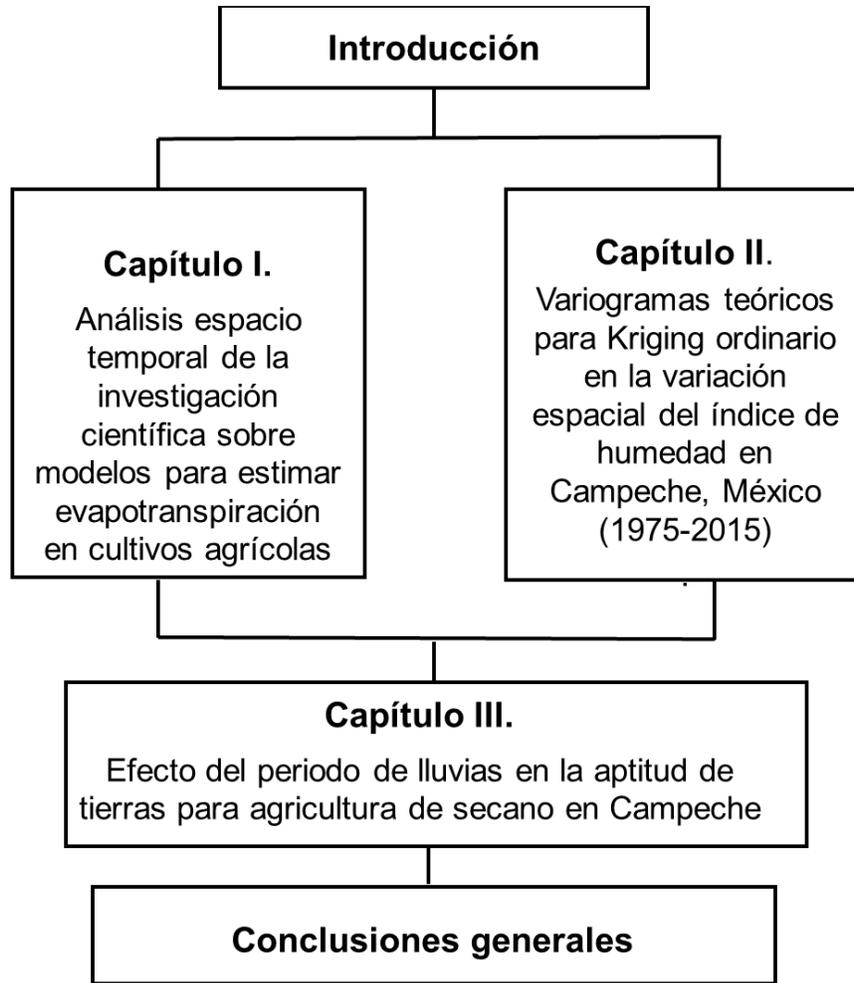
El cambio climático tiene impactos directos sobre la precipitación, lo cual afecta en la adecuada gestión de los recursos hídricos. La agricultura, sobre todo la de régimen hídrico de secano es uno de los sectores más vulnerables a las variaciones de las precipitaciones, (Tinoco *et al.*, 2010), por ello la importancia de analizar y estudiar el cambio en el patrón espacial y temporal de la precipitación es importante para la gestión de insumos que garanticen mejores rendimientos en campo.

## ANTECEDENTES

La productividad agrícola en el estado de Campeche es baja en comparación con otros estados como Sonora, Sinaloa, Chihuahua Jalisco, Michoacán y Veracruz (SIAP, 2020). Aunque la productividad agrícola es el resultado de múltiples factores, de acuerdo con Medina-Méndez *et al.* (2018) la baja productividad de Campeche se explica por la proporción de 1 ha de riego por 2.54 ha de secano, lo que hace que el estado dependa en su mayoría de la estacionalidad de las lluvias. En virtud de ello se hace necesario conocer el potencial productivo de las tierras agrícolas asociado a su régimen hídrico (Murray-Tortarolo *et al.*, 2018).

El estado de Campeche se erige como un terreno favorable para las actividades agrícolas, es el primer productor de arroz palay a nivel nacional y segundo de soya, además de cultivar maíz grano, sandía y caña de azúcar (SIAP, 2020). Algunos de los efectos directos del cambio climático en el sector agrícola son la modificación del régimen pluviométrico, cambios en la velocidad y ocurrencia de vientos, aumento de horas calor, y aumento de la desertificación (ST-CICC, 2021).

Bajo este contexto la investigación **Efecto del periodo de lluvias en la aptitud de tierras para la agricultura de secano en Campeche** se planteó desde un enfoque inductivo donde en una primera instancia (Capítulo I) se analizó la investigación científica que se ha desarrollado en torno a las metodologías para la estimación del índice de humedad, en un segundo capítulo se delimitaron de manera teórica modelos para la estimación del índice de humedad en el estado de Campeche, y en un tercer capítulo se desarrolló cartografía de aptitud para la agricultura de secano en el estado de Campeche. De esta manera la estructura de la investigación estuvo dada por la Figura 1.



**Figura 1.** Estructura de la investigación efecto del periodo de lluvias en la aptitud de tierras para la agricultura de secano en Campeche

## **OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **Hipótesis**

Existe un descenso en las precipitaciones y un cambio en la estacionalidad de las mismas para el estado de Campeche, que afecta la productividad agrícola de secano.

### **Objetivo General**

Desarrollar cartografía de aptitud para la agricultura de secano en el estado de Campeche, mediante análisis espacial que relacione la estacionalidad de las lluvias con el índice de humedad, para determinar el potencial productivo agrícola en el estado.

### **Objetivos Específico**

Identificar los principales trabajos que se han desarrollado sobre el efecto de las precipitaciones en el potencial productivo agrícola de secano, mediante técnicas bibliométricas para determinar las principales metodologías geoestadísticas que se emplean en este tipo de análisis

Identificar la intensidad de los periodos de lluvias en Campeche, mediante diagramas bioclimáticos para determinar las variaciones temporales a lo largo del año para el periodo 1979-2016.

Relacionar la estacionalidad de las lluvias con el índice de humedad, para determinar el potencial productivo agrícola en el estado.

# **CAPITULO I. ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA SOBRE MODELOS PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CULTIVOS AGRÍCOLAS**

## **1.1 RESUMEN**

La eficiencia hídrica para el uso en la agricultura, ha promovido el desarrollo de investigaciones sobre modelos que estiman la evapotranspiración potencial en los cultivos agrícolas como una medida de eficientizar el recurso agua. En este sentido el objetivo de la presente investigación fue analizar la evolución espacio-temporal de la producción científica sobre las metodologías para la estimación de la evapotranspiración potencial de un cultivo agrícola (ETP), mediante minería de textos para determinar en función de variables climáticas disponibles, las mejores metodologías para el cálculo de la ETP. Para ello se recopilaron 475 artículos científicos disponibles en la Web of Science, cuyo objeto de estudio fue el desarrollo de metodologías para la estimación de ETP en agricultura. Se encontró un crecimiento exponencial en la publicación de los textos de 1984 a 2020. Los modelos de mayor desarrollo se han centrado en los propuestos por FAO- Penman-Monteith, Penman-Monteith, y Thornthwaite, que han sido aplicados principalmente a cultivos como maíz, sorgo, soya y papa. Las regiones donde se ha desarrollado más conocimiento sobre las metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, coincidieron con los principales países agrícolas a nivel mundial: Estados Unidos, China, Brasil, e India.

## **1.2 INTRODUCCIÓN**

Para determinar los requerimientos de agua de un cultivo, la metodología del Balance Hídrico Climático (BHC) resulta ser una buena herramienta, ya que mide la cantidad de agua proveniente de la lluvia que la vegetación dispone en un ecosistema dado (Ruíz-Álvarez *et al.*, 2012). Además, el BHC permite conocer el potencial de evapotranspiración, exceso y déficit hídrico a lo largo de una temporada para una región determinada, lo que permite la estimación del índice de humedad (Sentelhas *et al.*, 2008). De acuerdo con Malamos *et al.* (2015), dentro de los métodos para determinar la evapotranspiración potencial el de más simple cálculo es el propuesto por Thornthwaite y Mather (1957) al requerir solo datos de temperatura, precipitación y capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

El período de lluvias es motor de desarrollo para todas aquellas actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos hídricos. La precipitación como tal, es una variable hidrológica que se puede caracterizar a través de su intensidad, su distribución espacio-temporal y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia (González *et al.* 2013). De acuerdo con la FAO (1996) la duración del período de lluvias se determina por el índice de humedad (IH) que es el cociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial.

La publicación de un trabajo científico, es el modo más efectivo de transmitir un conocimiento adquirido como consecuencia de la investigación, y su visibilidad es importante para los propios investigadores, para las instituciones en que trabajan y las organizaciones que financian la investigación (Chao *et al.*, 2007). El crecimiento de la producción científica en las últimas décadas y su indización en bases de datos bibliográficas automatizadas han potenciado el uso de la bibliometría y la generación de indicadores para medir los resultados de la actividad científica y tecnológica (Bravo-Vinaja y Sanz-Casado, 2008).

Los estudios bibliométricos a partir de los artículos científicos publicados se basan en la aplicación de métodos cuantitativos, generación de indicadores y modelos matemáticos, que permiten caracterizar su desarrollo y evolución (Peng, 2017). Mediante los indicadores bibliométricos se pueden evaluar las revistas y otras publicaciones periódicas de manera objetiva, observar las tendencias que siguen y generar información útil para mejorar su gestión (Chao *et al.*, 2007).

Conocer la información científica que se desarrolla alrededor de un tópico permite tomar decisiones en relación con su mejoramiento (Martínez-Santiago *et al.*, 2017). En el sector hidro-agrícola se han desarrollado estudios bibliométricos para evaluar temas generales de agronomía (Cañas-Guerrero *et al.*, 2013), temas específicos como agricultura ecológica (Aleixandre *et al.*, 2015), frutas y hortalizas (Tatry *et al.*, 2014) e incluso para agrónomos en particular (Nayak y Bankapur, 2017), revistas agrícolas (Bravo-Vinaja, 2015), sectores agrícolas nacionales (Bravo-Vinaja y Sanz-Casado, 2008) y cultivos específicos como trigo y cebada (Giraldo *et al.*, 2019), y arroz (Peng, 2017; Sun y Yuan, 2020).

Sin embargo, a pesar del crecimiento en el número de publicaciones que se ha presentado en el sector hidro-agrícola en temas relacionados con el cálculo del balance hídrico y específicamente con la evapotranspiración potencial de un cultivo, existe poca investigación que evalúe la

evolución y el impacto de estas publicaciones (Espinoza-Calderón *et al.*, 2014). En virtud de ello el objetivo del presente trabajo fue analizar la evolución espacio-temporal de la producción científica sobre las metodologías para la estimación de la evapotranspiración potencial de un cultivo agrícola (ETP), mediante minería de textos para determinar en función de variables climáticas disponibles, las mejores metodologías para el cálculo de la ETP.

### **1.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **1.3.1 Origen de la información**

En este estudio, se consideraron artículos científicos donde se aplicaron modelos matemáticos para el cálculo de la evapotranspiración potencial en un cultivo agrícola. Para la recopilación de los textos se revisó la base de datos de artículos de revistas de acceso abierto de la Web of Science (CONACYT, 2021). Los textos se recopilaron en mayo de 2021, y se consideraron textos publicados hasta 2020. La palabra clave utilizada en la búsqueda fue *potential evapotranspiration* identificándola en los títulos y palabras clave de las publicaciones. Solo se utilizó la palabra clave en el idioma inglés por considerar que es más probable que los textos en inglés se citen; lo que permite capturar la mayoría de las publicaciones relevantes (Leipold, 2014).

#### **1.3.2 Indicadores bibliométricos**

Las variables analizadas de cada uno de los textos publicados fueron: *nombre de la revista*, que sirvió para determinar el perfil de las revistas que publican trabajos afines al tópico de potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola. Las variables *autor*, y *país de origen del primer autor*, sirvieron para conocer la red de actores involucrados en la investigación, y la representación espacial de los países con el mayor número de publicaciones; *año* para colocar la información en una línea temporal. El *título*, *resumen* y *palabras clave* se empleó para categorizar el tópico que aborda la publicación conforme la clasificación de la Web of Science; y finalmente, con el *número de citas* se determinó el impacto de las publicaciones.

La captura de las variables para el análisis bibliométrico se realizó en una hoja de cálculo. Se respetó el idioma original de cada uno de los textos. Durante la captura de toda la información, se estandarizaron algunos registros, debido a que la información disponible en los textos algunas veces estuvo incompleta o se presentó con variantes (Aguado-López *et al.*, 2009). Además, se

eliminaron o cambiaron caracteres especiales como: ñ (por n), acentos, superíndices, subíndices, ®, ©, entre otros, para facilitar el análisis.

### **1.3.3 Análisis con minería de textos**

Con ayuda del complemento RcmdrPlugin.temis del software estadístico R (Bouchet-Valat y Bastin, 2013) se obtuvo el número de textos y citas bibliográficas por: año, revista, tema de investigación y país donde se originó la investigación.

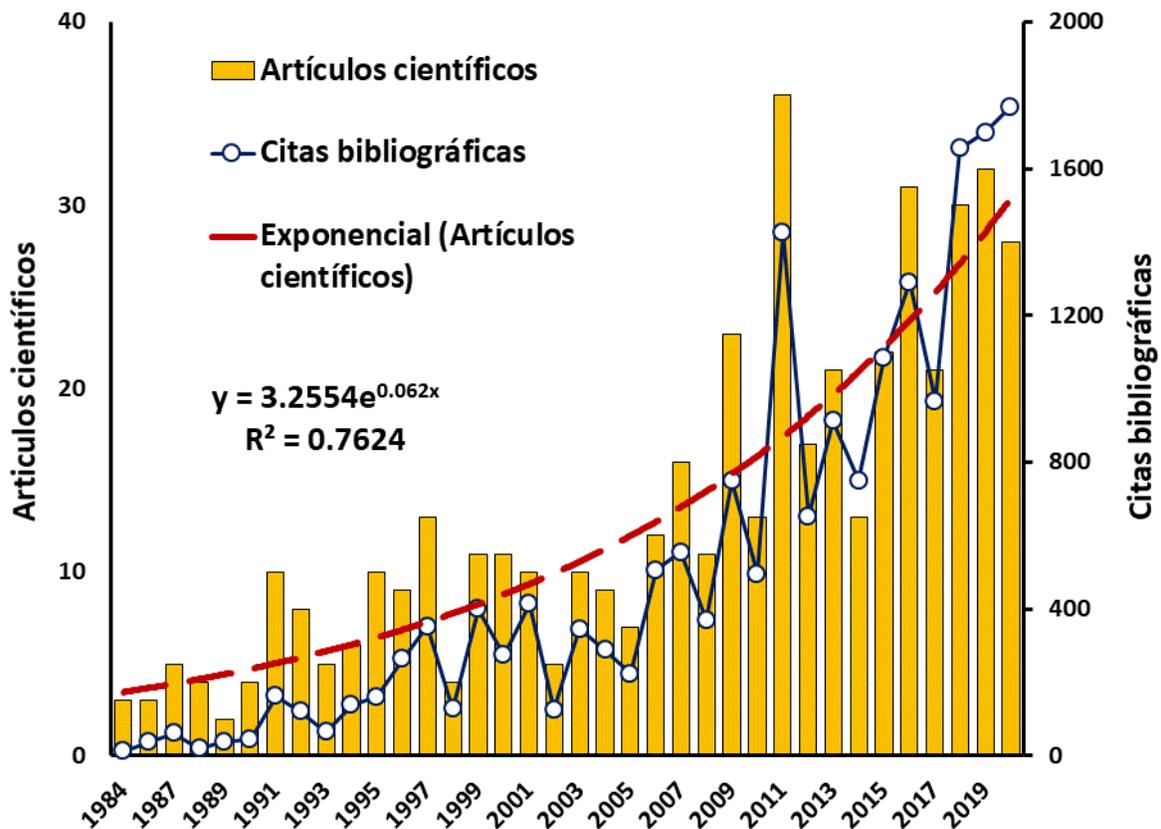
### **1.3.4 Análisis de redes**

Con el software Sci2tool (Börner, 2011) se analizaron las interacciones que existen entre los autores con la finalidad de conocer la constancia en la labor del investigador; es decir, evaluar si ha publicado solo en un año o bien ha publicado de manera constante a través del tiempo, lo que da una idea de su consolidación en el tópico para el cálculo del potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola. La sintaxis empleada en el software Sci2tool fue *Extract bipartite Network*, para su visualización se recurrió al software Gephi (Bastian *et al.*, 2009). Finalmente, la representación espacial del número de artículos por país donde se originó la investigación, se efectuó en el paquete geográfico ARGIS® (ESRI, 2015).

## **1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **1.4.1 Producción científica sobre modelos para estimar índice de humedad**

De 1984 a 2020 se publicaron un total de 475 textos científicos cuyo objeto de estudio fue el desarrollo y/o aplicación de la metodología para el cálculo del potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola (Figura 2). Los 475 textos científicos originaron 18548 citas bibliográficas. El periodo de 2011 a 2020 concentró el 52.84 % de los textos (251), y el 65.79 % de las citas bibliográficas (12202). De acuerdo con Malamos *et al.* (2015), el crecimiento exponencial ( $R^2 = 0.7624$ ) en la publicación de textos sobre metodologías para la estimación del potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, se explica por la necesidad de hacer más eficiente el uso del agua para la agricultura ante las variaciones climáticas actuales; en complemento Santillán-Fernández *et al.* (2021) encontró que cuando el crecimiento temporal entre los textos científicos y sus citas bibliográficas es directamente proporcional, se está ante tópicos de alta relevancia para la comunidad científica.

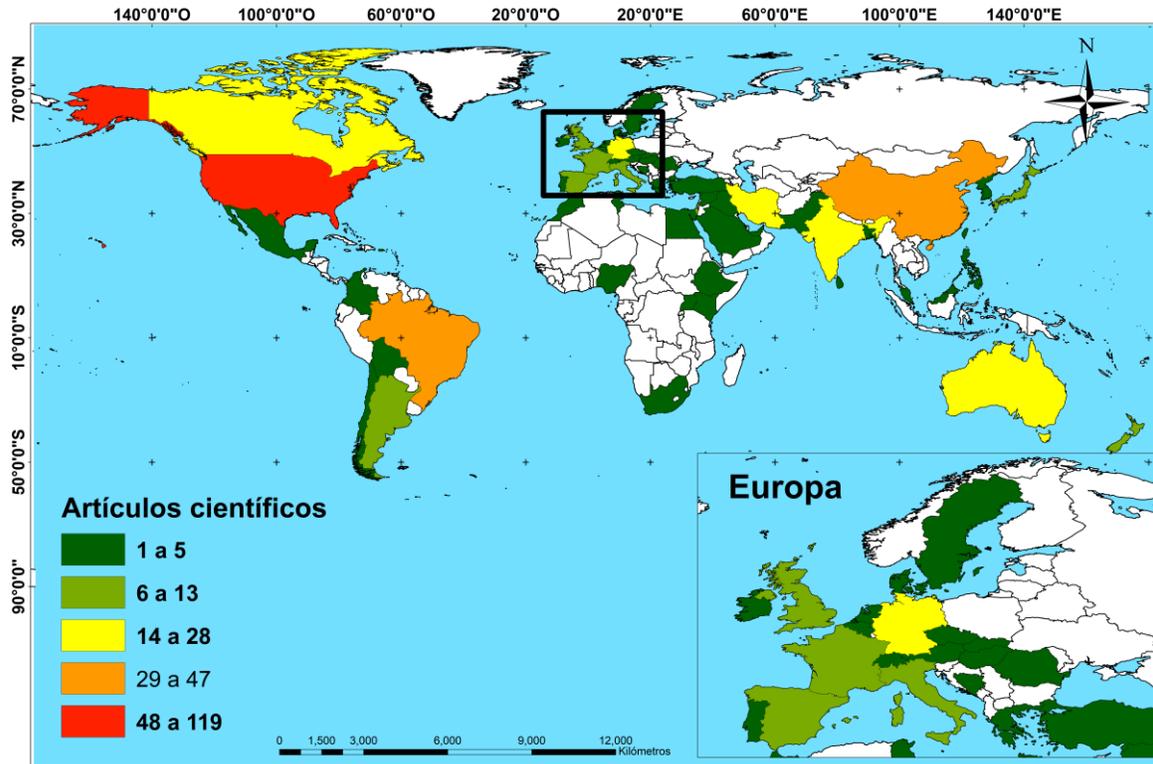


**Figura 2.** Evolución temporal de la producción científica y citas bibliográficas sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, de 1984 a 2020

De acuerdo con el país de origen del primer autor, los 475 trabajos se originaron en 58 países. El 76.81% (371) se concentró en doce países: Estados Unidos (119 textos, 24.64%), China (47, 9.73%), Brasil (46, 9.52%), Irán (28, 5.80%), India (26, 5.38%), Canadá (23, 4.76%), Australia (17, 3.52%), Alemania (16, 3.31%), España (13, 2.69%), Reino Unido (13, 2.69%), Argentina (12, 2.48%), e Italia (11, 2.28%) (Figura 2). En la Figura 3 también se observa que la mayoría de la investigación que se ha desarrollado en torno a las metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, se ha dado en países con tradición agrícola como Estados Unidos, China, Brasil, e India.

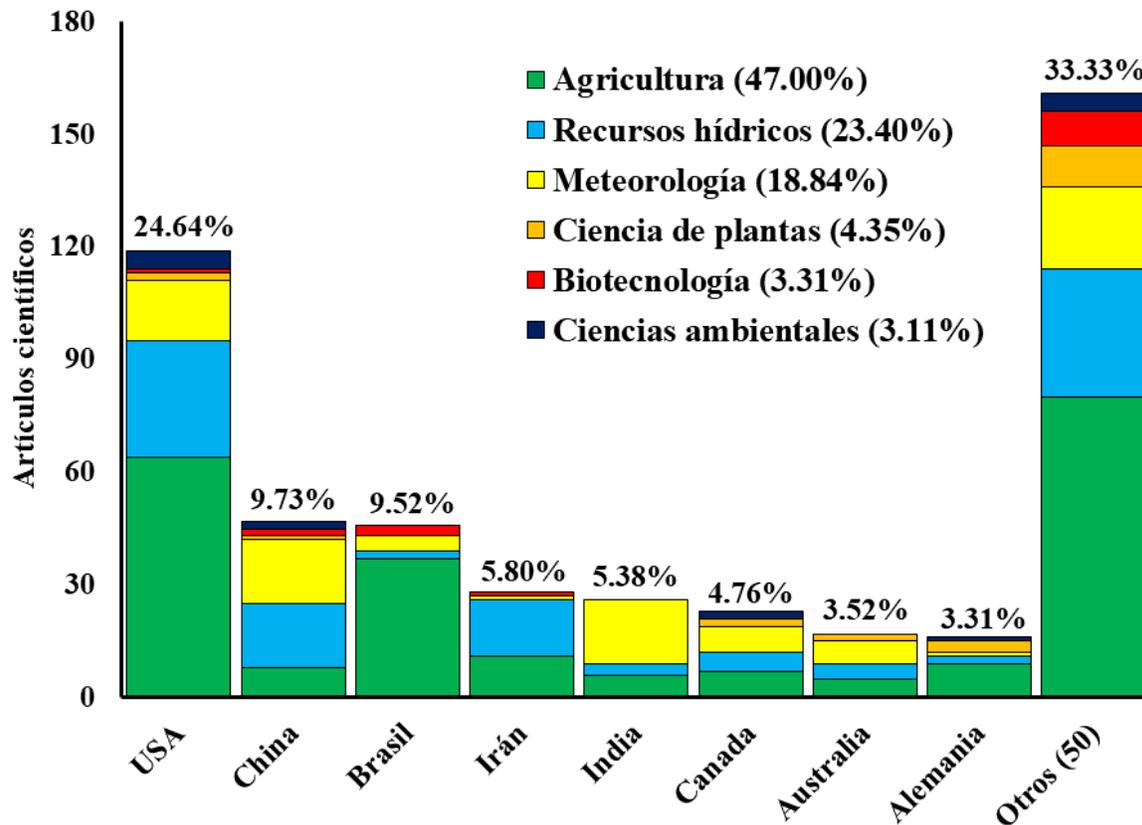
De acuerdo con Gersbach y Schneider (2015) el desarrollo agrícola de un país está relacionado directamente con la calidad de las investigaciones que realiza; países con economías consolidadas invierten más en sus centros de investigación, lo que les permite un mayor desarrollo tecnológico,

a diferencia de las economías en subdesarrollo como las Latinoamericanas donde la inversión en investigación es menor; de tal forma que la competitividad del sector agrícola en un país está relacionada directamente con la calidad de las investigaciones que realiza en dicho sector.



**Figura 3.** Relación espacial de la producción de artículos científicos sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, de 1984 a 2020.

Para el caso de las principales áreas de investigación donde se ha desarrollado nuevo conocimiento sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, se encontró que aquellos que se asocian con temas de agricultura fueron un tópico de moda entre la comunidad científica con 219 textos (47.00%), seguido de temas sobre recursos hídricos (113 textos, 23.40%), meteorología (91, 18.84%), ciencia de plantas (21, 4.35%), biotecnología (16, 3.31%), y ciencias ambientales (15, 3.11%) (Figura 4). Respecto a los países con el mayor número de publicaciones, destaca el hecho de que los principales países agrícolas de América (Estados Unidos y Brasil) han centrado el desarrollo de investigación en temas asociados a agricultura y recursos hídricos, mientras que para el caso de los países asiáticos (China e India) por su condición de vulnerabilidad ante el cambio climático se han centrado en el desarrollo de modelos meteorológicos.



**Figura 4.** Principales naciones y áreas de investigación, según el país de origen del primer autor en los artículos científicos sobre modelos para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, de 1984 a 2020.

#### 1.4.2 Indicadores bibliométricos

Los 475 artículos científicos analizados se publicaron en 96 revistas científicas. Un total de 266 artículos, el 55.07% y 12304 citas bibliográficas, el 64.73%, se concentraron en 10 revistas con factores de impacto superiores a 2 (Cuadro 1). La especialización de las 10 principales revistas, se centró en temas: agrícolas (6), recursos hídricos (2) y meteorología (2). La casa editorial Elsevier coordina los trabajos de publicación de 4, y Springer (1), lo que de acuerdo con Santillán-Fernández *et al.* (2021) ayuda a mejorar el impacto de las publicaciones al incrementar la probabilidad de llegar a un mayor número de usuarios.

Respecto a los modelos matemáticos para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, se encontraron nueve modelos principales, entre ellos los más frecuentes fueron: FAO-Penman-Monteith que apareció en 151 textos analizados (31.79%), Penman-Monteith (124, 26.11%), y Thornthwaite (54, 11.37%) (Cuadro 2). De acuerdo con Malamos *et al.* (2015), dentro

de todos estos modelos, el de cálculo más simple para determinar la evapotranspiración potencial es el propuesto por Thornthwaite y Mather (1957).

**Cuadro 1.** Indicadores bibliométricos de las principales revistas que publicaron artículos científicos sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, ordenadas según el número de artículos publicados.

Revista	Países	Institución	(WoS, 2020)	Área de especialización	Artículos		Citas	
					Número	%	Número	%
Agric. For. Meteorol.	Países bajos	Elsevier	5.734 (Q1)	Agronomy; Forestry; and Meteorology	73	15.11	3889	20.46
Agric. Water Manage.	Países bajos	Elsevier	4.516 (Q1)	Agricultural water management	70	14.49	3682	19.37
Agron. J.	USA	American Society of Agronomy	2.829 (Q2)	Agronomía	22	4.55	882	4.64
J. Irrig. Drainage Eng-ASCE	USA	American Society of Civil Engineers	1.34 (Q3)	Water Science and Technology	20	4.14	772	4.06
J. Agrometeorol.	India	Association of Agrometeorologists	0.48 (Q4)	Atmospheric Science	17	3.52	194	1.02
Trans. ASABE	USA	American Society of Agricultural and Biological Engineers	1.238 (Q2)	Agronomy and Crop Science	17	3.52	857	4.51
Agric. Ecosyst. Environ.	USA	Elsevier	6.576 (Q1)	Agronomy and Crop Science	14	2.90	872	4.59
Irrig. Sci.	Germany	Springer	2.94 (Q1)	Water Science and Technology	14	2.90	509	2.68
Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.	Brazil	Universidad Federal de Campina Grande	1.36 (Q2)	Agronomy and Crop Science	10	2.07	235	1.24
Eur. J. Agron.	Países bajos	Elsevier	5.52 (Q1)	Agronomy and Crop Science	9	1.86	412	2.17
Otras (86)					209	44.93	6244	35.27
Total (96)					475	100.0	18548	100.0

**Cuadro 2.** Modelos matemáticos de las metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, ordenadas según el número de artículos publicados.

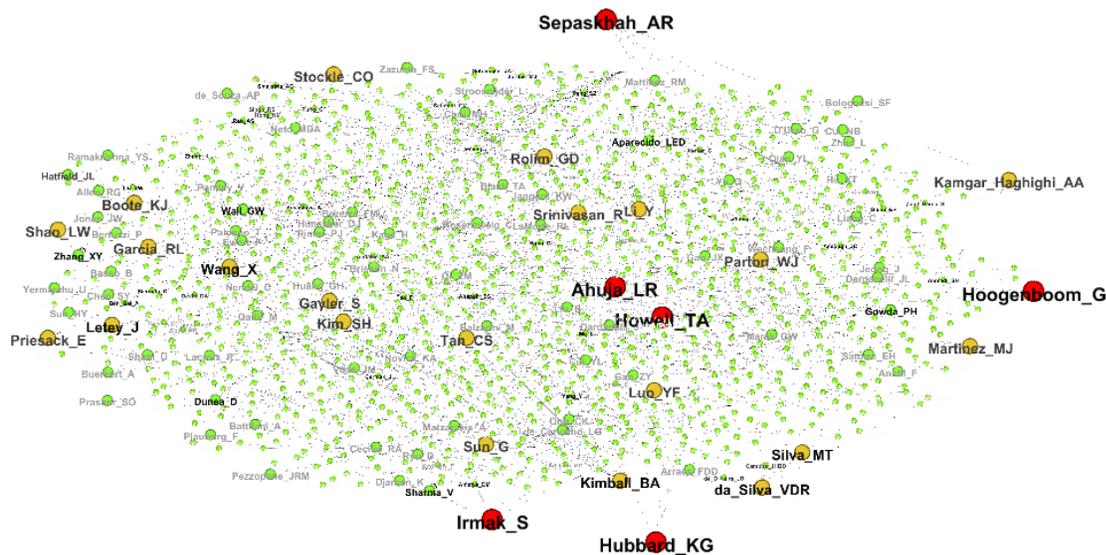
Método	Fórmula	Variables
FAO-Penman-Monteith (151, 31.79%)	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 [e_s - e_a]}{\Delta + \gamma [1 + 0.34u_2]}$	<p><math>ET_0</math> = Evapotranspiración de referencia [mm día<sup>-1</sup>]  <math>R_n</math> = Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]  <math>G</math> = densidad de flujo de calor del suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]  <math>T_{mean}</math> = temperatura del aire a 2 m de altura [°C]  <math>u_2</math> = velocidad del viento a 2 m de altura [m s<sup>-1</sup>]  <math>e_s</math> = presión de vapor de saturación [kPa]  <math>e_a</math> = presión de vapor real [kPa]  <math>\Delta</math> = pendiente de la curva de presión de vapor de saturación [kPa °C<sup>-1</sup>]  <math>\gamma</math> = constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>]  <math>ET_0</math> = Evapotranspiración de referencia [mm día<sup>-1</sup>]  <math>\Delta</math> = pendiente de la curva de presión de vapor de saturación [kPa °C<sup>-1</sup>]</p>
Penman-Monteith (124, 26.11%)	$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \left[ \frac{c_p - D}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma \left[ 1 + \left( \frac{r_c}{r_a} \right) \right]}$	<p><math>R_n</math> = Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]  <math>G</math> = densidad de flujo de calor del suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]  <math>c_p</math> = significa el calor específico del aire [J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>]  <math>D</math> = déficit de vapor de agua (kPa)  <math>\gamma</math> = significa la constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>]  <math>r_a</math> = representa la resistencia aerodinámica [s m<sup>-1</sup>]  <math>r_c</math> = representa la resistencia de la superficie del dosel [s m<sup>-1</sup>]  <math>ET_{TH}</math> = evapotranspiración potencial calculada con la ecuación de Thornthwaite [mm día<sup>-1</sup>]  <math>T_{mean}</math> = temperatura media del aire para cada mes [°C]</p>
Thornthwaite (54, 11.37%)	$ET_{TH} = 16 \left( 10 \frac{T_{mean}}{I} \right)^a \frac{N}{360}$	

Método	Fórmula	Variables
Hargreaves-Samani (33, 6.95%)	$ET_{HS} = 0.0023 * 0.408 * H_0 * [T + 17.8] [T_{max} - T_{min}]^{0.5}$	<p>N = número máximo de horas de sol en el mes [h d<sup>-1</sup>]</p> <p>I = índice de calor anual, definido como la suma de 12 valores de los índices de calor mensuales</p> <p><math>ET_{HS}</math> = evapotranspiración de referencia estimada [mm d<sup>-1</sup>]</p> <p>T, <math>T_{max}</math> y <math>T_{min}</math> representan el valor medio, máximo y mínimo de la temperatura del aire [°C], respectivamente.</p> <p><math>H_0</math> = Radiación solar extraterrestre, en mm/día [tabulada]</p> <p><math>Et_0</math> = representa la evapotranspiración potencial [mm d<sup>-1</sup>]</p>
Priestley-Taylor (30, 6.32%)	$ET_0 = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n + G}{\lambda}$	<p><math>\alpha</math> = parámetro ecuación de Priestley-Taylor</p> <p><math>\lambda</math> = Calor latente de vaporización a 20°C, 2.45MJ/kg</p> <p><math>\Delta</math> = pendiente de la curva de presión de vapor, [kPa °C<sup>-1</sup>]</p> <p><math>R_n</math> = radiación neta en la superficie del cultivo</p> <p>G = flujo del calor de suelo, MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup></p> <p><math>Et_0</math> = representa la evapotranspiración potencial [mm d<sup>-1</sup>]</p>
Blaney-Criddle (27, 5.68%)	$Et_0 = p [0.46T + 8.13]$	<p>T, es el promedio de temperatura diaria para el periodo definido [°C]</p> <p>p, representa el porcentaje de horas diarias de luz o insolación en la zona [%]</p>
Hargreaves (21, 4.42%)	$ET_0 = 0,0135 R_s(T_m + 17,8)$	<p><math>ET_0</math> = es la evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d<sup>-1</sup>]</p> <p><math>R_s</math> = radiación solar que llega a nivel del suelo; está tabulada en función de la latitud y del mes.</p> <p><math>T_m</math> = temperatura media diaria</p>
Shuttleworth-Wallace (18, 3.79%)	$ET_0 = T_r + E_g$	<p><math>T_r</math> = transpiración de la planta</p> <p><math>E_g</math> = evaporación del suelo</p>

Método	Fórmula	Variables
Turc (12, 2.53%)	$ETP = 0.013 (R_s + 50) \frac{T_m}{T_m + 15} \times 1 + \left( \frac{65 - HR}{120} \right)$	ETP= evapotranspiración de referencia, expresada en [mm d <sup>-1</sup> ] R <sub>s</sub> = radiación solar [cal cm <sup>2</sup> día] T <sub>m</sub> = temperatura media del aire, expresada en °C HR = humedad relativa media [%]
Otros (5, 1.05%)		
Total (475, 100%)		

### 1.4.3 Redes de autor y colaborados

La red de autores (Figura 5) estuvo compuesta de 1641 nodos (autores) y 1450 aristas (vínculos). Los vínculos en un análisis de redes de coautoría son importantes porque es a través de ellos que un autor puede alcanzar ciertas ideas, conocimiento e información que socialmente es distante para él (Granovetter, 1973). Los principales autores que desarrollaron investigación en el tópico sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, fueron: Irmak\_S (7 textos) de la Universidad de Nebraska en USA quien aplicó los modelos Hargreaves-Samani, y FAO-Penman-Monteith a cultivos como maíz y soya, además de aportaciones teóricas en meteorología; Sepaskhah\_AR (6 textos) de la Universidad de Shiraz en Irán, que aplicó el método de FAO-Penman-Monteith en cultivos como papa; Ahuja\_LR (5 textos) del Departamento de Agricultura de USA quien aplicó diferentes modelos en cultivos como maíz; Hoogenboom\_G (5 textos) de la Universidad de Georgia en USA, quien desarrollo modificaciones teóricas al modelo de FAO-Penman-Monteith; Howell\_TA (4 textos) del Departamento de Agricultura de USA quien contribuyo con modificaciones teóricas a los modelos Shuttleworth-Wallace y Penman-Monteith; y Hubbard\_KG (4 textos) de la Universidad de Nebraska en USA que aplico el modelo de Penman-Monteith a cultivos como el sorgo.



**Figura 5.** Red de autores a nivel mundial que han publicado artículos científicos sobre metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola. El tamaño del nodo corresponde con su productividad.

## **CAPÍTULO II. VARIOGRAMAS TEÓRICOS PARA KRIGING ORDINARIO EN LA VARIACIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE HUMEDAD EN CAMPECHE, MÉXICO (1975-2015)**

### **2.1 RESUMEN**

El objetivo de este estudio fue determinar el Modelo de Variograma Teórico (MVT) que mejor se ajuste al comportamiento espacial de la variable Índice de Humedad (IH) en Campeche, México, utilizando el método de interpolación de Kriging ordinario, en un área de 57, 924 km<sup>2</sup> (estado de Campeche) se analizaron datos de 27 estaciones climatológicas de un periodo de 1975 a 2015, se determinó la evapotranspiración potencial por el método de Penman–Monteith y el Índice de Humedad de acuerdo a lo propuesto por la FAO para cada estación. Para elaborar los variogramas, la interpolación y la validación cruzada se utilizó la herramienta Geostatistical Wizard del módulo de Geostatistical Analyst de ArcGIS, pues este permite probar diferentes modelos teóricos que describan el comportamiento de la variable en estudio mediante el desarrollo de un variograma experimental ajustado a un modelo teórico, esto permitió la utilización del método de interpolación kriging y se determinó que los modelos que mejor se ajustan a la distribución de los datos son el modelo estable y esférico al tener menor error cuadrático medio, por lo que se las consideran adecuados para la estimación de Índice de Humedad en el Estado de Campeche a partir del muestreo realizado.

**Palabras clave:** Interpolación, Kriging ordinario, Variograma.

### **2.2 INTRODUCCIÓN**

Los campos en los que se requiere conocer la distribución espacial del régimen hídrico son diversos, entre éstos se encuentran la hidrología, la agricultura y la climatología. Por ello, analizar y estudiar el cambio en el patrón espacial y temporal del régimen hídrico es importante para la toma de decisiones. Preocupa a los investigadores la búsqueda del o los modelos apropiados que describan el fenómeno en estudio y para ello contamos con la teoría clásica y los elementos básicos para el análisis geoestadístico de la información. La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos; sin embargo, la utilización de una buena cantidad de puntos del área en estudio limita su utilización (Johnston *et al.* 2001). Varios autores como Goovaerts (1999); Mirás-Avalos *et al.* (2007); Coulibaly y Becker (2007), han demostrado

que los métodos geoestadísticos proporcionan mejores estimaciones del régimen hídrico, en comparación con otras técnicas.

Hasta el día de hoy, todos los interpoladores geoestadísticos están en el grupo de los Kriging (con sus variantes), los cuales ofrecen no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuantiles (Johnston *et al.*, 2001). Otro aspecto a mencionar, es que la precisión en el mapa generado, a partir de las características de un suelo en particular, depende en gran medida de la estructura espacial de los datos, donde entre más fuerte la correlación espacial, mejor la calidad del mapeo (Kravchenko, 2003). Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés (Oliver y Webster, 2015).

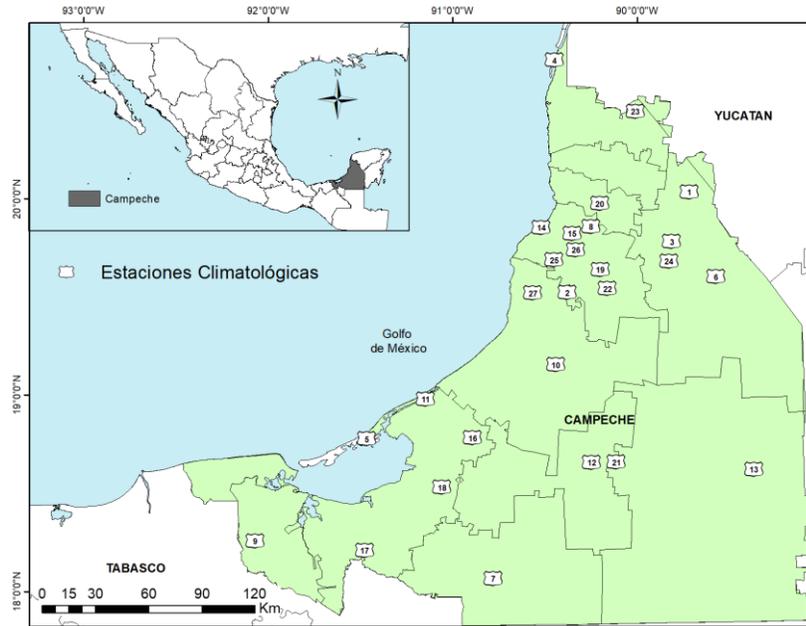
El método Kriging cuantifica la estructura espacial de los datos mediante el uso de variogramas, y los predice mediante la interpolación, usando estadística, consiste en obtener un estimador insesgado y de mínima varianza, lo que permite conocer no sólo el comportamiento de la variable bajo estudio, sino también el error de estimación de la misma (incertidumbre), lo cual es de gran ayuda en la interpretación de los resultados, así como en la determinación de zonas de alta varianza de estimación, en las que se requiere de un mayor número de muestras. (Lozano *et al.*, 2004). En el método de interpolación de Kriging se requiere un modelo continuo de variograma, en lugar de la nube de puntos que presenta el variograma experimental. Estos puntos pueden ajustarse a uno de varios Modelos de Variograma Teóricos (MVT) (Oliver & Webster, 2015); sin embargo, en el presente trabajo se utilizará el llamado “modelo esférico” que probablemente es el más utilizado, dado que sus tres parámetros corresponden a las propiedades deseables en un MVT, que son: meseta, rango y nugget, y el “modelo estabre” que es una combinación de los modelos exponencial y gaussiano.

Los datos utilizados para este estudio provienen de la base de datos Climatológica Nacional (CLICOM, 2020). En el estado de Campeche se encuentran distribuidas irregularmente, y en algunas de estas estaciones, la información disponible es insuficiente para caracterizar la alta variabilidad del Índice de Humedad (IH) y su distribución espacial. Por lo tanto, es necesario estimar la IH en áreas donde no se dispone de información, utilizando datos de las estaciones vecinas. El objetivo de este estudio fue determinar el MVT que mejor se ajuste al comportamiento espacial de la variable Índice de Humedad mensual en Campeche, México.

## 2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El estado de Campeche se encuentra dentro de la zona tropical, esto hace que presente un clima húmedo, con lluvias principalmente en verano que alcanzan valores de precipitación de 900 a 2000 mm de promedio anual. La temperatura más alta es mayor a 30°C y la mínima de 18°C. Predomina el clima cálido subhúmedo, que se presenta en el 92 % de su territorio, el 7.75 % presenta clima cálido húmedo localizado en la parte este del estado y en la parte norte, un pequeño porcentaje del 0.05 % con clima semiseco. Además, el área de estudio forma parte de la provincia: Península de Yucatán. Al oriente hay lomas, con elevaciones máximas de 340 metros sobre el nivel del mar (msnm), como el cerro Los Chinos, así como depresiones que localmente se denominan cenotes. En esta entidad se encuentra el cerro Champerico con 380 msnm, el cual representa la mayor altitud. (INEGI 2020).

De la base de datos Climatológica Nacional (CLICOM, 2020) se seleccionaron las estaciones climatológicas que existen en el estado de Campeche, específicamente aquellas que cuentan con un 80% de datos para el periodo 1975-2015 (Rodríguez-González et al., 2018), obteniendo como resultado 27 estaciones para este análisis (Figura 6). Las variables analizadas por mes en cada estación meteorológica fueron: Temperatura Mínima (°C), Máxima (°C), además de Precipitación (mm), cada una de estas variables fue analizada, con la herramienta climatol del programa Rstudio la cual permitió la homogeneización automática las series climatológicas, incluyendo el relleno de los datos faltantes y la detección y corrección de los valores atípicos (Pastor, 2004).



**Figura 6.** Ubicación del área de estudio y distribución de estaciones climatológicas utilizadas para la estimación del Índice de Humedad en el estado de Campeche, México.

Esta información sirvió de base para el cálculo de la evapotranspiración potencial por el método de Penman-Monteith. Y posteriormente se calculó el índice de humedad con la fórmula:

$$IH = \frac{P}{Et_0}$$

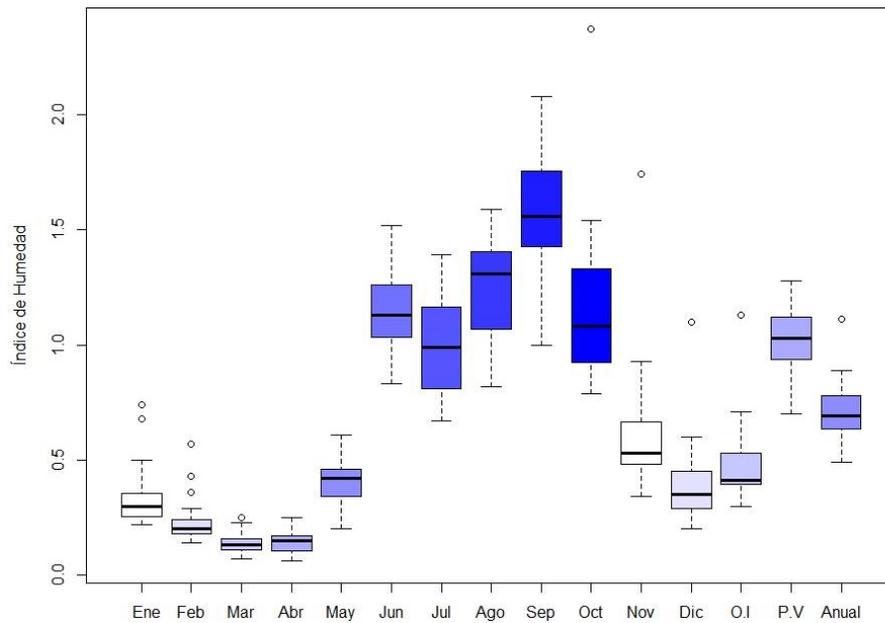
Dónde: IH = Índice de humedad, P = precipitación pluvial,  $Et_0$ : Evapotranspiración estimada con el método de FAO Penman-Monteith.

Con los datos de la variable Índice de humedad, utilizando la función EDA de la paquetería PASWR en Rstudio se hizo una exploración de los datos y se aplicó el test de Shapiro Wilks para comprobar la distribución normal de los datos, derivado de este procedimiento y tras los resultados que indicaron datos con distribución asimétrica, se utilizó la función TransformTukey del paquete rcompanion de R que elige la lambda que maximiza el estadístico W de Shapiro-Wilks. Para determinar los variogramas, la interpolación y la validación cruzada se utilizó la herramienta Geostatistical Wizard del módulo de Geostatistical Analyst de ArcGIS, este permitió probar diferentes MVT que describen el comportamiento de la variable en estudio mediante el desarrollo de un variograma experimental ajustado a un MVT, que permita la utilización del método de interpolación Kriging ordinario y se determinó el modelo que mejor se ajustó a la distribución de

los datos de cada mes. En el caso particular del interpolador, inicialmente se comparó el error cuadrático medio de cada MVT, con el fin de determinar cuál de ellos se ajustaba mejor a la generación del variograma experimental. Finalmente se utilizó el valor de validación cruzada, que remueve consecutivamente un valor de los datos y el valor ausente es interpolado con los datos remanentes para luego ser comparado con el dato removido u observado. Con los datos interpolados, se graficaron cada uno de los resultados de las interpolaciones y se realizó también una comparación visual entre los MVT.

## 2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras el análisis exploratorio, se realizó una transformación boxcox:  $((x^\lambda - 1) / \lambda)$  de los datos, de enero, febrero, marzo, agosto, octubre, noviembre, diciembre y otoño-invierno ya que presentaban una distribución asimétrica (Figura 7 y Cuadro 3), además con la herramienta Geostatistical Wizard del módulo de Geostatistical Analyst de ArcGIS se detectó y removió la tendencia de segundo orden que presentaron los datos.



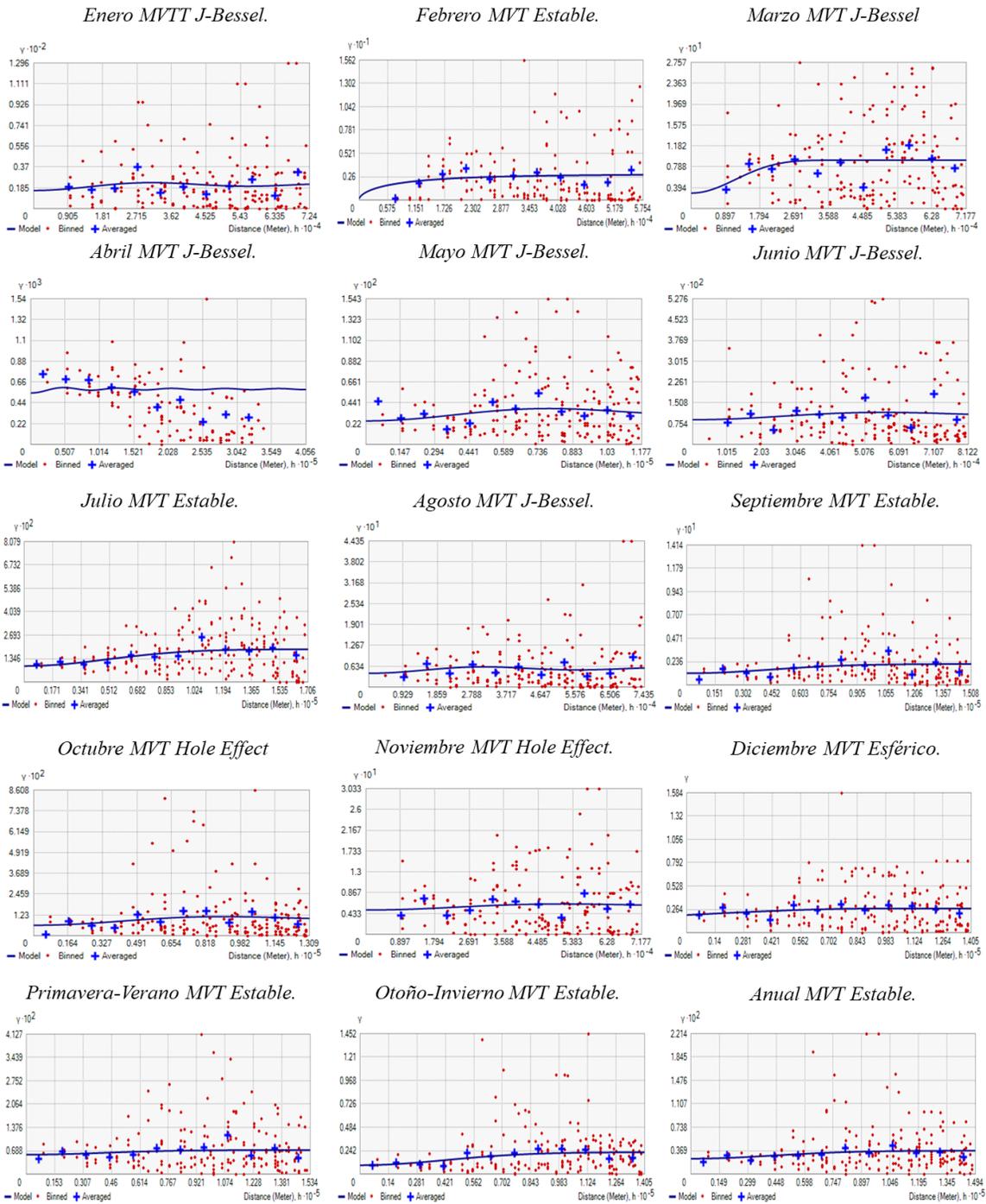
**Figura 7.** Distribución de los datos de Índice de Humedad (IH) en cada periodo evaluado para el Estado de Campeche.

**Cuadro 3.** Estadísticas descriptivas de los datos de Índice de Humedad (IH) en cada periodo evaluado para el Estado de Campeche.

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>O-I</i>	<i>P-V</i>	<i>Anual</i>
Media	0.347	0.236	0.143	0.149	0.414	1.125	0.997	1.251	1.569	1.149	0.621	0.399	0.483	1.011	0.711
Error típico	0.028	0.019	0.009	0.010	0.017	0.034	0.041	0.042	0.045	0.063	0.054	0.034	0.033	0.028	0.025
Mediana	0.3	0.2	0.13	0.15	0.42	1.13	0.99	1.31	1.56	1.08	0.53	0.35	0.41	1.03	0.69
Moda	0.26	0.2	0.13	0.16	0.42	1.26	0.92	1.48	1.66	0.85	0.53	0.26	0.4	1.03	0.65
Desviación estándar	0.147	0.101	0.046	0.052	0.088	0.177	0.214	0.218	0.232	0.329	0.280	0.176	0.170	0.145	0.131
Varianza de la muestra	0.022	0.010	0.002	0.003	0.008	0.031	0.046	0.048	0.054	0.108	0.078	0.031	0.029	0.021	0.017
Curtosis	1.857	4.024	0.283	-0.457	0.464	-0.091	-0.942	-0.661	0.418	6.319	9.404	9.162	7.422	-0.504	1.868
Coefficiente de asimetría	1.680	2.014	0.878	0.464	0.005	0.319	0.279	-0.672	-0.218	2.071	2.731	2.603	2.432	-0.327	0.987
Rango	0.520	0.430	0.180	0.190	0.410	0.690	0.720	0.770	1.080	1.580	1.400	0.900	0.830	0.580	0.620
Mínimo	0.220	0.140	0.070	0.060	0.200	0.830	0.670	0.820	1.000	0.790	0.340	0.200	0.300	0.700	0.490
Máximo	0.740	0.570	0.250	0.250	0.610	1.520	1.390	1.590	2.080	2.370	1.740	1.100	1.130	1.280	1.110
SW p-val	1.66E-05	2.40E-05	0.037	0.184	0.521	0.522	0.282	0.025	0.949	2.52E-04	3.22E-06	1.98E-05	1.09E-05	0.76	0.153

En la fase del análisis estructural de los datos se obtuvieron los variogramas omnidireccionales para cada mes, temporada (primavera-verano y otoño-invierno) y de manera anual, con posterioridad, se ajustaron los MVT.

Los MVT que se consideraron para las interpolaciones fueron J-Bessel (enero, marzo, abril, mayo, junio, agosto), Estable (febrero, julio, septiembre, Primavera-Verano, Otoño-Invierno, anual) Hole Effect (octubre, noviembre) y Esférico (diciembre) ya que tuvieron menor error cuadrático medio (Cuadro 4). Como resultados de los MVT, se puede observar un punto en color rojo que indica el valor de las semivarianzas empíricas en cada semivariograma (la diferencia al cuadrado entre los valores de dos puntos de datos que forman un par). La autocorrelación espacial cuantifica un principio básico de la geografía: las cosas más cercanas son más parecidas que las cosas más separadas entre sí. Entonces, los pares de ubicaciones que están más cerca (extremo izquierdo del eje X de la nube de semivariograma) deberían tener valores más similares (parte inferior en el eje Y de la nube de semivariograma). A medida que los pares de ubicaciones estén más separados entre sí (hacia la derecha en el eje X de la nube de semivariograma), deberían ser más distintos y tener una diferencia cuadrada más grande (hacia arriba en el eje Y de la nube de semivariograma) (Figura 8).



**Figura 8.** Gráficos de Modelos de Variograma Teórico (MVT) mejor ajustados al índice de Humedad (IH) en el estado de Campeche.

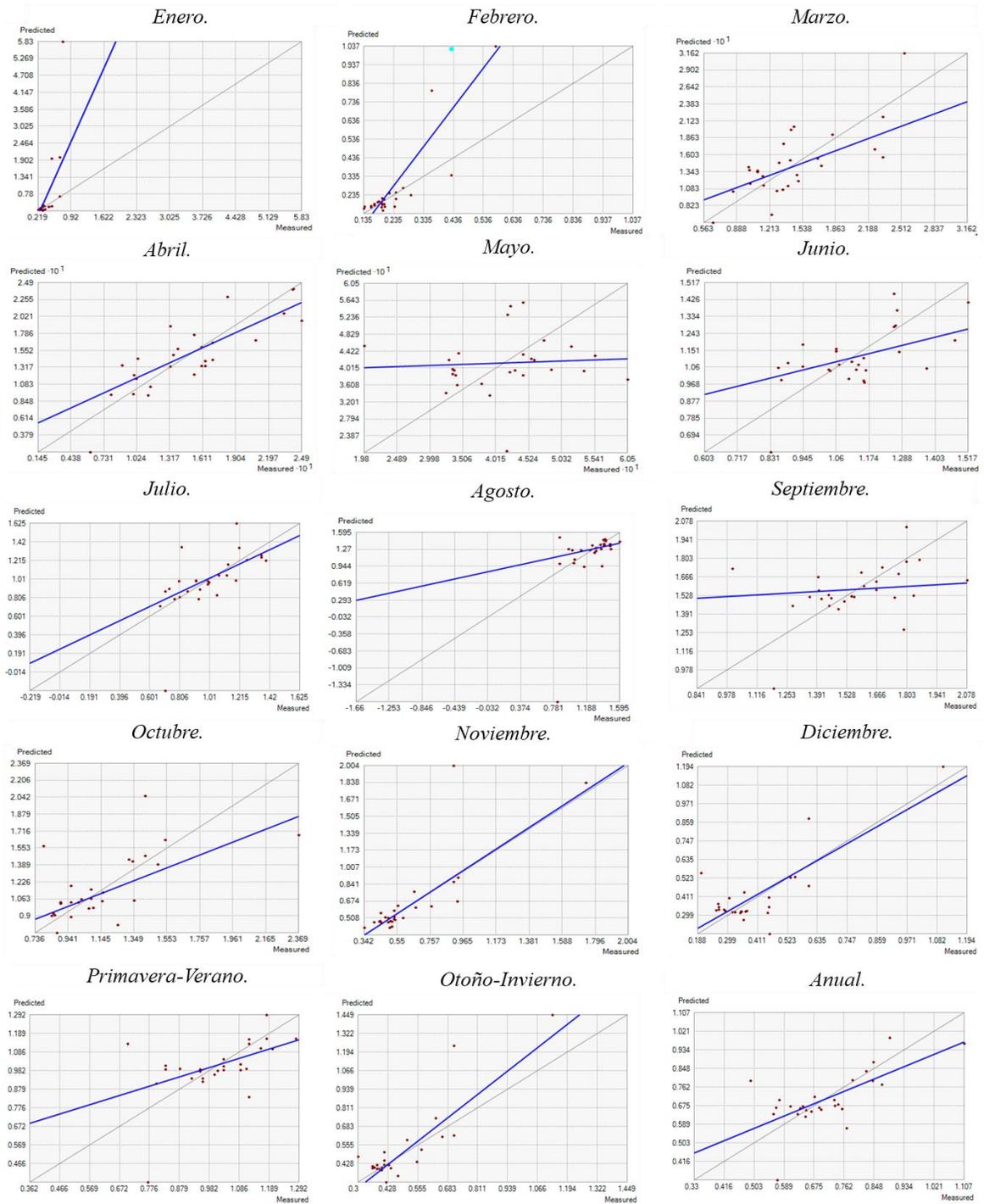
**Cuadro 4.** Datos de los Modelos de Variogramas Teóricos (MVT) de índice de Humedad (IH) para la interpolación mensual, por temporada y anual.

Periodo evaluado	Distribución de datos	Transformación	Tendencia	Anisotropía	Modelos Variográficos Teóricos	Nugget	Rango	Partial sill	Error Cuadrático medio
<b>Ene</b>	AP	Box-cox	P2	No	J- Bessel	5.12448	44,387.63	5.12448	1.051
<b>Feb</b>	AP	Box-cox	P2	No	Estable	0.16070	42,321.94	2.72506	0.170
<b>Mar</b>	AP	Box-cox	P2	No	J- Bessel	0.02918	44,387.63	0.06210	0.036
<b>Abr</b>	Normal	---	P2	No	J- Bessel	0.00054	69,570.79	0.00004	0.029
<b>May</b>	Normal	---	P2	No	J- Bessel	0.00249	112,452.81	0.00094	0.105
<b>Jun</b>	Normal	---	P2	No	J- Bessel	0.00895	79,698.54	0.00204	0.147
<b>Jul</b>	Normal	---	P2	No	Estable	0.00920	121,207.90	0.00970	0.247
<b>Ago</b>	AN	Box-cox	P2	No	J- Bessel	0.04213	44,387.63	0.01414	0.514
<b>Sep</b>	Normal	---	P2	No	Estable	0.01180	107,578.80	0.00940	0.237
<b>Oct</b>	AP	Box-cox	P2	No	Hole Effect	0.00616	125,467.29	0.00421	0.272
<b>Nov</b>	AP	Box-cox	P2	No	Hole Effect	0.05058	71,767.04	0.01037	0.226
<b>Dic</b>	AP	Box-cox	P2	No	Esférico	0.20080	98,000.20	0.07470	0.121
<b>P-V</b>	Normal	---	P2	No	Estable	0.00570	103,133.80	0.00140	0.149
<b>O-I</b>	AP	Box-cox	P2	No	Estable	0.09120	102,510.90	0.13350	0.137
<b>Anual</b>	Normal	---	P2	No	Estable	0.00240	105,834.50	0.00120	0.104

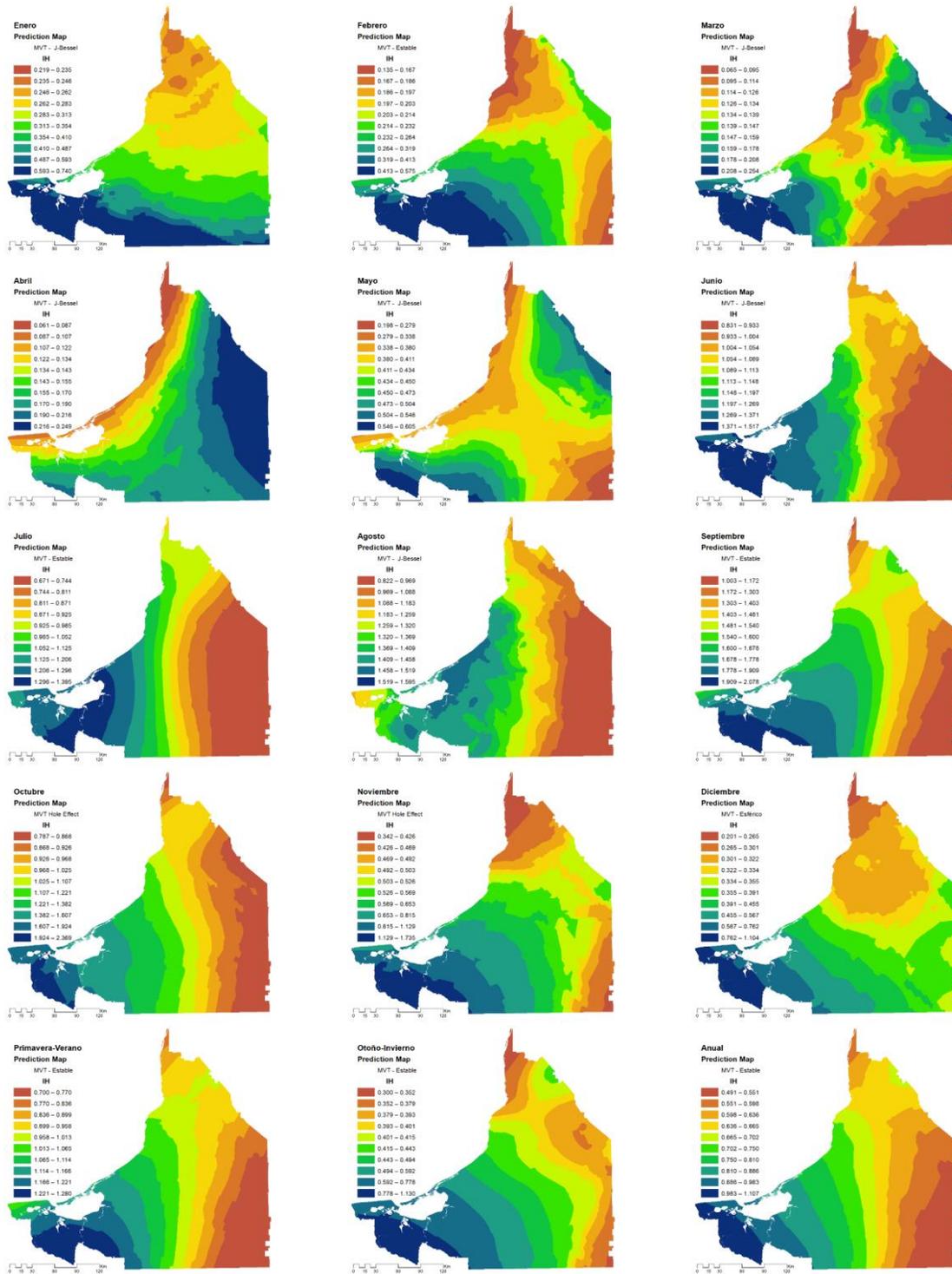
*P2: Polinómica de segundo grado, AP: Asimetría Positiva, AN: Asimetría Negativa.*

La validación cruzada permitió eliminar una ubicación de datos y predijo los datos asociados utilizando los datos del resto de las ubicaciones. El uso principal de esta herramienta fue comparar el valor predicho con el valor observado a fin de obtener información útil sobre algunos de los parámetros del modelo como fue el error cuadrático medio (Figura 9).

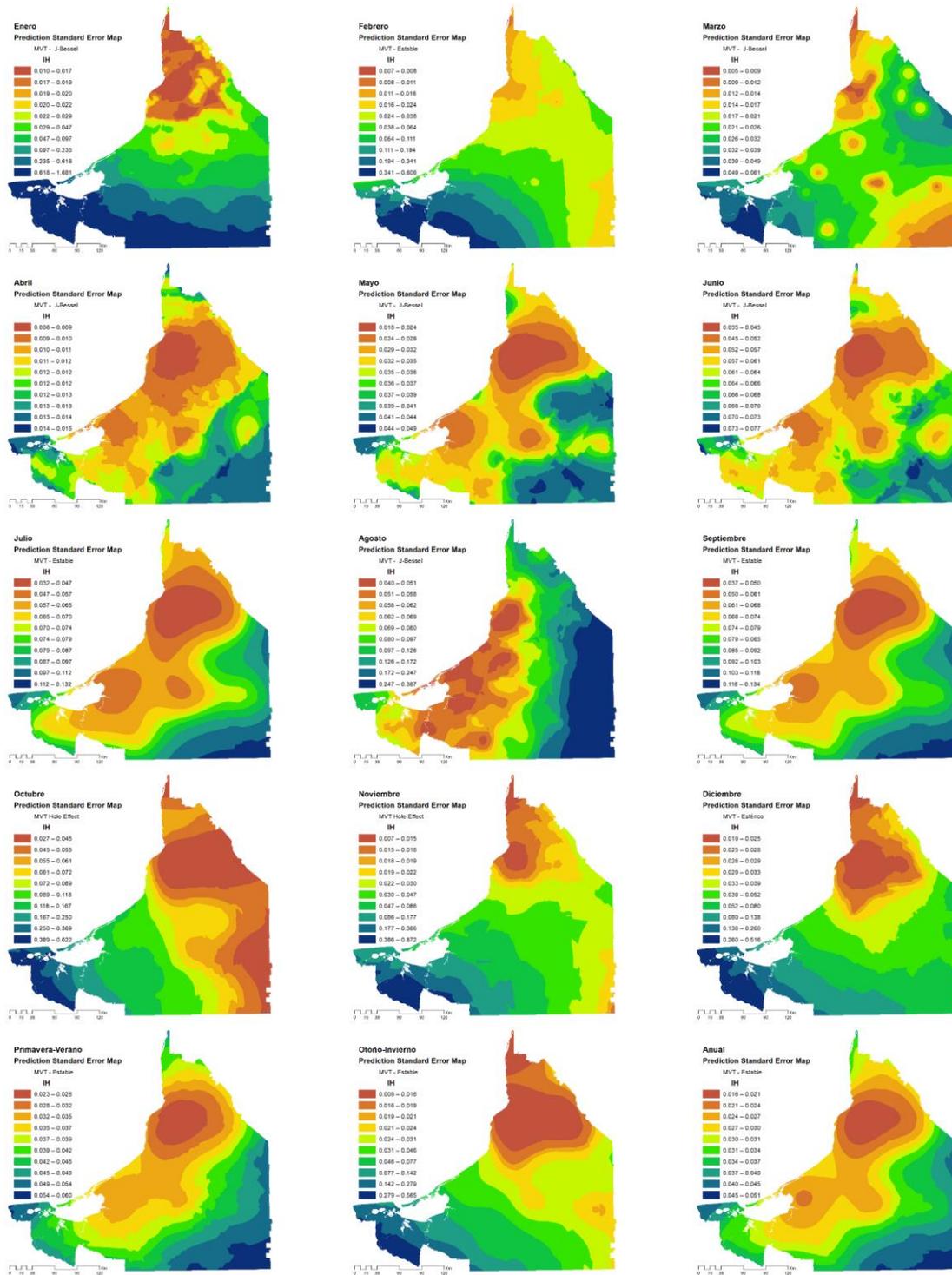
Los MVT presentados en el presente estudio, fueron comparados con otros modelos que ofrece la herramienta Geostatistical Wizard del módulo de Geostatistical Analyst de ArcGIS, una vez realizada la interpolación se determinó el mejor modelo de acuerdo al error cuadrático medio y el grado de coherencia con el área de estudio, los gráficos presentados se muestran en un la escala original tras aplicar una transformación inversa de los datos (Figura 10), en las áreas con tonalidades color azul se presenta un IH mayor, en comparación con las áreas en color naranja donde se asume un área con menor IH. de la misma manera, se presenta el error estándar de la predicción en las interpolaciones para cada uno de los periodos evaluados (Figura 11), las áreas en verde y azul muestran mayor grado de error, esto puede explicarse por la baja información empírica contenida para esas zonas.



**Figura 9.** Validación cruzada los Modelos de Variograma Teórico (MVT) mejor ajustados al índice de Humedad (IH) en el estado de Campeche.



**Figura 10.** Mapas de Predicción Mensual de los mejores Modelos de Variograma Teórico (MVT) para el Índice de Humedad (IH) en Campeche.



**Figura 11.** Mapa de Error estándar de predicción Mensual de los mejores Modelos de Variograma Teórico (MVT) para el Índice de Humedad (IH) en Campeche.

## **CAPÍTULO 3. EFECTO DEL PERIODO DE LLUVIAS EN LA APTITUD DE TIERRAS PARA AGRICULTURA DE SECANO EN CAMPECHE**

### **3.1 RESUMEN**

La agricultura de secano se practica en el 83 % de las tierras cultivadas y produce más del 60 % de los alimentos a nivel mundial. Conocer la distribución espacial del régimen hídrico y asociarlo con la capacidad del suelo es importante para hacer uso eficiente de los recursos hídricos, en especial en la agricultura de secano. Por ello, analizar y estudiar el cambio en el patrón espacial y temporal del régimen hídrico es importante para la toma de decisiones. En virtud de ello el objetivo del presente estudio fue identificar y delimitar zonas idóneas para el establecimiento de agricultura de temporal en los diferentes periodos de producción: Anual, Primavera-Verano (P-V) y Otoño-Invierno (O-I), en el estado de Campeche, mediante la modelación geoespacial de variables agroecológicas del territorio. Para ello se utilizó cartografía del Índice de Humedad (IH) y de la Capacidad de Uso de Suelo (CUS) para el estado de Campeche. La superposición ponderada de la variable interpolada de Índice de Humedad (IH) y la variable Capacidad de Uso de Suelo (CUS) se efectuó en un Sistema de Información Geográfica. Utilizando el escenario de Índice de Humedad (IH) clasificado de acuerdo al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) dio como resultado áreas con la clasificación de; Optimo, Muy adecuado, Adecuado, Aceptable y No Apto, siendo este el más adecuado de acuerdo a las actividades agrícolas registradas en el Estado de Campeche.

### **3.2 INTRODUCCIÓN**

Los campos en los que se requiere conocer la distribución espacial de la precipitación son diversos, entre éstos se encuentran la agricultura. El uso del agua para fines agrícolas es un tema central en cualquier debate sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria (Riquelme *et al.*, 2005). El cambio climático ha tenido impactos directos sobre la precipitación, lo cual afecta en la adecuada gestión de los recursos hídricos. La agricultura, sobre todo la de régimen hídrico de secano, es uno de los sectores más vulnerables a las variaciones de las precipitaciones (Ezra *et al.*, 2020).

La presencia de lluvia durante el año es importante, debido a que influye en la productividad del sector agrícola, en especial, en la agricultura de secano, que depende directamente de las precipitaciones, lo que la hace vulnerable a la variabilidad interanual e interestacional de la

precipitación (Ngoma *et al.*, 2021), afectando directamente la productividad agrícola de una región (Englehart y Douglas, 2000). Los cultivos para poder crecer y desarrollarse necesitan absorber agua del suelo; cuando el contenido de humedad es bajo, se dificulta la absorción. De acuerdo con van Ittersum y Rabbinge (1997) y Van Ittersum *et al.* (2003) los factores limitantes o incrementadores del crecimiento y rendimiento de un cultivo son: agua y nutrientes. Si la oferta de ellos es limitada, la tasa de crecimiento, y el rendimiento, son menores a los potenciales.

El período de lluvias, es el principal motor de desarrollo para todas aquellas actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos hídricos; por ello es de vital importancia analizar y estudiar el cambio en el patrón espacial y temporal de la precipitación (Oliveira *et al.*, 2022). La precipitación como tal, es una variable hidrológica que se puede caracterizar a través de su intensidad, su distribución espacio-temporal y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia (González *et al.*, 2013). De acuerdo con la FAO (1996) la duración del período de lluvias se determina por el índice de Humedad (IH) que es el cociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite, 1948, Bautista *et al.*, 2016). Su caracterización depende de las mediciones realizadas en pluviógrafos o estaciones climáticas superficiales para deducir su patrón de comportamiento en una zona determinada y llevar a cabo un análisis.

Existen diferentes métodos para estimar el potencial productivo agrícola de una región en función de la humedad disponible en el suelo; estos métodos tienen como fin definir el uso más adecuado e intensivo del suelo al mismo tiempo que garantizan la sostenibilidad de los bienes y servicios ambientales como lo son los recursos hídricos, no obstante, su análisis y desarrollo en México aún es limitado e incluso excluido de los programas nacionales de desarrollo (CONANP, 2020).

Con el fin de determinar la aptitud del suelo para dar soporte a un uso adecuado, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019) desarrolló un método holístico para determinar el uso potencial del suelo. Este método a diferencia del método de clasificación de tierras según su capacidad de uso, incorpora un número mayor de factores en formato digital, entre los cuales se sugiere la información de clima, edafología, usos del suelo y vegetación, modelos digitales de elevación, áreas naturales protegidas e imágenes de satélite (Villegas, 2021).

El estado de Campeche se erige como un terreno favorable para las actividades agrícolas, (SIAP, 2020). Sin embargo, la productividad agrícola en el estado de Campeche es baja en comparación

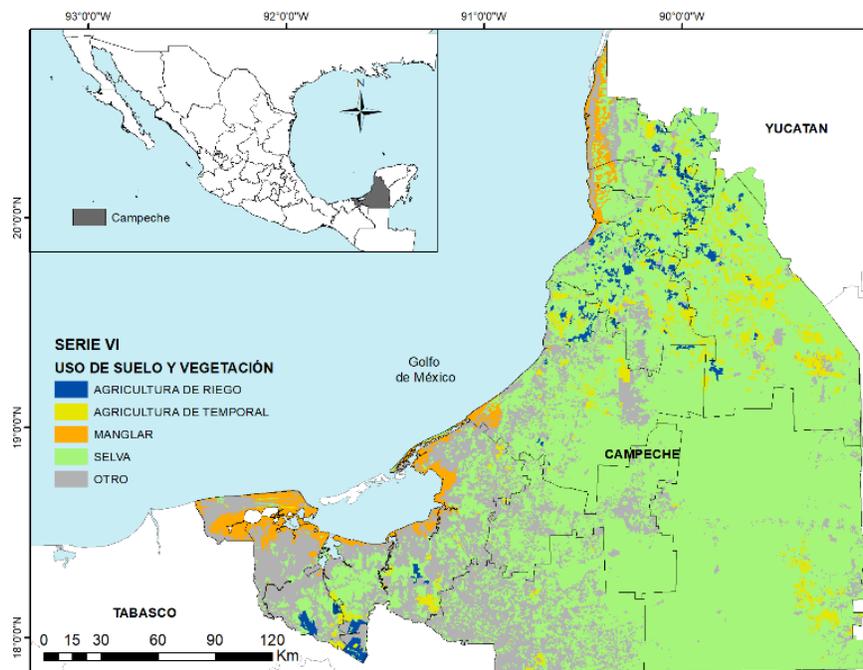
con otros estados como Sonora, Sinaloa, Chihuahua Jalisco, Michoacán y Veracruz (SIAP, 2020). Aunque la productividad agrícola es el resultado de múltiples factores, de acuerdo con Medina-Méndez *et al.* (2018) la baja productividad de Campeche se explica por la proporción de 1 ha de riego por 2.54 ha de secano, lo que hace que el estado dependa en su mayoría de la estacionalidad de las lluvias.

En virtud de ello se hace necesario conocer el potencial productivo de las tierras agrícolas asociado a su régimen hídrico (Murray-Tortarolo *et al.*, 2018), de manera que se permita lograr una agricultura sostenible, misma que Collazos *et al.* (2021) señalan como aquella que es capaz de producir utilizando los mínimos *inputs* foráneos, pero que a la vez puede mantenerse ya que sus resultados económicos son positivos, teniendo una doble visión del concepto agricultura sostenible: una medioambiental y otra económica. El objetivo de este trabajo fue desarrollar cartografía de aptitud para la agricultura de secano en el estado de Campeche, mediante análisis espacial que relacione la estacionalidad de las lluvias con el índice de humedad, para determinar el potencial productivo agrícola en el estado

### **3.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.3.1 Área de estudio.**

Por su medio físico que va desde selva tropical a selva baja, amplios recursos hídricos y un litoral de 500 km, Campeche se erige como un terreno favorable para las actividades agrícolas (SIAP, 2020). Con una superficie de 234 mil ha que representan el 1.1% de la superficie nacional, el 80% se destina a cereales y forrajes, frutas y hortalizas (7%), cultivos industriales (5%), leguminosas (1%) y otros (7%) (SIAP, 2020).



**Figura 12.** Uso de suelo del estado de Campeche. Fuente: Elaboración propia con datos de la serie VI. Uso de Suelo y Vegetación INEGI (2021).

### 3.3.2 Insumos geospaciales.

Se utilizó cartografía de la clasificación de CUS del área de estudio elaborado por Palma-López *et al.* (2012), de acuerdo al manual de clasificación, cartografía e interpretación de suelos del IMTA (1989) y el manual de conservación del suelo y del agua generado por el Colegio de Postgraduados del año 1991, la cual está compuesto por ocho clases (Cuadro 5). Para ello, se utilizó la clasificación de 112 perfiles de suelos, por su capacidad de uso agropecuario y forestal con base en análisis físicos y químicos y datos de campo, dentro del material cartográfico se utilizó el mapa de pendientes obtenidas del modelo digital de elevación, los valores para las pendientes se tomaron del manual del Colegio de Postgraduados (1991).

**Cuadro 5.** Unidades de Capacidad de Uso del Suelo

Incremento de las limitaciones del uso del suelo	Capacidad de uso del suelo	Incremento de la intensidad del uso del suelo							
		Vida silvestre	Forestal	Practicultura			Agricultura		
				Limitada	Moderada	Intensa	Limitada	Moderada	Intensa
I									
II									
III									
IV									
V									
VI									
VII									
VIII									

Fuente: Adaptado de IMTA (1989)

Para la determinación de aptitud de acuerdo a la duración de lluvias se utilizó la cartografía del IH Anual, Primavera-Verano (abril-septiembre) y Otoño-Invierno (octubre-marzo) mismas que fueron generadas en el capítulo dos de esta investigación, a este insumo se le hicieron dos clasificaciones: (1) según la clasificación de tierras del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la zona investigada se dividió en cuatro clases:  $IH < 0.50$ : zonas secas,  $0.50 < IH < 0.65$ : zonas secas subhúmedas,  $0.65 < IH < 0.80$ : zonas subhúmedas,  $IH > 0.80$ : zonas húmedas (Colantoni *et al.*, 2015); (2) Rupturas naturales (RN): Las rupturas de clase se crean de manera que los valores similares se agrupan mejor y se maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividieron en cuatro clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos (Jenks, 1967; De Smith *et al.*, 2007).

Para este estudio, solo se consideraron las áreas que calificaron en una capacidad de I a IV de acuerdo al IMTA (1989), ya que son considerados aptos para agricultura (Figura 13), descartando de la zonificación áreas naturales protegidas y zonas de manglar.

Para realizar el análisis multicriterio utilizando la superposición ponderada, los valores de celda se multiplican por su influencia de porcentaje y los resultados se suman para crear el ráster de salida. Se aplicó la siguiente formula:  $w1 * ci1 + w2 * cj2 = r11$

Donde  $w1$ : es la influencia de CUS (0.35),  $w2$  es la influencia de IH (0.65),  $ci1$  es la reclasificación de CUS (1, 2, 3, 4), y  $cj2$  es la reclasificación de del IH (1, 2, 3, 4). La clasificación resultante tiene

valores de uno a cuatro donde uno significa aceptable, adecuado, muy adecuado y optimo, respectivamente.

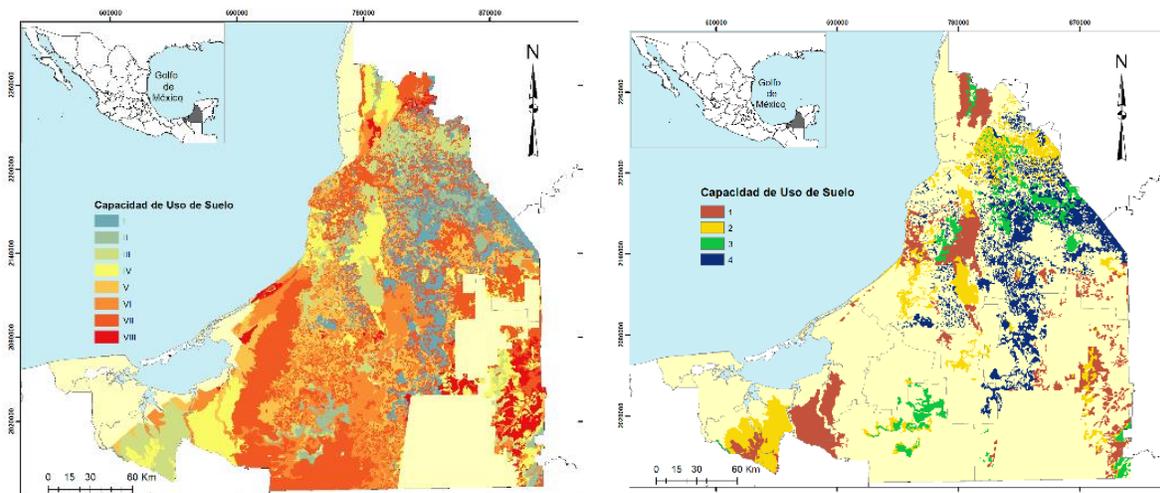
### 3.4 RESULTADOS

En ambos insumos geospaciales (IH y CUS) se realizó un reclasificado de valores a una escala de medición común de 1 a 4, siendo 4 el más favorable (Cuadro 6, Figura 13 y 14). Así también a cada ráster se le asignó un porcentaje de influencia donde el IH influye un 65% y la CUS un 35%, para posteriormente realizar la superposición ponderada de CUS con IH PNUMA y CUS con IH RN, planeando tres escenarios para cada uno de los periodos: (1) IH PNUMA; (2) IH PNUMA Restringido; (3) IH RN Restringido. En estos últimos dos escenarios se restringen las zonas que presenten una ponderación con valor 4 en IH.

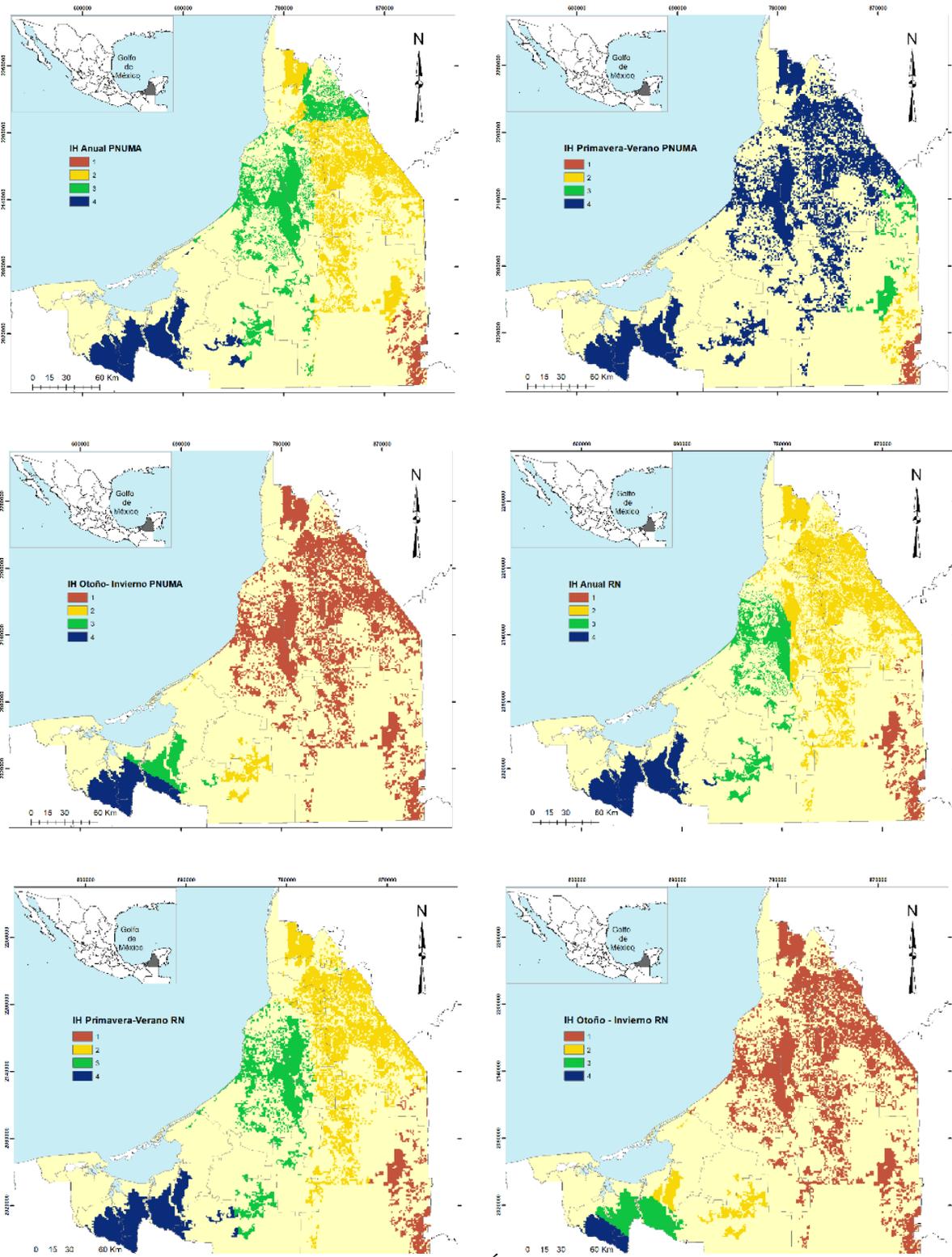
**Cuadro 6.** Variables y su Reclasificación

CUS		IH PNUMA*		IH RN (Anual)		IH RN (P-V)		IH RN (O-I)	
Clasificación	Ponderación								
I	4	IH>0.8	4	IH>0.85	4	IH>1.11	4	IH>1.27	4
II	3	0.65<IH<0.8	3	0.68<IH<0.85	3	0.88<IH<1.11	3	0.92<IH<1.27	3
III	2	0.5<IH<0.65	2	0.55<IH<0.68	2	0.65<IH<0.88	2	0.58<IH<0.92	2
IV	1	IH<0.5	1	IH<0.55	1	IH<0.65	1	IH<0.58	1

*\*Esta reclasificación de IH aplica para los tres periodos evaluados.*



**Figura 13.** Cartografía de Capacidad de Uso de Suelo y la reclasificación de las áreas que calificaron en una capacidad de I a IV en el estado de Campeche.

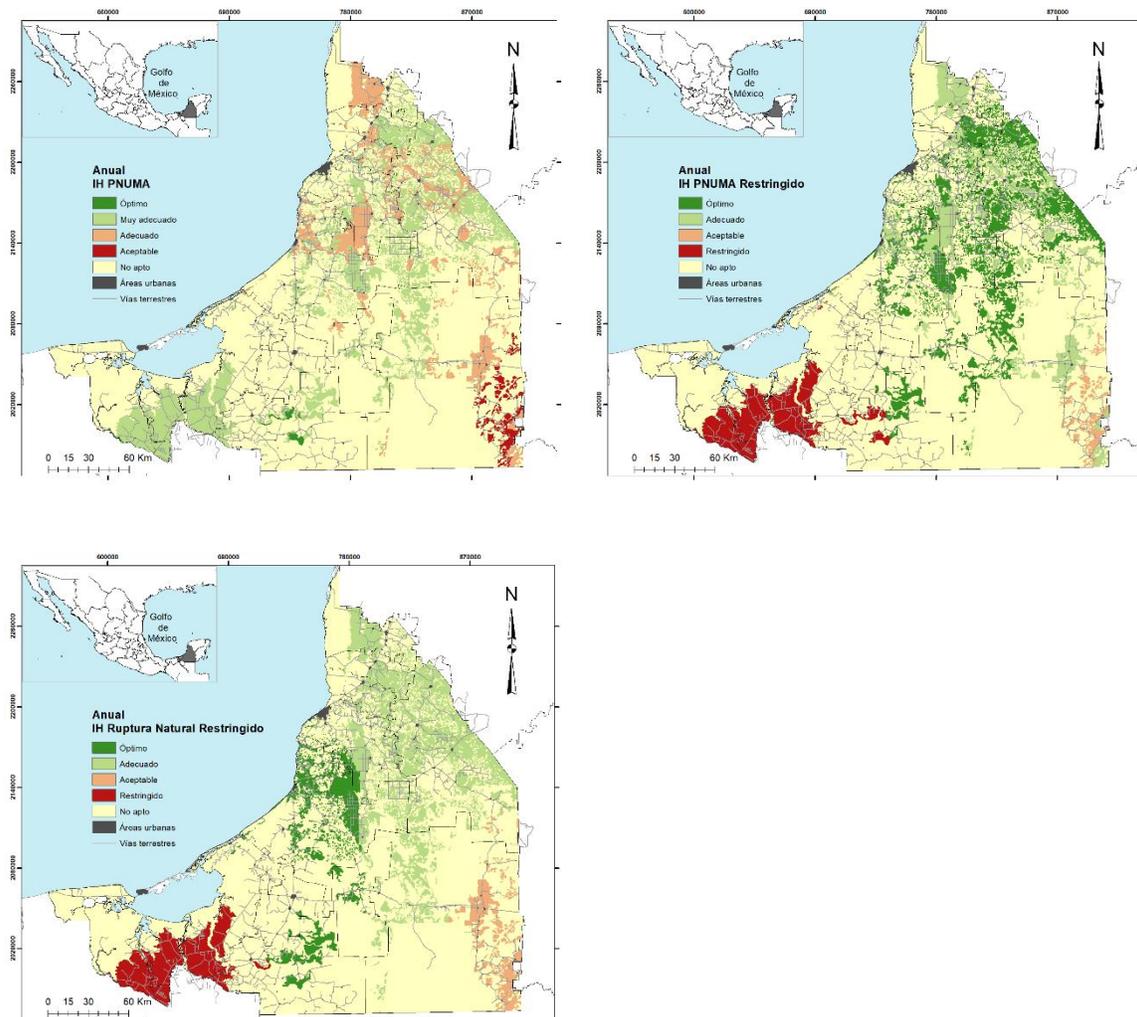


**Figura 14.** Representación cartográfica de la variable Índice de Humedad (IH) reclasificada en el estado de Campeche.

Derivado de la modelación geoespacial sobre las variables IH y CUS seleccionadas, se obtuvieron las Figuras 15, 16 y 17, las cuales representan el uso potencial del suelo para agricultura de temporal, en cada uno de los periodos evaluados. En los escenarios en los que se restringe el IH por encima de 0.8, se puede observar que para el periodo P-V es inadecuado dejar fuera esta región ya que es una zona donde al tener un índice de humedad mayor su aptitud para la agricultura de temporal sería muy adecuado, sobre todo en las zonas que coinciden con suelos de buen drenaje. Por lo tanto, el escenario, IH PNUMA con la clasificación de; Optimo, Muy adecuado, Adecuado, Aceptable y No Apto, parece el más adecuado.

### **3.4.1 Anual IH PNUMA**

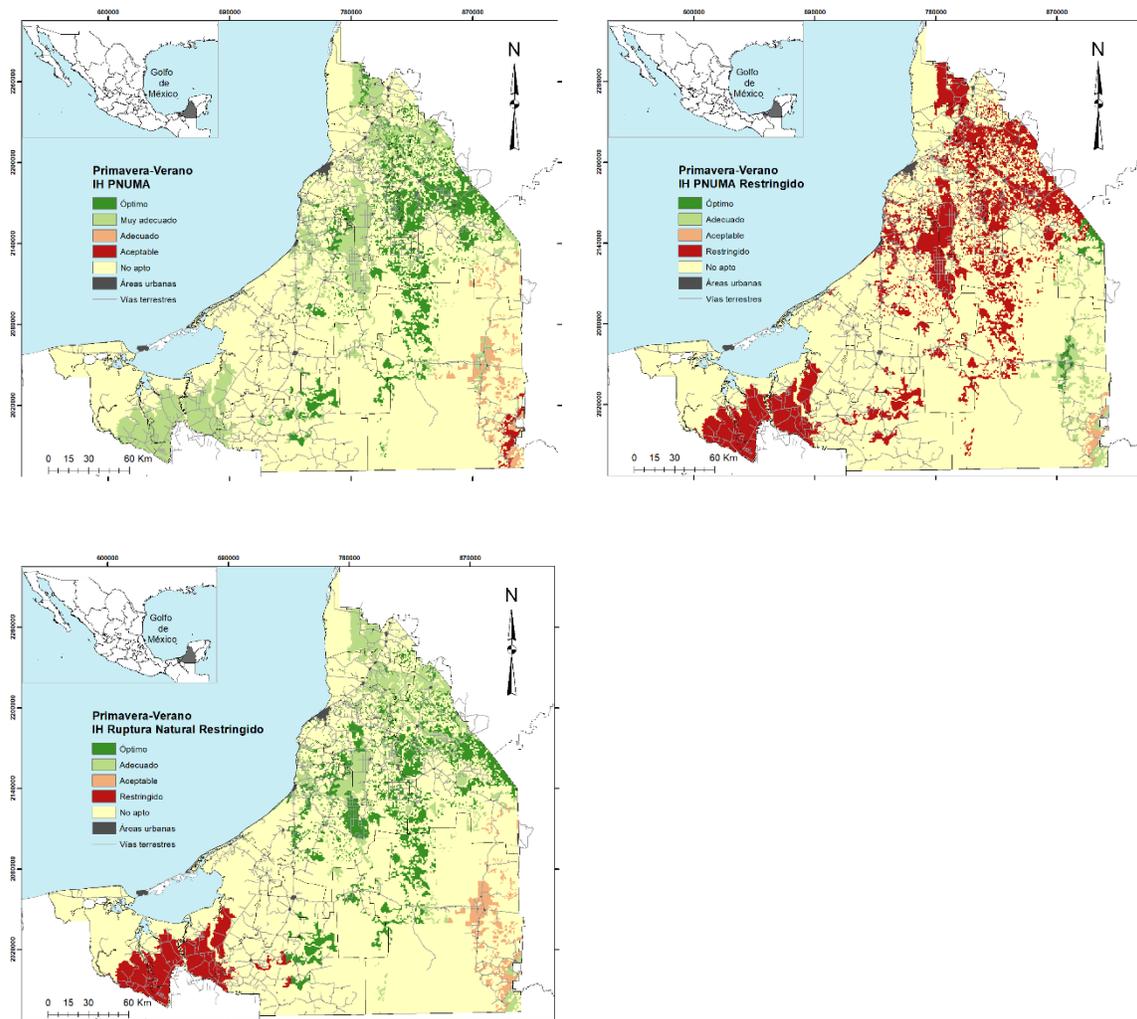
En esta clasificación se observó una mayor concentración de áreas “muy adecuado” en la región sur, centro y noreste del estado que incluye los municipios de Carmen, Palizada, Champotón, Campeche, Hecelchakán, Tenabo y Hopelchén, respectivamente. Específicamente en la región noreste la cual coincide con las mayores superficies de tierras cultivadas en la modalidad secano (maíz, sorgo y soya) y en la región sur con las mayores superficies de pastizales para la ganadería. Asimismo, se observan áreas “adecuadas” en los municipios de Calkiní, Hopelchén, Campeche y en una región limitada en Calakmul (Xpujil, Zoh-Laguna y la Lucha). Por otra parte, se observó un área “Aceptable” donde el índice de humedad se encuentra por debajo de 0.5 (semiárido) en la región sureste del municipio de Calakmul, donde la agricultura de secano es mínima, cultivando principalmente chile jalapeño y calabaza chihua y la agricultura de regadío es nula debido a factores como mantos freáticos muy profundos y con altas concentraciones de carbonatos de calcio.



**Figura 15.** Uso potencial del suelo para agricultura de temporal en el periodo anual en Campeche.

### 3.4.2 Primavera – Verano IH PNUMA

En esta clasificación se encontró que en los meses con mayor precipitación pluvial (Julio-septiembre) existe una amplia región en noreste y centro del estado de Campeche con una clasificación “optimo” y “muy adecuado” para el centro, norte, noreste y sur del estado de Campeche, regiones que coinciden con la agricultura de secano, cuya producción es principalmente maíz, sorgo, soja y calabaza chihua. En Calakmul se presentan áreas cercanas a la cabecera municipal las cuales son “adecuadas” para la agricultura de secano en el ciclo P-V y algunas zonas con clasificación aceptable en un área ubicada en el sureste de Calakmul.

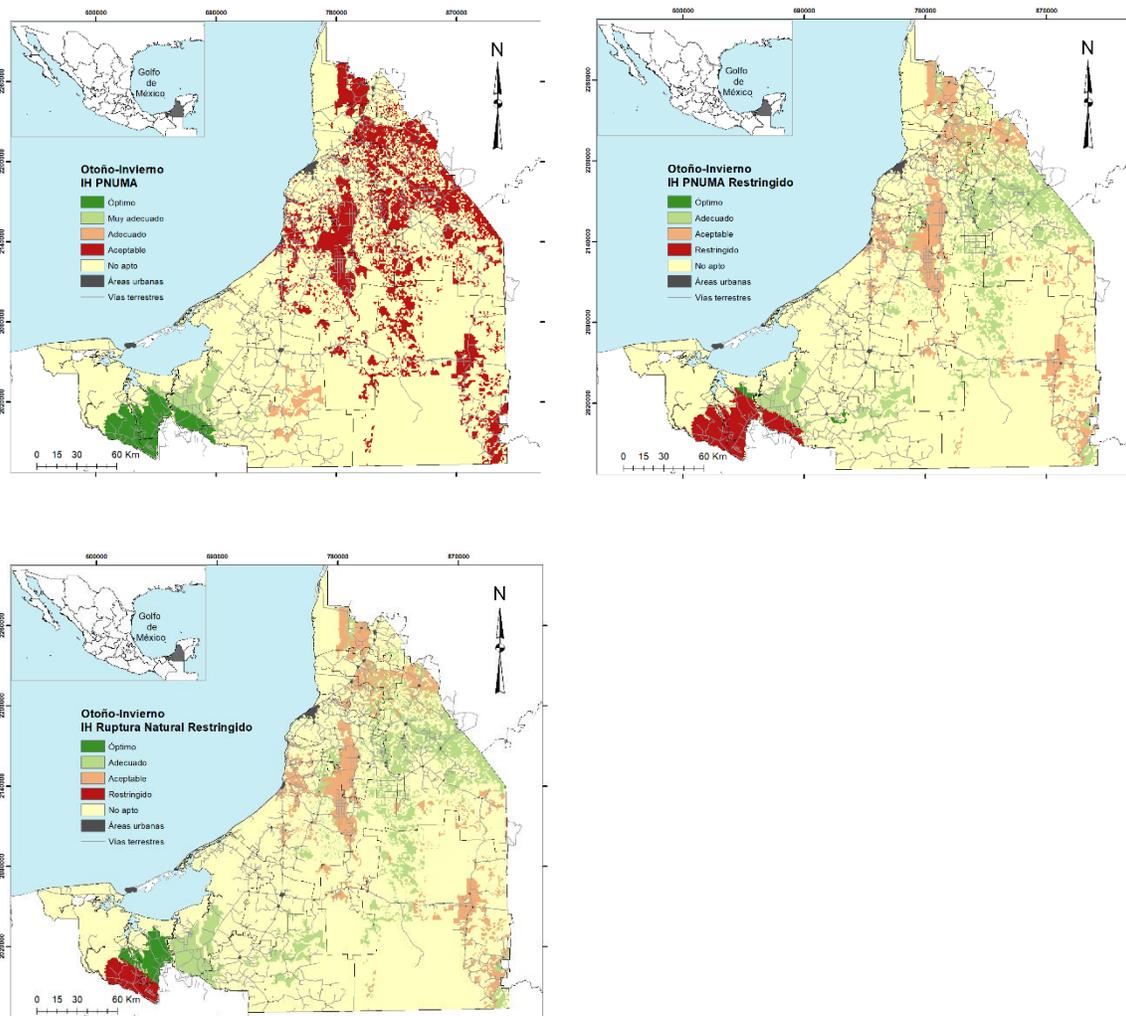


**Figura 16.** Uso potencial del suelo para agricultura de temporal en el periodo Primavera-Verano en Campeche.

### 3.4.3 Otoño – Invierno IH PNUMA

En esta clasificación que incluye los meses de menos lluvia como son diciembre-marzo, con precipitaciones en octubre y noviembre, las cuales permiten mantener humedad residual en suelos de textura media y fina en los meses de diciembre a febrero. Se observó que la clasificación “optima y muy adecuado” se encuentra en áreas colindantes con el estado de Tabasco donde la media de precipitación pluvial anual es de alrededor de 1400-1500 mm anuales y donde la mayoría de estas zonas son pastizales para la ganadería.

Asimismo, la mayor parte del estado se encuentra en clasificación como aceptable, ya que algunos cultivos podrían sembrarse en el mes de octubre y/o noviembre y aprovechar la humedad residual en el suelo.



**Figura 17.** Uso potencial del suelo para agricultura de temporal en el periodo Otoño-Invierno en Campeche.

### 3.5 DISCUSIÓN

De acuerdo con Villegas y Gómez (2020) y Santiago (2005), el uso de sistemas de información geográfica facilita el modelado de diferentes componentes territoriales con mayor rapidez, bajo costo y precisión espacial.

Cuando se determina la aptitud del suelo para agricultura de temporal se busca la compatibilidad entre las propiedades físico-químicas del suelo y características fisiográficas (estas se incluyen en la variable CUS) y de clima dentro del territorio (IH), la interrelación de estas variables permite modelar la ubicación espacial de las áreas que ofrecen mejores aptitudes de producción agrícola por diferentes periodos, esto permite mejorar el nivel de vida de los agricultores y sus familias, a través de la agricultura sostenible (Santiago, 2005).

El índice de humedad ( $P/Et_0$ ) es ampliamente utilizado en agricultura para la identificación de la sequía agrícola (Bautista *et al.*, 2016), debido a que expresa el balance entre el agua que llega por precipitación pluvial y el agua que se pierde por evapotranspiración, por lo que los resultados de este estudio son los primeros reportes de zonificación agroclimática utilizando el IH para el territorio estatal de Campeche.

El estado presenta un amplio intervalo en el IH, lo que permite el cultivo de variedades de diferentes ciclos de producción (Bautista *et al.*, 2015). Este hecho es de gran relevancia para enfrentar los efectos del cambio climático (Stigter *et al.*, 2005). En la península de Yucatán se han logrado producir variedades de maíz, chiles, calabazas y frijol con diferentes tiempos de desarrollo, que se pueden utilizar de acuerdo a las aptitudes que presenta el territorio (Dzib-Aguilar *et al.*, 2011, Pinedo *et al.*, 2009, Latournerie *et al.*, 2006). Lo que indica que es posible adaptar los procesos agrícolas a tierras con diferentes potenciales y así obtener el mejor potencial de producción, haciendo también uso del agua residual en suelos de alta retención de humedad (Aguilar y Bautista 2011).

## CONCLUSIONES GENERALES

El desarrollo de metodologías para la estimación del potencial de evapotranspiración de cultivos agrícolas ha sido un tema relevante en la comunidad científica como un mecanismo para eficientizar el agua en la agricultura ante las variaciones climáticas actuales. Los modelos de mayor desarrollo se han centrado en los propuestos por FAO- Penman-Monteith, Penman-Monteith, y Thornthwaite, que han sido aplicados principalmente a cultivos como maíz, sorgo, soya y papa. Las regiones donde se ha desarrollado más conocimiento sobre las metodologías para estimar el potencial de evapotranspiración de un cultivo agrícola, coinciden con los principales países agrícolas a nivel mundial: Estados Unidos, China, Brasil, e India. Mientras los países de América (Estados Unidos y Brasil) han centrado el desarrollo de investigación en temas asociados a agricultura y recursos hídricos; los países asiáticos (China e India) por su condición de vulnerabilidad ante el cambio climático se han centrado en el desarrollo de modelos meteorológicos.

Debido a que los campos en los que se requiere conocer la distribución espacial del régimen hídrico son diversos, y tras la búsqueda de los modelos apropiados que describan el fenómeno en estudio, la interpolación de datos y a través de la comparación de MVT, los valores obtenidos en el presente estudio indican que los modelos que mejor se ajustaron a los datos para las interpolaciones fueron J-Bessel (enero, marzo, abril, mayo, junio, agosto), Estable (febrero, julio, septiembre, Primavera-Verano, Otoño-Invierno, anual) Hole Effect (octubre, noviembre) y Esférico (diciembre) ya que tuvieron menor error cuadrático medio, por lo que se las considera adecuadas para la estimación de Índice de Humedad en el Estado de Campeche a partir del muestreo realizado.

En esta investigación, el análisis multicriterio en un ambiente SIG permitió la inclusión y modelación de una serie de variables cualitativas (CUS) y cuantitativas (IH) presentes en el territorio campechano, estas variables están vinculadas estrechamente con el desarrollo agrícola sostenible. Es notorio que el uso de tecnologías geoespaciales orientadas hacia análisis espaciales de un territorio juega un papel importante y transversal en cuanto a la explotación, conservación y mejoramiento ambiental de sus ecosistemas naturales.

Tras la modelación geoespacial de las variables IH y CUS obtenidas a partir de las características geográficas del territorio, se obtuvo un escenario gráfico viable (IH PNUMA) para cada periodo

evaluado, determinando las zonas con mayor aptitud para agricultura de temporal. Como primer acercamiento hacía un escenario de agricultura sostenible territorial viable, la modelación proporciona unidades territoriales en las cuales es posible hacer uso eficaz del régimen hídrico pluvial. Sin embargo, es importante tener presente para investigaciones futuras, las unidades del territorio presentadas deberían zonificarse de manera más exacta para obtener subunidades del territorio capaces de proporcionar los requerimientos de los cultivos agrícolas que deben desarrollarse dentro del espacio geográfico del estado de Campeche.

Los datos que se obtuvieron durante el análisis multicriterio, pueden servir de base para ayudar al diseño de estrategias que permitan el aprovechamiento de los componentes territoriales, al mismo tiempo que se mejora la toma de decisiones sobre la administración pública de los territorios.

## LITERATURA CITADA

- Aguado-López, E., Rogel-Salazar, R., Garduño-Oropeza, G., Becerril-García, A., Zúñiga-Roca, M., & Velázquez-Álvarez, A. (2009). Patrones de colaboración científica a partir de redes de coautoría. *Convergencia Revista de Ciencias Sociales* 16:225-258.
- Aguilar, Y., & Bautista, F. (2011). Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer functions, spatial integration and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 221-232.
- Aleixandre, J.L., Aleixandre-Tudó, J.L., Bolaños-Pizarro, M., Aleixandre-Benavent, R. (2015) Mapping the scientific research in organic farming: a bibliometric review. *Scientometrics* 105:295-309, <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1677-4>
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: an open-source software for exploring and manipulating networks. *Icwsm* 8:361-362.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., & Aguilar, Y. (2015) Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán México: Un enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2: 303-315.
- Bautista, F., Pacheco, A., & Bautista-Hernández, D.A. (2016) Análisis del cambio climático con datos mensuales (Clic-MD). Skiu, México. 60p.
- Börner, K. (2011). Science of Science Studies: Sci2 Tool. *Communications of the ACM* 54:60-69.
- Bouchet-Valat, M., & Bastin, G. (2013). RcmdrPlugin. temis, a graphical integrated text mining solution in R. *The R Journal* 5:188-196.
- Bravo-Vinaja, Á. (2015) Impacto de la Revista Fitotecnia Mexicana y de las revistas mexicanas indexadas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:229-234.
- Bravo-Vinaja, Á., Sanz-Casado, E. (2008) Análisis bibliométrico de la producción científica de México en Ciencias Agrícolas durante el periodo 1983-2002. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31:187-194.
- Cañas-Guerrero, I., Mazarrón, F.R., Pou-Merina, A., Calleja-Perucho, C., & Díaz-Rubio, G. (2013). Bibliometric analysis of research activity in the “Agronomy” category from the Web of Science, 1997–2011. *European Journal of Agronomy*, 50, 19-28.
- CLICOM (CLImate COMputing Project). (2020). Base de datos de estaciones climáticas. Ensenada, B.C. México. Disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>.
- Colantoni, A., Ferrara, C., Perini, L., & Salvati, L. (2015). Assessing trends in climate aridity and vulnerability to soil degradation in Italy. *Ecological indicators*, 48, 599-604.
- Collazos, S., Howland, F.C., & Le Coq, J.F. (2021). Evaluación de la Estrategia agricultura sostenible adaptada al clima (EASAC) para la región SICA. Teoría de cambio de la EASAC y resultados identificados en los países de la región SICA.

- CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología). (2021). Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica. [https://www.conricyt.mx/acervo-editorial/recursos-por-institucion?id\\_inst=38](https://www.conricyt.mx/acervo-editorial/recursos-por-institucion?id_inst=38)
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2020). Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024. CONANP.
- Coulibaly, M., & Becker, S. (2007). Spatial interpolation of annual precipitation in South Africa. Comparison and evaluation of methods. *Water International*, 32(3), 494-502.
- Chao, C. C., Yang, J. M., & Jen, W. Y. (2007). Determining technology trends and forecasts of RFID by a historical review and bibliometric analysis from 1991 to 2005. *Technovation*, 27(5), 268-279.
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F., & Longley, P. (2007). Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Troubador publishing ltd.
- Dzib-Aguilar, L., Segura-Correa, J., Ortega-Paczka, R., & Latournerie-Moreno, L. (2011). Cruzas dialélicas ente poblaciones nativas de maíz de Yucatán y poblaciones mejoradas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14: 119-127.
- Englehart, P.J., & Douglas, A.V. (2000). Dissecting the macro-scale variations in Mexican maize yields (1961-1997). *Geographical and Environmental Modeling*, 4(1), 65-81. DOI: 10.1080/136159300111379
- Espinosa-Calderón, A., Turrent-Fernández, A., Tadeo-Robledo, M., Vicente-Tello, S., Gómez-Montiel, N., Valdivia-Bernal, R. & Zamudio-González, B. (2014). Ley de Semillas y Ley Federal de Variedades Vegetales y transgénicos de maíz en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(2), 293-308.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute. ArcGIS). (2015). Software de procesamiento digital de imágenes satelitales (Versión 10.3). Redlands, CA, USA. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop> (noviembre 2022).
- Ezra, A., Adebayo, A.A., & Umar, A.S. (2020). Application of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Model in Agro-climatic Zoning of Taraba State for Ofada Rice Production. *FUTY Journal of the Environment*, 14(1), 108-120.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1996) Agroecological zoning: Guidelines. FAO Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division. Rome, Italy. 78p
- Gersbach, H., & Schneider, M.T. (2015). On the global supply of basic research. *Journal of Monetary Economics* 75:123-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2015.02.004>
- Giraldo, P., Benavente, E., Manzano-Agugliaro, F., & Gimenez, E. (2019). Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy* 9:352-369, <https://doi.org/10.3390/agronomy9070352>

- González, M.D.Á., & Mora, R.D. (2013). Ecuaciones universales ajustadas para el cálculo de lluvias máximas de corta duración. *GEOS*, 33(2).
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1-2), 1-45.
- Granovetter, M.S. (1973). The strength of weak ties. *American Journal of Sociology* 78:1360-1380. <https://doi.org/10.1086/225469>
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (1989). Manual de clasificación cartográfica e interpretación de suelos con base en el sistema de taxonomía de suelos. Cuernavaca, Morelos, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Uso potencial del suelo*. INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2020. Anuario estadístico y geográfico de Campeche (2020). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes.
- Jenks, G.F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186-190.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). Using ArcGis Geostatistical Analyst. ESRI. 300 p
- Kravchenko, A. (2003). Influence Of Spatial Structure On Accuracy Of Interpolation Methods. *Soil Science Society Of American Journal* 67:1564-157
- Latournerie, L, Tuxill, J, Yupit, E, Arias, L, Cristobal, J, & Jarvis, D.I. (2006). Traditional maize storage methods of Mayan farmers in Yucatan, Mexico: implications for seed selection and crop diversity. *Biodiversity and Conservation* 15: 1771-1795
- Leipold, S. (2014). Creating forests with words—A review of forest-related discourse studies. *Forest Policy Economics* 40:12-20. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.12.005>
- Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, R.M., Moreno, B., Piñango, L., & Villanueva, J.G. (2004). Selección De Un Diseño De Muestreo En Parcelas Experimentales A Partir Del Estudio De La Variabilidad Espacial De Los Suelos. *Bioagro* 16(1):1-1
- Malamos, N., Barouchas, P.E., Tsirogiannis, I.L., Liopa-Tsakalidi, A., & Koromilas, T. (2015) Estimation of monthly FAO Penman-Monteith evapotranspiration in GIS environment, through a geometry independent algorithm. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4:290-299, <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.033>
- Martínez-Santiago, S.Y., Alvarado-Segura, A.A., Zamudio-Sánchez, F.J., & Cristóbal-Acevedo, D. (2017). Análisis espacio-temporal de la modelación forestal en México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 23(1), 5-22.
- Medina-Méndez, J., Alejo-Santiago, G., Soto-Rocha, J.M., & Hernández-Pérez, M. (2018). Rendimiento de maíz grano con y sin fertilización en el estado de Campeche. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(SPE21), 4306-4316

- Mirás-Avalos, J.M., Paz-González, A., Vidal-Vázquez, E., & Sande-Fouz, P. (2007). Mapping monthly rainfall data in Galicia (NW Spain) using inverse distances and geostatistical methods. *Advances in Geosciences*, 10, 51-57.
- Murray-Tortarolo, G.N., Jaramillo, V.J., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253: 124-131
- Nayak, S., & Bankapur, V. (2017). Scientometric Analysis of Scholarly Publications of Agronomist Dr. GS Khush. *VEETHIKA-An International Interdisciplinary Research Journal* 3:1-14.
- Ngoma, H., Wen, W., Ojara, M., & Ayugi, B. (2021). Evaluación de la variabilidad y las tendencias actuales y futuras de las precipitaciones espaciotemporales en Uganda, África Oriental, sobre la base de CHIRPS y conjuntos de datos de modelos climáticos regionales. *Meteorología y Física Atmosférica*, 133(3), 823-843.
- Oliveira, W.D.S., Medeiros, E.S.D., Silva, A.Q.D., & Oliveira, L.A.D. (2022). Spatial mapping of annual rainfall in the São Francisco River Basin. *Revista Ambiente y Água*, 17.
- Oliver, M.A., & Webster, R. (2015). *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. London, UK: Springer International Publishing.
- Palma-López, D., Zavala, J., Bautista, F., Morales, M., López, A., Shirma, E., & Gallegos, J. (2012). Estudio sobre el plan de uso sustentable de los suelos del estado de Campeche, Informe Técnico.
- Pastor, J.A.G. (2004). CLIMATOL: Software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. In *El Clima, Entre El Mar y La Montaña: Aportaciones Presentadas Al IV Congreso De La Asociación Española De Climatología*, Santander, 2-5 De noviembre De 2004 (pp. 493-502).
- Peng, S.B. (2017) Booming research on rice physiology and management in China: A bibliometric analysis based on three major agronomic journals. *Journal of Integrative Agriculture* 16:2726-2735, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61804-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61804-5)
- Pinedo, R., Collado, L., Arias, L., & Shagarodsky, T. (2009). Importancia del maíz, frijol, pallar y chile en agroecosistemas tradicionales del trópico húmedo de Cuba, México y Perú. Cómo conservan los agricultores sus semillas en el trópico húmedo de Cuba, México y Perú, 31-45.
- Riquelme, F.J.M., & Ramos, A.B. (2005). Agua y agricultura sostenible. Presente y futuro del cultivo en secano. *Agua y Agronomía*, 319.
- Rodríguez-González, B., Pineda-Martínez, L.F., & Guerra-Cobián, V.H. (2018). Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el Estado de Zacatecas, México, por medio de información satelital y pluviométrica. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(4).

- Ruíz-Álvarez O., R. Arteaga-Ramírez, M. A. Vázquez-Peña, R. E. Ontiveros C. y R. López-López (2012) Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 28:1-14
- Santiago, J.A. (2005). Determinación del uso potencial de la tierra con fines agrícolas en el municipio Bolívar, Estado Táchira. *Geoenseñanza*, 10(1), 69-85.
- Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J.R., & Pereira-Lorenzo, S. (2021). Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize. *Agriculture* 11(3):246. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030246>
- Sentelhas, P.C., dos Santos, D.L. & Machado, R.E. (2008). Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. *Ambiente & Água* 3:28-42, <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.59>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera: cierre de la producción agrícola.
- ST-CICC (Sistema Técnico de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático). (2021). Programa especial de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. México, D. F.
- Stigter, C.J., Dawei, Z., Onyewotu, L.O.Z., & Xurong, M. (2005). Using traditional methods and indigenous technologies for cropping with climate variability. *Climate Change* 70: 255-271.
- Sun, J., & Yuan, B.Z. (2020) A bibliometric analysis of research on rice and irrigation from the ‘Agronomy’ category based on the Web of Science. *Current Science* 119:438-446.
- Tatry, M.V., Fournier, D., Jeannequin, B., & Dosba, F. (2014). EU27 and USA leadership in fruit and vegetable research: a bibliometric study from 2000 to 2009. *Scientometrics*, 98(3), 2207-2222.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geography Review*. 38: 55-94
- Thornthwaite, C.W., & Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology* 10:185-311.
- Tinoco-Rueda, J.A., Gómez-Díaz, J.D. & Monterroso-Rivas, A.I. (2010). Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*. 2(29):161-168.
- Van Ittersum, M.K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field crops research*, 52(3), 197-208.
- Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Keulena, H.V., Kropff, M.J., Bastiaans, L., & Goudriaan. Y.J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Europ. J. Agronomy* 18: 201-234

Villegas Martínez, D. (2021). Determinación del uso potencial del suelo a partir de la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales de un área de protección ambiental ubicada en la Región Centro-Sur de México. *Acta universitaria*, 31.

Villegas, D., & Gómez, W. (2020). Procesos locales de transformación que detonan el cambio de uso de suelo y vegetación en un área natural protegida de la Región Centro de México. *Acta Universitaria*, 30, e2864.