



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS DE LICENCIATURA

*DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE UNITARIO DE RIEGO MEDIANTE  
EL ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL EN LOS MUNICIPIOS DE MAYOR  
PRODUCCIÓN DE LOS CINCO CULTIVOS DE ALTO VALOR EN EL  
ESTADO DE MICHOACÁN*

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERA CIVIL

QUE PRESENTA:

MARIA ISABEL MALDONADO MERCADO

ASESOR:

DR. JUAN PABLO MOLINA AGUILAR

MORELIA, MICHOACÁN. JULIO 2021



*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

---

María Isabel Maldonado Mercado

*“...Cultiva la firmeza del espíritu para que te proteja de las adversidades repentinas...”*

*... y sean cualesquiera tus trabajos y aspiraciones, conserva la paz con tu alma en la bulliciosa confusión de la vida...”*

*Max Ehrmann*



*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

---

María Isabel Maldonado Mercado

## **DEDICATORIA**

*A la memoria de mi payito, un hombre lleno de entusiasmo hasta el fin de sus días & gran conocedor del campo.*

*A la memoria de mi abuelita Judith una mujer determinada, trabajadora y valiente.*

*A los jóvenes a quienes se les han presentado dificultades y han llegado a perder momentáneamente la motivación, pero no desisten para cumplir sus metas y sueños.*



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

---

María Isabel Maldonado Mercado

## **AGRADECIMIENTOS:**

*A mis abuelitos paternos agradecimientos eternos por su amor y cariño incondicional, por ser mi motivación y ejemplo.*

*A mis padres por brindarme todos los recursos a su alcance y fomentar la disciplina, superación y anhelo de éxito en la vida.*

*A mis hermanos por su cariño y admiración hacía mí.*

*A mis amigos y sus familias por hacerme sentir acogida mientras tenía lejos a la mía.*

*Al Psicólogo René Ibarra por estar presente en una de las etapas más difíciles durante mi juventud y proporcionarme medios para mejorar mi estabilidad física y mental.*



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

---

María Isabel Maldonado Mercado

*A la educación pública por ser el medio para llegar hasta este punto.*

*A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y con especial cariño al Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo por instruirme académica, cultural y socialmente.*

*A la Facultad de Ingeniería Civil por proporcionarme los conocimientos necesarios para mi formación profesional.*

*A todos mis profesores desde el jardín de niños hasta la etapa universitaria, en especial a mi maestra de primaria Evita, a los profesores Muñoz y Tafolla del Colegio de San Nicolás por transmitirme la pasión por las ciencias exactas, al profesor Alejandro Montes del Departamento de Idiomas, al Dr. Chávez Vega por siempre ser un amigo para mí dentro de la facultad y un gran motivador, al Dr. Wilfrido Molina por siempre escucharme, al Maestro Jesús Martín Caballero Ulaje y al Ingeniero Jorge Leonel Ángel Hurtado por ayudarme durante mi estadía en el laboratorio de hidráulica.*

*A mi director de tesis, el Dr. Juan Pablo Molina por acompañarme en esta última de etapa de la licenciatura y regresarme la oportunidad de poder realizar mi trabajo de tesis en el área de hidráulica, por su respaldo moral y estar siempre atento a las dudas que se iban presentando en el desarrollo de la presente investigación, por su tiempo, disposición y motivación.*



*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

---

María Isabel Maldonado Mercado

## *ÍNDICE GENERAL*

CAPITULO I. Introducción  
CAPITULO II. Revisión de literatura  
CAPITULO III. Metodología  
CAPITULO IV. Resultados  
CAPITULO V. Discusión  
CAPITULO VI. Bibliografía



## CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	1
1.2 HIPÓTESIS .....	1
1.3 OBJETIVOS .....	1
1.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO .....	2
1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO .....	2
1.6 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....	3
1.7 ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS .....	5
CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 INTRODUCCIÓN.....	6
2.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE INVESTIGACIONES RELACIONADAS.....	6
CAPITULO III. METODOLOGÍA .....	9
3.1 ZONAS DE ESTUDIO .....	9
3.1.1 Municipio de Tancítaro .....	10
3.1.2 Municipio de Jungapeo .....	11
3.1.3 Municipio de Buenavista .....	11
3.1.4 Municipio de Puruándiro.....	11
3.1.5 Municipio de Los Reyes .....	11
3.2 CULTIVOS DE ESTUDIO.....	12
3.2.1 Aguacate .....	12
3.2.2 Guayaba.....	15
3.2.3 Limón .....	18
3.2.4 Zarzamora.....	21
3.2.5 Maíz .....	24
3.3 COEFICIENTES DE DESARROLLO PARCIAL DE LOS CULTIVOS.....	26
3.4 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES (EMC).....	27
3.4.1 Estaciones sinópticas convencionales de superficie .....	29
3.4.2 Estación meteorológica automática (EMA) .....	30



3.4.3 Estación sinóptica meteorológica (ESIME): .....	31
3.4.4 Análisis de los datos de precipitación.....	40
3.5 INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.....	41
3.6 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	43
3.6.1 Evaporación del agua.....	43
3.6.2 Transpiración .....	43
3.6.3 Evapotranspiración de los cultivos .....	44
3.6.4 Método de Blaney-Criddle .....	45
3.6.5 Uso Consuntivo .....	48
3.6.6 Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular .....	52
3.6.7 Edafología y uso de suelo .....	57
3.6.8 Coeficiente de Infiltración .....	59
CAPITULO IV. RESULTADOS .....	63
4.1 INTRODUCCIÓN.....	63
4.2 ANÁLISIS DE DATOS .....	63
4.2.1 Polígonos de Thiessen.....	63
4.2.2 Cálculo de la Evapotranspiración de los cultivos.....	66
4.2.3 Edafología, cobertura vegetal y uso de suelo.....	70
4.2.4 Coeficiente de Infiltración .....	76
4.2.5 Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular .....	93
4.2.6 Valores de eficiencia en el manejo del agua y del sistema de riego .....	94
4.2.7 Cálculo del Coeficiente Unitario de Riego .....	95
CAPITULO V. DISCUSIÓN.....	103
5.1 CONCLUSIONES .....	103
5.2 RECOMENDACIONES.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106



<b>Tabla 1.</b> Coeficiente de desarrollo parcial de los cultivos de estudio .....	26
<b>Tabla 2.</b> Estaciones meteorológicas para el municipio de Tancítaro .....	35
<b>Tabla 3.</b> Estaciones meteorológicas para el municipio de Jungapeo. ....	36
<b>Tabla 4.</b> Estaciones meteorológicas para el municipio de Buenavista. ....	37
<b>Tabla 5.</b> Estaciones meteorológicas para el municipio de Los Reyes. ....	38
<b>Tabla 6.</b> Estaciones meteorológicas para el municipio de Puruándiro. ....	39
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de horas de sol del mes <i>i</i> con respecto al año. (Pérez Morales et.al., 2018) .....	47
<b>Tabla 8.</b> Valores de eficiencia en el manejo del agua (Soil Conservation Sistem EE.UU., International Institute for Land Reclamation and Improvement.).....	51
<b>Tabla 9.</b> Valores de eficiencia del sistema de riego (Centro Internacional de Riego, EE.UU. Manual No. 3, 1985).....	51
<b>Tabla 10.</b> Profundidad radicular de los cultivos de estudio. (Manual 56 FAO, 2014).....	53
<b>Tabla 11.</b> Valores de <i>p</i> para los cultivos de estudio. (Manual 56 FAO Evapotranspiración de Cultivo, 2014) .	55
<b>Tabla 12.</b> Coeficiente de infiltración por pendiente. (Schosinsky y Losilla,2000) .....	61
<b>Tabla 13.</b> Coeficiente de infiltración por pendiente modificado. ....	61
<b>Tabla 14.</b> Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal. (Schosinsky y Losilla,2000).....	62
<b>Tabla 15.</b> Coeficiente de infiltración por textura de suelo. (Schosinsky y Losilla,2000).....	62
<b>Tabla 16.</b> Resultado del cálculo de la ETc para la estación Los Chorros del Varal en el municipio de Tancítaro. ....	67
<b>Tabla 17.</b> Ajuste de textura de suelo a coeficiente de infiltración por textura de suelo.....	76
<b>Tabla 18.</b> Ajuste de cobertura vegetal a coeficiente de infiltración por cobertura vegetal. ....	77
<b>Tabla 19.</b> Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal para la estación Los Chorros del Varal. ....	79
<b>Tabla 20.</b> Rango de valores para asignación final del valor del coeficiente $k_v$ . ....	79
<b>Tabla 21.</b> Coeficiente de infiltración por textura de suelo para la estación Los Chorros del Varal. ....	80
<b>Tabla 22.</b> Rango de valores para asignación final del valor del coeficiente $k_{ic}$ . ....	80
<b>Tabla 23.</b> Coeficiente de infiltración por pendiente para la estación Los Chorros del Varal. ....	82
<b>Tabla 24.</b> Rango de valores para asignación final del valor del coeficiente $k_p$ . ....	82
<b>Tabla 25.</b> Coeficientes $k_v$ , $k_{ic}$ , $k_p$ y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Tancítaro. ....	84
<b>Tabla 26.</b> Coeficientes $k_v$ , $k_{ic}$ , $k_p$ y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Jungapeo. ....	86
<b>Tabla 27.</b> Coeficientes $k_v$ , $k_{ic}$ , $k_p$ y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Buenavista. ....	88
<b>Tabla 28.</b> Coeficientes $k_v$ , $k_{ic}$ , $k_p$ y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Los Reyes. ....	90
<b>Tabla 29.</b> Coeficientes $k_v$ , $k_{ic}$ , $k_p$ y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Puruándiro. ....	92
<b>Tabla 30.</b> Criterio de ajuste para el valor de <i>p</i> . ....	93
<b>Tabla 31.</b> Valor de <i>p</i> ajustado para la estación Los Chorros del Varal del municipio de Tancítaro.....	94
<b>Tabla 32.</b> Valores para un método de riego eficiente y un manejo bueno de la eficiencia del riego. ....	95
<b>Tabla 33.</b> Valores para un método de riego poco eficiente y manejo pobre de la eficiencia del riego. ....	95
<b>Tabla 34.</b> Cálculo del CUR para la estación Los Chorros del Varal, en el municipio de Tancítaro. ....	96



<b>Ilustración 1</b>	Localización del estado de Michoacán en la República Mexicana .....	9
<b>Ilustración 2</b>	Localización de los municipios de estudio .....	10
<b>Ilustración 3</b>	Árbol de aguacate. ....	12
<b>Ilustración 4</b>	Fruto del árbol de aguacate. ....	13
<b>Ilustración 5</b>	Arbusto de guayaba. ....	15
<b>Ilustración 6</b>	Fruto del arbusto de guayaba. ....	16
<b>Ilustración 7</b>	Árbol de limón en proceso de crecimiento. ....	19
<b>Ilustración 8</b>	Frutos del árbol de limón. ....	19
<b>Ilustración 9</b>	Arbustos de zarzamora. ....	21
<b>Ilustración 10</b>	Fruto del arbusto de zarzamora. ....	22
<b>Ilustración 11</b>	Cultivo de maíz. ....	24
<b>Ilustración 12</b>	Mazorca de cultivo de maíz. ....	25
<b>Ilustración 13</b>	Estación Meteorológica Convencional (CONAGUA, 2016) .....	30
<b>Ilustración 14</b>	Estación meteorológica automatizada. (NMX-AA-166/1-SCFI-2013) .....	31
<b>Ilustración 15</b>	Estación sinóptica meteorológica. (NMX-AA-166/1-SCFI-2013) .....	32
<b>Ilustración 16</b>	Ruta de consulta de estaciones meteorológicas en el SMN. ....	34
<b>Ilustración 17</b>	Localización de las EMC en el municipio de Tancítaro. ....	35
<b>Ilustración 18</b>	Localización de las EMC en el municipio de Jungapeo. ....	36
<b>Ilustración 19</b>	Localización de las EMC en el municipio de Buenavista. ....	37
<b>Ilustración 20</b>	Localización de las EMC en el municipio de Los Reyes. ....	38
<b>Ilustración 21</b>	Localización de las EMC en el municipio de Puruándiro. ....	39
<b>Ilustración 22</b>	Polígonos de Thiessen. ....	40
<b>Ilustración 23</b>	Software para análisis de información geográfica, ArcGIS. ....	41
<b>Ilustración 24</b>	Ruta de consulta de Información Estadística Meteorológica para estación de estudio en el SMN. ....	42
<b>Ilustración 25</b>	Archivo descargable de Estadística para la estación de estudio en el SMN. ....	42
<b>Ilustración 26</b>	Representación de la evaporación y la transpiración de un ciclo vegetativo para un cultivo herbáceo. (FAO Manual 56, 2014).....	45
<b>Ilustración 27</b>	Padrón típico de distribución de las raíces de un cultivo. (CONGOPE, 2014) .....	52
<b>Ilustración 28</b>	Estados del agua en el suelo. (Pérez Morales et.al., 2018) .....	54
<b>Ilustración 29</b>	Ruta de acceso a la información edafológica en el portal de geoinformación de la CONABIO. ....	58
<b>Ilustración 30</b>	Ruta de acceso a la información de uso de suelo en el portal de geoinformación de la CONABIO .....	58
<b>Ilustración 31</b>	Polígonos de Thiessen para el municipio de Tancítaro. ....	64
<b>Ilustración 32</b>	Polígonos de Thiessen para el municipio de Jungapeo. ....	64
<b>Ilustración 33</b>	Polígonos de Thiessen para el municipio de Buenavista. ....	65
<b>Ilustración 34</b>	Polígonos de Thiessen para el municipio de Los Reyes. ....	65
<b>Ilustración 35</b>	Polígonos de Thiessen para el municipio de Los Puruándiro. ....	66
<b>Ilustración 36</b>	Edafología del municipio de Tancítaro. ....	71
<b>Ilustración 37</b>	Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Tancítaro. ....	71
<b>Ilustración 38</b>	Edafología del municipio de Jungapeo. ....	72
<b>Ilustración 39</b>	Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Jungapeo. ....	72
<b>Ilustración 40</b>	Edafología del municipio de Buenavista. ....	73
<b>Ilustración 41</b>	Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Buenavista. ....	73
<b>Ilustración 42</b>	Edafología del municipio de Los Reyes. ....	74



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

---

María Isabel Maldonado Mercado

<b>Ilustración 43</b> Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Los Reyes.....	74
<b>Ilustración 44</b> Edafología del municipio de Puruándiro.....	75
<b>Ilustración 45</b> Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Puruándiro.....	75
<b>Ilustración 46</b> Coeficiente $k_v$ para el municipio de Tancítaro.....	83
<b>Ilustración 47</b> Coeficiente $k_{ic}$ para el municipio de Tancítaro.....	83
<b>Ilustración 48</b> Coeficiente $k_p$ para el municipio de Tancítaro.....	84
<b>Ilustración 49</b> Coeficiente $k_v$ para el municipio de Jungapeo.....	85
<b>Ilustración 50</b> Coeficiente $k_{ic}$ para el municipio de Jungapeo.....	85
<b>Ilustración 51</b> Coeficiente $k_p$ para el municipio de Jungapeo.....	86
<b>Ilustración 52</b> Coeficiente $k_v$ para el municipio de Buenavista.....	87
<b>Ilustración 53</b> Coeficiente $k_{ic}$ para el municipio de Buenavista.....	87
<b>Ilustración 54</b> Coeficiente $k_p$ para el municipio de Buenavista.....	88
<b>Ilustración 55</b> Coeficiente $k_v$ para el municipio de Los Reyes.....	89
<b>Ilustración 56</b> Coeficiente $k_{ic}$ para el municipio de Los Reyes.....	89
<b>Ilustración 57</b> Coeficiente $k_p$ para el municipio de Los Reyes.....	90
<b>Ilustración 58</b> Coeficiente $k_v$ para el municipio de Puruándiro.....	91
<b>Ilustración 59</b> Coeficiente $k_{ic}$ para el municipio de Puruándiro.....	91
<b>Ilustración 60</b> Coeficiente $k_p$ para el municipio de Puruándiro.....	92



<b>Gráfico I.</b> Coeficiente de Desarrollo Parcial para el Aguacate (Aparicio Mijares, 2010) .....	15
<b>Gráfico II.</b> Coeficiente de Desarrollo Parcial para la guayaba. (Corba Piraquive et.al.).....	17
<b>Gráfico III.</b> Coeficiente de Desarrollo Parcial para Huerta de Cítricos aplicable a la Guayaba. (Aparicio Mijares, 2010).....	18
<b>Gráfico IV.</b> Coeficiente de Desarrollo Parcial para Huerta de Cítricos. (Aparicio Mijares, 2010) .....	20
<b>Gráfico V.</b> Coeficiente de Desarrollo Parcial para el Maíz. (Aparicio Mijares, 2010) .....	26
<b>Gráfico VI.</b> Evapotranspiración para el aguacate por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Tancítaro. ....	68
<b>Gráfico VII.</b> Evapotranspiración para la guayaba por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Jungapeo. ....	68
<b>Gráfico VIII.</b> Evapotranspiración para el limón por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Buenavista.....	69
<b>Gráfico IX.</b> Evapotranspiración para la zarzamora por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Los Reyes. ....	69
<b>Gráfico X.</b> Evapotranspiración para el maíz por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Puruándiro. ....	70
<b>Gráfico XI.</b> CUR para el aguacate por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Tancítaro, escenario 1. ....	97
<b>Gráfico XII.</b> CUR para el aguacate por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Tancítaro, escenario 2. ....	97
<b>Gráfico XIII.</b> CUR para la guayaba por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Jungapeo, escenario 1. ....	98
<b>Gráfico XIV.</b> CUR para la guayaba por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Jungapeo, escenario 2. ....	98
<b>Gráfico XV.</b> CUR para el limón por área de influencia de estación climatológica en el municipio Buenavista, escenario 1. ....	99
<b>Gráfico XVI.</b> CUR para el limón por área de influencia de estación climatológica en el municipio Buenavista, escenario 2. ....	99
<b>Gráfico XVII.</b> CUR para la zarzamora por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Los Reyes, escenario 1. ....	100
<b>Gráfico XVIII.</b> CUR para la zarzamora por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Los Reyes, escenario 2. ....	100
<b>Gráfico XIX.</b> CUR para el maíz por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Puruándiro, escenario 1. ....	101
<b>Gráfico XX.</b> CUR para el maíz por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Puruándiro, escenario 2 .....	101



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

---

María Isabel Maldonado Mercado

<b>Ecuación 1</b> Cálculo de la Evapotranspiración .....	46
<b>Ecuación 2</b> Cálculo del Factor de Luminosidad .....	46
<b>Ecuación 3</b> Cálculo de $f_i$ .....	46
<b>Ecuación 4</b> Factor de corrección $K_{ti}$ para zonas áridas .....	47
<b>Ecuación 5</b> Cálculo de evapotranspiración para periodos menores a un ciclo vegetativo .....	47
<b>Ecuación 6</b> Cálculo de la altura de precipitación efectiva ( $I_{LL}$ ) .....	48
<b>Ecuación 7</b> Cálculo de la lámina de riego neta ( $I_{LN}$ ) .....	48
<b>Ecuación 8</b> Cálculo de la lámina de riego bruta ( $I_{R\text{ bruta}}$ ) .....	49
<b>Ecuación 9</b> Cálculo de la lámina de riego bruta diaria ( $I_{R\text{ bruta diaria}}$ ) .....	50
<b>Ecuación 10</b> Cálculo del volumen demandado ( $V_{\text{demandado}}$ ) .....	50
<b>Ecuación 11</b> Cálculo del coeficiente unitario de riego (C.U.R.) .....	50
<b>Ecuación 12</b> Cálculo del agua fácilmente aprovechable (AFA) .....	54
<b>Ecuación 13</b> Cálculo de $p$ ajustado de acuerdo a la tasa de ETC. (Manual 56 FAO, 2014) .....	56
<b>Ecuación 14</b> Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular. ....	57
<b>Ecuación 15</b> Infiltración mensual. ....	59
<b>Ecuación 16</b> Infiltración mensual corregida por retención de follaje. ....	60
<b>Ecuación 17</b> Coeficiente de infiltración. ....	60



## RESUMEN

La crisis hídrica en el campo ha sido una constante en la historia de México, donde un recurso imprescindible para lograr satisfactoriamente la producción de los cultivos es el agua, la cual se necesita proporcionar en la cantidad adecuada. En este sentido y para el enfoque de estudio se analizaron las necesidades hídricas de los cultivos de aguacate, guayaba, limón, maíz y zarzamora en los municipios de mayor producción en el estado de Michoacán, México. Se definió el coeficiente unitario de riego adecuado para los cultivos propuestos en las zonas de estudio mediante el establecimiento de las características fisiológicas. Se desarrolló una herramienta de cálculo para el estudio de la necesidad hídrica de los cultivos, así como la revisión de la variación temporal de ésta. Respecto de la climatología de los municipios seleccionados se geoprocesaron los datos reunidos obteniéndose que la ubicación espacial de los cultivos en la zonificación por las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas dentro del municipio modifica las demandas de agua para la adecuada producción de éstos. Por lo antes señalado se decidió el empleo de dos escenarios límite para la determinación del coeficiente unitario de riego. Obteniendo como resultado que el empleo del escenario: *método de riego poco eficiente y manejo pobre de la eficiencia del riego* aumenta hasta en un 246% el CUR en comparación con un *método de riego eficiente y un buen manejo de la eficiencia del riego*.

**PALABRAS CLAVE:** *Coeficiente Unitario de Riego, Método de Blaney-Criddle, Evapotranspiración, Coeficiente de Infiltración, Variación espacio-temporal.*

## ABSTRACT

The water crisis in the countryside has been a constant in the history of Mexico, where an essential resource to achieve satisfactory crop production is water, which needs to be provided in adequate quantity. In this sense and for the study approach, the water needs of avocado, guava, lemon, corn and blackberry crops in the municipalities with the highest production in the state of Michoacán, Mexico, were analyzed. The unit irrigation coefficient suitable for the proposed crops in the study areas was defined by establishing the physiological characteristics. A calculation tool was developed for the study of crop water requirement, as well as the review of its temporal variation. With respect to the climatology of the selected municipalities, the data collected were geoprocesed, obtaining that the spatial location of the crops in the zoning by the areas of influence of the meteorological stations within the municipality modifies the water demands for their adequate production. Therefore, it was decided to use two limit scenarios to determine the unit irrigation coefficient. As a result, the use of the scenario: *inefficient irrigation method and poor management of irrigation efficiency* increases the CUR up to 246% compared to an *efficient irrigation method and good management of irrigation efficiency*.

**KEYWORDS:** *Unit Irrigation Coefficient, Blaney-Criddle Method, Evapotranspiration, Infiltration coefficient, Time-space variation.*



# CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Las crisis hídricas en el campo han sido recurrentes en la historia de México. Un recurso imprescindible para lograr satisfactoriamente la producción de un cultivo determinado es el agua, la cual se necesita proporcionar en la cantidad y calidad adecuada. El agua es indispensable para la vida y al ser un recurso limitado el buen uso de ella es obligado, por lo que se exhorta a utilizarla con conciencia y a evitar los excesos innecesarios en su manejo, que muchas ocasiones conducen al desaprovechamiento.

Por otra parte, dada la importancia de la agricultura como actividad primaria y principal proveedor del sector alimentario es fundamental brindar a los productores, campesinos y agricultores la información necesaria para incrementar la eficiencia en la utilización de los recursos que se emplean en los ciclos de cultivo.

En este sentido y para el enfoque de estudio se analizarán las necesidades hídricas de los cultivos de aguacate, guayaba, limón, maíz y zarzamora en los municipios de mayor producción en el estado de Michoacán, México y proporcionar el coeficiente unitario de riego adecuado para los cultivos propuestos en las zonas de estudio seleccionadas.

## 1.2 HIPÓTESIS

Las alteraciones de las condiciones climatológicas en los municipios de mayor producción en el estado de Michoacán incrementan exponencialmente las demandas de recurso hídrico que permitan garantizar la adecuada producción de los cultivos.

## 1.3 OBJETIVOS

### **General**

Evaluar la necesidad hídrica empleando el método de Blaney – Criddle para los cultivos de aguacate, guayaba, limón, maíz y zarzamora en los cinco municipios de mayor producción del Estado de Michoacán, México.



## **Particulares**

1. Establecer las características fisiológicas de cada uno de los cultivos de estudio, relacionando su ciclo vegetativo con la necesidad hídrica respectiva.
2. Desarrollar una herramienta de cálculo que permita el estudio de cada uno de los cultivos empleando el método de Blaney-Criddle.
3. Establecer gráficos de apoyo para la definición de volúmenes de riego en los municipios de estudio.

## **1.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

Michoacán es el principal productor de aguacate en México lo cual es un indicativo de su importancia. Al ser éste uno de los cultivos más redituables ha incrementado notablemente la cantidad de zonas de producción, lo que ha ocasionado conflictos en las regiones donde se cultiva debido a la cantidad de agua que se emplea para mantener los cultivos y asegurar las producciones.

Pocos son los productores que se ocupan de conocer las necesidades hídricas de los cultivos para emplear la cantidad de agua necesaria; ya sea por desconocimiento, o desinterés.

Gran parte de las personas que se dedican a la agricultura emplean métodos tradicionales para hacer producir sus áreas de cultivo, lo cual restringe la optimización de los insumos a utilizar y genera aumento de costos innecesarios en el ciclo de los cultivos, así como en términos sociales, el agua que se emplea en exceso priva de su uso a otros sectores de la población que podrían necesitarla, aprovecharla y a su vez satisfacer diversas necesidades básicas en las zonas.

De lo anterior nace el interés para desarrollar el tema y evaluar las necesidades hídricas, no solo del aguacate sino de los cinco cultivos con mayor producción en el estado de Michoacán y con ello proporcionar información útil a los productores y a las empresas e instituciones que realizan proyectos, para contribuir al aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos en las zonas de producción.

## **1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO**

Para proceder a realizar el análisis de las necesidades hídricas de los cultivos es necesario emplear datos del registro de lluvias en las zonas de estudio, es frecuente que al consultar los registros se tengan años completos sin datos, lo cual dificulta la investigación al carecer de datos reales que puedan ser usados e intervengan en la coherencia de los resultados obtenidos.



Las condiciones climatológicas de los municipios elegidos para el estudio pueden presentar condiciones climatológicas distintas en diversos puntos de su extensión geográfica lo cual puede repercutir en los resultados obtenidos ya que las áreas de cultivo pueden no localizarse en una misma zona del municipio al que pertenecen.

La información exacta de la localización de los cultivos en estudio puede ser restringida o de difícil acceso al público o en su defecto ni siquiera existir a detalle.

## 1.6 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

*Año Agrícola:* Periodo de dieciocho meses que resulta de la adición de las siembras y cosechas que se realizan en los ciclos agrícolas otoño-invierno y primavera-verano y de las cosechas de productos perennes. Comprende octubre-diciembre de un año, más el siguiente completo y los meses enero-marzo del año subsecuente.

*Capacidad de campo:* Volumen de agua que un suelo es capaz de retener por retención capilar después de su “vaciado” por acción de la gravedad. El agua retenida por capilaridad solo puede ser “desprendida” del suelo por evapotranspiración.

*Edáfico:* Perteneiente o relativo al suelo, especialmente en lo que respecta a las plantas.

*Edafología:* Rama de la ciencia que desarrolla el estudio del suelo desde el punto de vista de las necesidades de las plantas, en particular aquellas que se relacionan con la actividad agrícola, para determinar las técnicas que conlleven a un uso racional. (Universidad Autónoma de Chapingo, 2018).

*Infiltración:* Entrada de agua en la matriz del suelo a través de la interfase suelo-atmósfera. (Lal & Shukla, 2004).

*Ciclos agrícolas:* Son periodos que reciben los nombres de las estaciones del año en que se realizan las siembras (otoño-invierno y primavera-verano). Sin embargo, al considerar la totalidad del período de producción hasta que se llevan a cabo las cosechas, los ciclos se traslapan; es decir, todavía no termina un ciclo cuando inicia el otro, lo cual se debe a la duración de los períodos vegetativos de los cultivos.

*Ciclo vegetativo:* Secuencia de cambios en un organismo vegetal desde su germinación hasta la producción del fruto.

*Ciclo Otoño-Invierno:* En forma general, el periodo de siembras inicia en el mes de octubre y termina en marzo del año siguiente. Las cosechas generalmente inician en diciembre y concluyen en el mes de septiembre del año siguiente.



*Ciclo Primavera-Verano:* El periodo de siembras de este ciclo comienza en abril y finaliza en septiembre del mismo año. Generalmente las primeras cosechas de este ciclo inician en el mes de junio y concluyen en marzo del año siguiente.

*Cultivos cíclicos:* Los cultivos cuyo periodo vegetativo es menor a un año se les denomina cíclicos. En la agricultura del país las siembras y cosechas de los cultivos cíclicos se concentran en dos periodos productivos: en el primero, conocido como otoño-invierno, y el segundo, denominado primavera-verano.

*Cultivos perennes:* En general son aquellos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año. En México la mayoría de los cultivos perennes se cosechan entre los meses de enero-diciembre; razón por la que los registros administrativos se realizan considerando el mes de enero como inicio de cosecha y a diciembre como el cierre. También, existen cultivos como la caña de azúcar, café, alfalfa y cacao, que, por sus características productivas, comerciales y agroindustriales, se registran en periodos especiales de seguimiento estadístico.

*Punto de marchitamiento permanente:* Contenido de humedad de un suelo cuando las plantas se marchitan permanentemente.

*Tierras de labor:* Tierra que se destina al cultivo.

*Uso consuntivo:* Es la combinación de evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente representa solo el 1%), por lo que los términos de evapotranspiración y uso consuntivo pueden ser usados como sinónimos. (Aparicio Mijares, 2010).

*Uso de suelo:* El termino uso de suelo se emplea para definir la utilización que se hace del suelo para realizar distintos tipos de actividades realizadas por los humanos.



## 1.7 ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS

*CONABIO*: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

*CUR*: Coeficiente unitario de riego.

*ETP*: Evapotranspiración.

*INEGI*: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

*SMN*: Servicio Meteorológico Nacional.



## **CAPITULO II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Una vez que se llevó a cabo la indagación pertinente se presenta la literatura que se ha revisado previo al inicio de la investigación denominada “Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán” con el fin de localizar información que pueda ser de utilidad para el trabajo que se desarrollará.

### **2.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE INVESTIGACIONES RELACIONADAS**

Para estimar la evapotranspiración del cultivo *Macías Hernández (2009)* utiliza la metodología de la *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (FAO por sus siglas en inglés) FAO-tanque evaporímetro ya que lo considera una herramienta útil, fácil y barata para la *estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (Solanum lycopersicum Mill. cv. El Cid) en invernadero,*

Rosales Arriaga (2010) en su investigación señala que los datos meteorológicos reportados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) provienen de 3,286 sitios de observación entre los que se encuentran observatorios y estaciones climatológicas convencionales y automáticas. Además, estima que cada dato reportado es representativo de un área de 100 Km<sup>2</sup> que en total cubrirían 328,600 Km<sup>2</sup> que representan el 16.8% del territorio nacional.

Considerando esta información se hace evidente que la mayoría de los cálculos realizados a nivel regional y nacional carecen de una buena representatividad de las variables meteorológicas y por lo tanto generalizan los valores de variables que deberían ser más consistentes para su utilización en modelos. Por tal motivo es necesario obtener mejores estimaciones de datos meteorológicos a las escalas local, regional y nacional.

Con base en lo antes señalado Rosales Arriaga (2010) expone que se requiere del análisis espacial para la generación de modelos de ajuste entre: variables medidas en campo y de percepción remota que den como resultado mapas continuos de la temperatura del aire y de la evapotranspiración a niveles locales, regionales y nacionales que expliquen la variabilidad temporal y espacial de estas variables climatológicas.



Al respecto Segura Castruita, *et. al.* (2016) enuncia que la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) es importante en el uso del agua con aplicaciones agrícolas, ecológicas y otras actividades de planeación. La carencia de datos en estaciones meteorológicas (EM) de países en vías de desarrollo conduce a la búsqueda de modelos sencillos que permitan estimar la ETP.

Segura Castruita, *et. al.* (2016) relaciona las variables temperatura máxima (TX) y temperatura mínima (TN) mensuales, altitud (AL) y meses del año (ME), con resultados de ETP obtenidos con el modelo de Hargreaves y Samani (HS) en México, mediante regresiones lineales multivariadas y, evalúa la precisión de los modelos obtenidos respecto a la ETP de HS y Penman (PN).

Para lo antes señalado fueron utilizados datos mensuales de 81 EM (972 datos) para deducir la ETP mensual con el modelo HS. Los resultados se relacionaron con las variables TX, TN, AL y ME, para generar dos modelos de regresión lineal múltiple, a fin de calcular la ETP mensual, uno general (ETPg) y otro para cada mes (ETPm), que se emplearon para determinar la ETP en 12 EM diferentes a las usadas inicialmente.

Los resultados obtenidos demuestran que los modelos ETPg y ETPm tienen un poder predictivo superior al 75%; asimismo, el modelo ETPm tiene el menor error y estimó valores de evapotranspiración potencial similares a los que se obtienen con HS y PN. Por lo que, el modelo ETPm es un modelo sencillo que es aplicable para México sin utilizar la latitud ni la radiación.

De acuerdo con Tapia Vargas *et. al.* (2016) el cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán es una realidad evidente, las huertas de temporal ahora requieren riego para mantener una productividad aceptable. Dentro de su investigación en el experimento que estableció en San Juan Nuevo Mich., en la localidad de El Rosario en una huerta joven de 9 años plantada en marco real de 8 x 8 m. controló la aplicación del riego en línea y tiempo real en relación con el contenido de humedad del suelo y la eficiencia del uso del agua. Para ello empleó dos tratamientos de estudio: 1. Control del riego (CR) con sensores de humedad del suelo FDR (Frequency Domain Reflectometry) y 2. Testigo del productor (T) con riego cada 8-15 días. Ambos tratamientos fueron aplicados a 10 árboles durante el ciclo de riego diciembre 2012-junio 2014, con un microaspersor de 55 LPH.

Los tratamientos contaron con sensores FDR para monitoreo de humedad del suelo. Se registró la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), lluvia (R), lámina de riego aplicada (L<sub>r</sub>) y contenido de agua del suelo (HS). Mediante el balance de humedad calculó la evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>a</sub>) y la eficiencia del uso del agua (EUA). Los resultados indican que se pudo efectuar el riego en base a la información en línea de la humedad del suelo y determinar que CR obtuvo una ET<sub>a</sub>= 568mm (±9.1), mientras T obtuvo 553.8mm (±17.8). La EUA fue de 97.1% para CR y 94.8% para T, lo que indica una mayor eficiencia de uso de agua en relación con el manejo del productor.



Por otra parte, en relación a los ámbitos medioambientales y sociales, con la apertura de los mercados de Estados Unidos, tras la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, se favoreció el crecimiento de las zonas de cultivo de aguacate en el estado de Michoacán, provocando una serie de impactos en los recursos de los municipios que albergan al cultivo, que van desde la deforestación, problemas de escases de agua, pérdida de biodiversidad, conflictos por la tierra y los demás recursos. Segundo Vivanco (2018).

Montiel González et. al. (2019) desarrolla una regionalización basada en datos climohidrográficos y la longitud de periodo de crecimiento para identificar las áreas con potencial de albergar cultivos de temporal en el estado de Michoacán, donde comenta que el análisis agroclimático con la longitud del periodo de crecimiento y la cartografía de los ombrotipos identificados en la investigación pueden ser útiles para la agricultura de temporal y la mejora de la agricultura de riego en los cultivos en los que se conozca el uso consuntivo del agua.

Lo anterior fundamentado en que México se encuentra en el décimo primer lugar de producción agrícola del mundo, mientras que el estado de Michoacán, con una producción de 157 cultivos, es uno de los mayores productores agrícolas del país (SIAP 2017b), aportando el 2.2 y 4.5% del producto interno bruto (PIB) nacional y estatal, respectivamente (SFA 2018). De los cultivos producidos en el estado, el 40.5% se cultiva bajo riego y el 59.5% bajo temporal (SIAP 2017b).



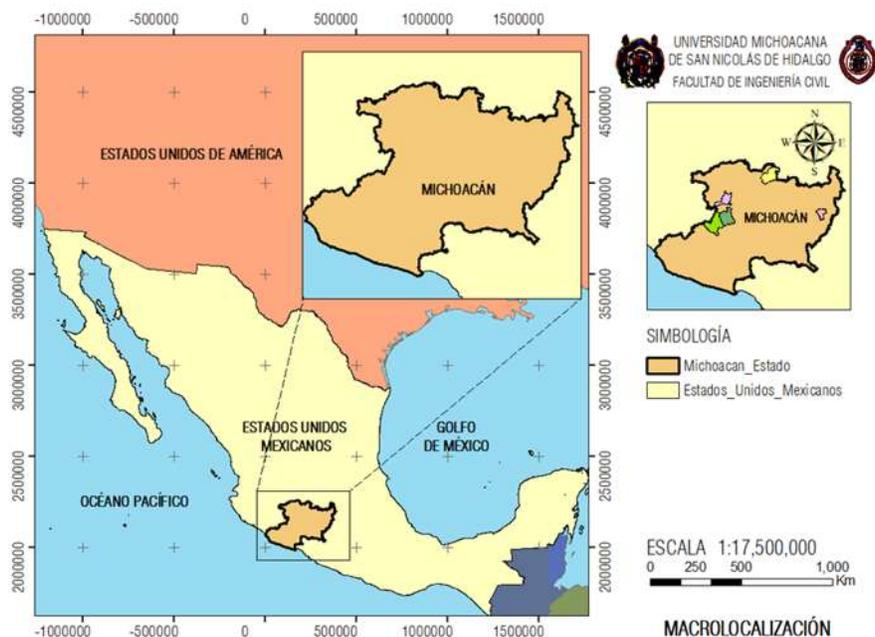
## CAPITULO III. METODOLOGÍA

Durante el desarrollo del presente capítulo se muestra la información necesaria en un orden que corresponde a la secuencia de cálculos orientados a la resolución del problema planteado, lo anterior a fin de abordar el objetivo general planteado en la tesis.

Para la recabación de la información se distinguieron dos etapas: la primera corresponde a los datos necesarios para el cálculo de la evapotranspiración empleando el método de Blaney - Criddle que se encuentran contenidos del apartado 3.1 al 3.6.4 y la segunda, los datos indispensables para el cálculo del *CUR*, que se localizan del apartado 3.6.5 al 3.6.8 y que conducirán a la evaluación de la necesidad hídrica de los cultivos en las zonas de estudio elegidas.

En congruencia a la delimitación de la investigación se estudiarán los 5 cultivos de alto valor en el estado de Michoacán, los cuales se cultivan principalmente en los municipios de Tancítaro, Jungapeo, Buenavista, Puruándiro y los Reyes, considerando las condiciones climatológicas, hidrológicas y geográficas que corresponden a las zonas de estudio y analizándose las necesidades hídricas de los cultivos de aguacate, guayaba, limón, maíz y zarzamora respectivamente.

### 3.1 ZONAS DE ESTUDIO



*Ilustración 1* Localización del estado de Michoacán en la República Mexicana

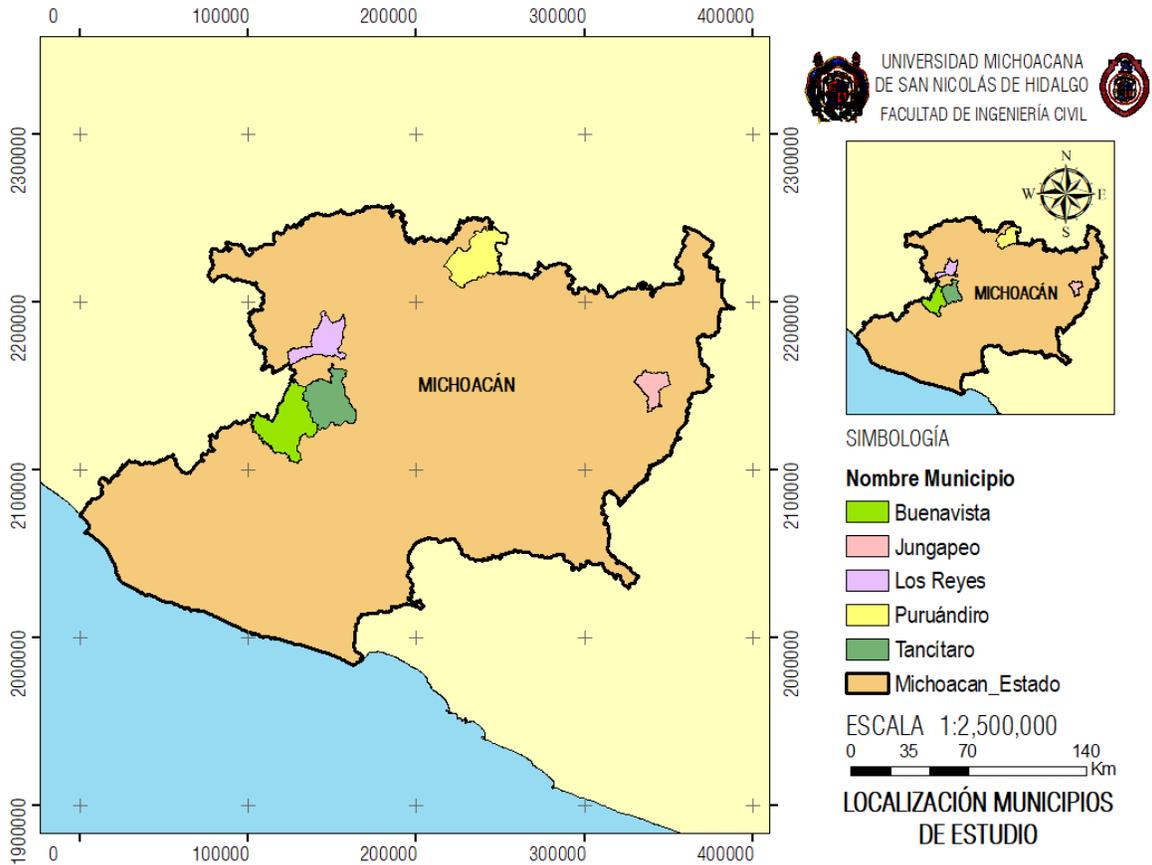


Ilustración 2 Localización de los municipios de estudio

### 3.1.1 Municipio de Tancítaro

El municipio de *Tancítaro* se encuentra localizado al oeste en el estado de Michoacán, en las coordenadas 19°20' de latitud norte y 102°22' de longitud oeste, a una altura de 2,080 msnm. Colinda al norte con los municipios de Peribán y Uruapan, al sur con Apatzingán y Parácuaro, al este con Nuevo Parangaricutiro y al oeste con Buenavista (**Ilustración 2**). Su superficie es de 714.43 Km<sup>2</sup> y representa 1.21% de la superficie total del estado. Su clima es templado con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 15.5°C y la lluvia media anual de 1019 mm. (ENCICLOPEDIA DE LOS MUNICIPIOS, 2020)



### 3.1.2 Municipio de Jungapeo

El municipio de *Jungapeo* se encuentra al noreste en el estado de Michoacán en las coordenadas 19°27' de latitud norte y 100°30' de longitud oeste, a una altura de 1,300 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con el municipio de Tuxpan, al sur con Juárez, al este con Zitácuaro, al oeste con Hidalgo y Tuzantla (**Ilustración 2**). Su superficie es 266.38 Km<sup>2</sup> y representa un 0.45% del total del estado. El clima es templado y en algunas zonas tropicales, con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 21°C y la lluvia media anual de 842 mm. (ENCICLOPEDIA DE LOS MUNICIPIOS, 2020)

### 3.1.3 Municipio de Buenavista

El municipio de *Buenavista* se encuentra al oeste en el estado de Michoacán en las coordenadas 19°12' de latitud norte y 102°35' de longitud oeste, a una altura de 450 msnm. Colinda al norte con Peribán, al sur con Aguililla y Apátzingan al este con Tancítaro y Apátzingan y al oeste con Tepalcatepec y Jilotlán de los Dolores, Jalisco (**Ilustración 2**). Su superficie es de 922.16 Km<sup>2</sup> y representa el 1.56 por ciento de la superficie del Estado. El clima es tropical y seco estepario con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 27.9°C y la lluvia media anual de 610 mm. (ENCICLOPEDIA DE LOS MUNICIPIOS, 2020)

### 3.1.4 Municipio de Puruándiro

El municipio de *Puruándiro* se encuentra al norte en el estado de Michoacán, en las coordenadas 20°05' de latitud norte y 101°31' de longitud oeste, a una altura de 1,890 msnm. Colinda al norte con los municipios de Valle de Santiago, Guanajuato, al sur con Jiménez y Morelos, al este con Yuriria, Guanajuato y al oeste con Angamacutiro y José Sixto Verduzco (**Ilustración 2**). Su superficie es de 718.65 Km<sup>2</sup> y representa el 1.22 por ciento del total del Estado. Su clima es templado con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 19°C y la lluvia media anual de 802 mm. (ENCICLOPEDIA DE LOS MUNICIPIOS, 2020)

### 3.1.5 Municipio de Los Reyes

El municipio de *Los Reyes* se encuentra al noroeste en el estado de Michoacán, en las coordenadas 19°35' de latitud norte y 102°28' de longitud oeste, a una altura de 1,300 msnm. Colinda al norte con los municipios de Tangancicuaro y Tingüindín, al sur con Peribán y Uruapan, al este con Charapan y Uruapan y al oeste con Tingüindín, Tocumbo y Santa María del Oro, Jalisco (**Ilustración 2**). Su superficie es de 480.97 Km<sup>2</sup> y representa un 0.81 por ciento del total del Estado. Su clima es templado y en algunas partes tropical con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 20.2°C y la lluvia media anual de 1177mm. (ENCICLOPEDIA DE LOS MUNICIPIOS, 2020)



## 3.2 CULTIVOS DE ESTUDIO

### 3.2.1 Aguacate

#### Morfología

Con relación a su morfología el aguacate es un árbol perenne que en su hábitat natural alcanza una altura de 10 a 12 m en condiciones ecológicas subtropicales a tropicales, su tallo es leñoso de follaje siempre verde, de gran crecimiento vegetativo, en arboles de 25 a 30 años se han encontrado diámetros de hasta 80 cm con un sistema radicular bastante superficial alcanzando una profundidad de 1 a 1.5 m, sus hojas son simples, enteras de nervadura pinada con un tamaño aproximado de 15 cm de largo por 6 de ancho.

Las ramas son muy sensibles a quemaduras ocasionadas por el sol; sus flores son hermafroditas, simétricas de color verde amarillento con un diámetro de 1 cm. El fruto es una baya que posee un pericarpio (delgado, grueso o quebradizo), un mesocarpio carnoso (con un porcentaje de grasa que varía de 5 a 30%) y un “hueso” que es la protección seminal.



*Ilustración 3* Árbol de aguacate.



*Ilustración 4 Fruto del árbol de aguacate.*

### **Condiciones edáficas y clima**

Respecto de sus condiciones edáficas y clima, el aguacate es sensible al frío y la humedad ambiental por lo que se aconseja su establecimiento en regiones libres de heladas y de vientos calurosos y secos. La temperatura y la precipitación son los dos factores de mayor incidencia en el desarrollo del cultivo; en cuanto al segundo, se considera que 1,200 mm anuales bien distribuidos son suficientes.

Los mejores suelos para el aguacate son los de textura media y profundos ya que garantizan el desarrollo radicular del aguacate, cuanto es más profundo el suelo mejor será el desarrollo, siendo necesario evitar los subsuelos rocosos y muy arcillosos. Es conveniente que el contenido de materia orgánica sea óptimo (de 2.5% a 5 %), para una buena estructura, que permita la porosidad y, consecuentemente, las proporciones adecuadas de aire y agua en el perfil, además de un buen drenaje.

### **Establecimiento de la Plantación**

La siembra se puede hacer por trasplante; la distribución puede ser de 0.60 m x 0.60 m x 0.60 m hasta 0.80 m x 0.80 m x 0.80 m. Los suelos más recomendados para su proceso son los de textura ligera, profundos, bien drenados con pH neutro o ligeramente ácido (5.5 a 7). La variedad más cultivada es la variedad tipo Hass.



## **Condiciones de Cultivo**

El aguacate es muy sensible al exceso de humedad en el suelo debido a que su sistema radicular posee pocos pelos absorbentes y realiza la absorción de agua y nutrientes principalmente por las puntas de las ramificaciones de sus raíces, los riegos pesados provocan una rápida asfixia radicular y favorece la proliferación de hongos. Los suelos arcillosos no son muy convenientes para este cultivo por su deficiente drenaje y los arenosos requieren de un intenso programa de riego y fertilización.

La producción de aguacate en condiciones de temporal no es conveniente desde el punto de vista económico, ya que el factor riego se vuelve fundamental para una explotación racional. La cantidad de agua en el fruto es del 70% mientras que en otros frutales oscilan entre 50 y 90%.

Los requerimientos del árbol en este periodo son altos y el perfil del suelo debe contener una cantidad adecuada, el cultivo del aguacate es muy exigente con respecto a este elemento ya que, en regiones con precipitaciones de 800 mm anuales, requiere adicionalmente para completar su ciclo de cultivo de unos 5000 m<sup>3</sup> /ha de agua, sin embargo, debe tenerse en cuenta que es muy sensible a la asfixia radicular, por esta razón no se recomiendan los suelos con poco drenaje o muy arcillosos.

En el contexto productivo, de las 205,250 ha sembradas en 2016, el 88.31% de la superficie se encuentra mecanizada, 82.34% cuenta con tecnología aplicada a la sanidad vegetal, mientras que 76.65% del territorio sembrado con este cultivo contó con asistencia técnica. Por otro lado, 45.98% de la producción es de modalidad de riego y el resto es temporal.

## **Plantación y cosecha**

La mejor época para realizar la plantación es durante el mes de junio, toda vez que las lluvias ya estén bien establecidas, pero si se cuenta con agua para riego y no se tienen problemas de heladas cualquier época es buena para realizar la siembra con planta bien desarrollada. (Gutiérrez, 2014)



### Gráfico de coeficiente de desarrollo parcial

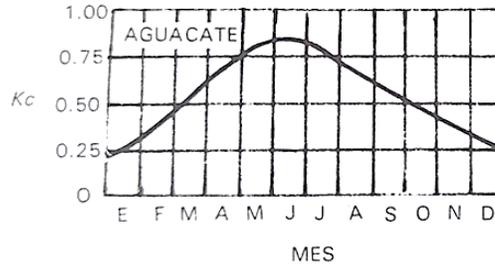


Gráfico I. Coeficiente de Desarrollo Parcial para el Aguacate (Aparicio Mijares, 2010).

## 3.2.2 Guayaba

### Morfología

El guayabo es un árbol o arbusto perennifolio o caducifolio, de 3 a 10 m (hasta 20 m) de altura, con un diámetro de hasta 60 cm con copa irregular y hojas decusadas simples; láminas de 3 a 13.5 cm de largo por 1.5 a 6 cm de ancho, tronco generalmente torcido y muy ramificado. Sus ramas son gruesas, ascendentes y retorcidas.

Los frutos son bayas hasta de 8 cm de diámetro, globosas a ovoides, con el cáliz persistente en el ápice, carnosas, de color crema amarillento a rosado, de olor fragante y sabor agridulce con cáscara exterior fina de color amarillo; el fruto contiene numerosas semillas redondas de 3 a 5 mm, rodeadas de una pulpa amarillenta a rosada de sabor muy agradable. En cuanto a la raíz, presenta un sistema radical superficial.

El follaje del guayabo dependiendo la especie puede ser perennifolio o caducifolio, con floración de marzo a septiembre. El fruto madura de 90 a 150 días después de la floración teniendo una polinización entófila.



Ilustración 5 Arbusto de guayaba.



**Ilustración 6** Fruto del arbusto de guayaba.

### **Condiciones edáficas y clima**

En México prospera en diferentes condiciones climáticas: habita en climas cálido, semicálido, semiseco, seco y templado. Las plantaciones comerciales se encuentran en climas tropicales secos, con temperaturas promedio de 18°C, precipitación anual de 600. La temperatura adecuada para su desarrollo está entre los 15°C y 30°C, aunque puede tolerar hasta 45°C.

Los requerimientos pluviales se encuentran entre 1,000 mm y 2,000 mm. Se han encontrado plantas donde las precipitaciones alcanzan 5,000 mm anuales. La especie tolera diversas condiciones de suelo, pero produce mejor en suelos bien drenados, con abundante materia orgánica y un pH de 4.5 a 7.5. Es tolerante a suelos ácidos y alcalinos (pH de 4.5 a 9.4). Se presenta principalmente en suelos con problemas de drenaje, tanto de origen calizo como metamórfico e ígneo.

La altitud media de las huertas de guayaba en las principales zonas productoras es de 1,200m a 1,700m y una temperatura media anual de 21 a 22°C (Padilla et al., 1999).

### **Establecimiento de la Plantación**

La distancia óptima de plantación es de 10 m, pero se puede plantar a 5m. La poda en los cultivos de guayabo se utiliza para adelantar o retrasar la floración, para mejorar el tamaño y la calidad del fruto. (CONABIO, 2021)



## Condiciones de Cultivo

Demanda gran cantidad de luz solar, es una especie poco resistente a las heladas, es tolerante a la sombra, a los suelos con mal drenaje, suelos compactados, suelos arcillosos, suelos ácidos, suelos pobres, muy degradados y de baja fertilidad, suelos salinos y suelos someros, así como a las inundaciones temporales (zonas poco pantanosas o con capa freática muy cercana. (CONABIO, 2021)

## Plantación y cosecha

Es una especie de fácil adaptación con un rápido crecimiento y una longevidad de 30 a 40 años. La producción de frutos comienza a partir de los 4 años y declina a 15 años. El cultivo puede rejuvenecerse mediante una poda drástica. La producción promedio anual por árbol es de 63 Kg y se llega a obtener 3 cosechas por año. Un árbol puede llegar a producir desde 100 hasta 450 frutos. (CONABIO, 2021)

## Gráfico de coeficiente de desarrollo parcial

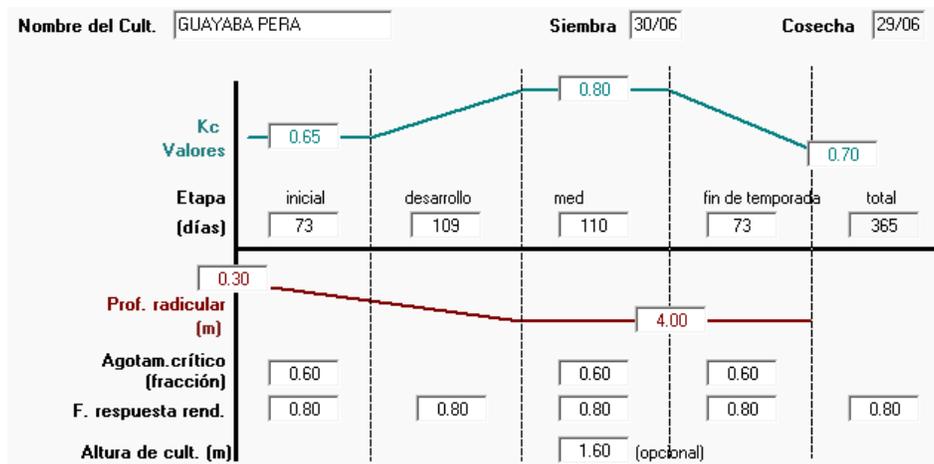


Gráfico II. Coeficiente de Desarrollo Parcial para la guayaba. (Corba Piraquive et.al.)

Dado que la guayaba posee un alto contenido de vitamina C, se le suele “considerar” un cítrico, bajo tal premisa se presenta el gráfico del coeficiente de desarrollo parcial para huerta de cítricos.

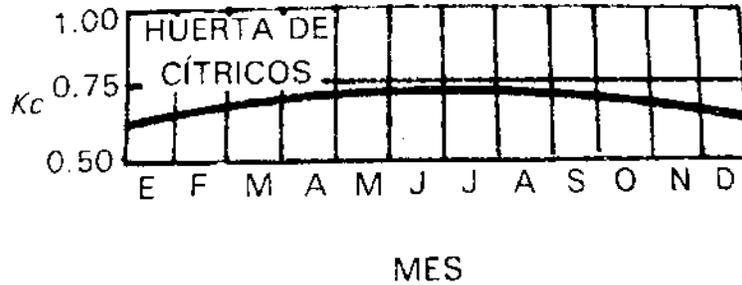


Gráfico III. Coeficiente de Desarrollo Parcial para Huerta de Citricos aplicable a la Guayaba. (Aparicio Mijares, 2010)

Realizando una comparativa entre el Gráfico II y el Gráfico III se puede observar cierta diferencia entre los valores mostrados por lo cual se optará elegir los valores del Gráfico II, ya que el gráfico enfoca más los valores al cultivo de la guayaba.

### 3.2.3 Limón

#### Morfología

La producción de limón en México está representada por tres principales variedades cultivadas; estas son: limón persa o sin semilla (*Citrus latifolia*), limón mexicano, verde o amargo (*Citrus aurantifolia*) y limón amarillo o italiano (*Citrus lemon*).

El limonero es un árbol o arbusto pequeño que raras ocasiones sobrepasa los 4m de altura. Sus ramas son delgadas y tienen espinas cortas, con hojas pequeñas, redondas en la base y de color verde pálido. Las flores son pequeñas y blancas. El fruto es pequeño y redondo, con una leve protuberancia en la extremidad. No mide más de 5cm de diámetro en las variedades comunes; su cáscara es fina y verde (amarilla en la madurez), con pulpa jugosa y muy ácida dividida en 9 a 12 gajos.



**Ilustración 7** Árbol de limón en proceso de crecimiento.



**Ilustración 8** Frutos del árbol de limón.

### **Condiciones edáficas y clima**

La temperatura óptima del cultivo para su buen desarrollo es de 22°C a 28°C, con mínima de 17°C y máxima de 38.6°C. Las precipitaciones van de 1200 a 2000 mm anuales. Requiere de suelo franco, arenoso y profundo, con buena humedad y un pH de 5.5 a 7. La temperatura influye de tal manera que varía el tiempo desde la floración hasta la maduración, acortándose en zonas de clima cálido, y alargándose en regiones frescas y frías, pudiendo variar de dos a cuatro meses.



### Establecimiento de la Plantación

La siembra debe hacerse en cepas de 30 cm de diámetro y 50 cm de profundidad. El fondo debe rellenarse con tierra de modo que el cuello de la raíz de las plantas quede al nivel del suelo o ligeramente arriba. Si parte del tallo queda enterrado en el suelo se tendrán problemas de enfermedades, y si el cuello de la raíz queda por arriba del suelo las plantas se pueden ladear o las raíces destapar con los primeros riegos.

### Condiciones de Cultivo

Los suelos deben tener una proporción equilibrada de elementos gruesos y finos, para garantizar una buena aireación y facilitar el paso del agua, además de proporcionar una estructura que mantenga un buen estado de humedad. No toleran la salinidad y son sensibles a la asfixia radicular.

### Plantación y cosecha

La producción de limón se da durante todo el año, sin embargo, la mayor disponibilidad se presenta en julio, agosto, octubre y noviembre. Por el contrario, en febrero y marzo se registra la menor disponibilidad.

### Gráfico de coeficiente de desarrollo parcial

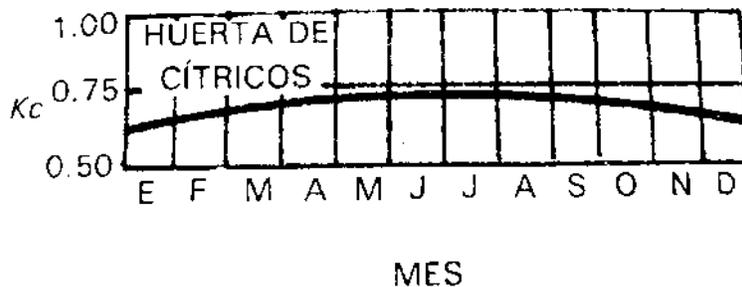


Gráfico IV. Coeficiente de Desarrollo Parcial para Huerta de Cítricos. (Aparicio Mijares, 2010)



### **3.2.4 Zarzamora**

#### **Morfología**

Es una planta arbustiva que pertenece a la familia de las rosáceas, con tallos de 3 m a 4 m de largo. Crecen erectos al principio, aunque se van tumbando y al final quedan en el suelo.

Son angulosos y con fuertes espinas. Las flores son rosadas o blancas con cinco pétalos. Tiene largas raíces que crecen a poca profundidad y de las que surgen nuevos brotes con facilidad. Se pueden aislar y plantar por separado para obtener nuevas plantas.

El fruto es carnosos formado por numerosos frutitos esféricos apiñados, cada uno con un huesillo de color rojizo al principio, pero al final negro cuando madura completamente. Su sabor es dulce aromático.



**Ilustración 9** Arbustos de zarzamora.



**Ilustración 10** Fruto del arbusto de zarzamora.

### **Condiciones edáficas y clima**

Requiere un clima relativamente fresco y soleado con temperaturas que oscilan entre 16°C y 25°C. Requiere entre 1500 mm y 2500 mm de precipitación anual, y humedad relativa de 80% a 90%. Para su óptimo desarrollo se debe cultivar entre los 1200 y 2000 msnm, pero se puede tolerar un amplio rango de altitudes.

Se desarrolla mejor en los suelos franco-arcillosos, de modo que permita una adecuada reserva de agua y el exceso sea evacuado fácilmente, con alto contenido de materia orgánica y un pH entre 5.2 y 6.7 aunque 5.7 es óptimo.

### **Establecimiento de la Plantación**

El ancho de las hileras debe ser de 2 m a 2.5 m, dependiendo de la pendiente del terreno (a mayor pendiente, mayor anchura) y del espacio de plantación disponible. Se abren surcos y se extiende adecuadamente el sistema radicular en las plantas de raíz desnuda.

La profundidad de plantación es de 40 cm a 50 cm; es conveniente compactar el terreno alrededor de las plantas y, dependiendo de la situación hídrica del suelo, regar o no; finalmente se realiza la primera poda, según el arbusto y sus características de desarrollo.



## **Condiciones de Cultivo**

El factor climático limitante para la mora es el frío invernal, por el contrario, una alta humedad atmosférica favorece el desarrollo de las plantas. Por otro lado, se recomienda que el suelo sea enriquecido con materia orgánica. El mejor suelo para la plantación es aquel en que en el año inmediato anterior se haya cultivado un cereal o leguminosa.

Un aspecto a tomar en cuenta, es la orientación de las hileras o surcadas las cuales de sugiere se encuentren de manera perpendicular a la trayectoria del sol, es decir, de norte a sur y de esta forma asegurar que los dos costados del seto reciban el beneficio de la radiación.

La zarzamora en su hábitat nativo es capaz de resistir largos periodos de sequía, sin embargo, una repentina interrupción en el abastecimiento de agua puede reducir considerablemente el rendimiento y tamaño de la fruta. Para obtener una máxima producción es necesario mantener humedad adecuada en el suelo, con regularidad en el riego. (Ávila Fonseca, 2011)

## **Plantación y cosecha**

Las plantaciones generalmente se realizan a finales de invierno o principios de primavera. No se recomienda plantar a fines de primavera o principios de verano, cuando ha comenzado a aumentar notoriamente la temperatura, ya que las altas temperaturas del suelo impedirán un buen enraizamiento. (Ávila Fonseca, 2011)

La planta de zarzamora comienza a producir en el mismo año de la plantación y alcanza su máxima productividad a los tres años de edad, durando generalmente hasta 15 años en producción.

De acuerdo a Clark (2008), 90 a 100 días después que se ha provocado la defoliación, se tiene fruto ya listo para el corte. En condiciones con temperaturas más altas, es posible que disminuya dicho periodo incluso a solamente 75 días después de la defoliación para alcanzar la cosecha. (Rivas C, 2016)

Para la zarzamora, la mayor producción es en los meses de mayo a junio, pero en México se tiene la ventaja de producir hasta el mes de noviembre. (Ricárdez Luna et al, 2016)



### **3.2.5 Maíz**

#### **Morfología**

La planta del maíz es de porte robusto de fácil desarrollo y de producción anual. El tallo es simple erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar los 4 metros de altura, es robusto y sin ramificaciones. Por su aspecto recuerda al de una caña, no presenta entrenudos y sí una médula esponjosa si se realiza un corte transversal.

El maíz es de inflorescencia monoica con inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta.

Las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas, paralelinervias. Se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades. Los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes.

Las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta. En algunos casos sobresalen unos nudos de las raíces a nivel del suelo.



**Ilustración 11** Cultivo de maíz.



**Ilustración 12** Mazorca de cultivo de maíz.

### **Condiciones edáficas y clima**

El maíz se adapta muy bien a todos tipos de suelo, pero suelos con pH entre 6 a 7 son a los que mejor se adaptan. También requieren suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular.

### **Establecimiento de la Plantación**

Desde que se siembran las semillas hasta la aparición de los primeros brotes, transcurre un tiempo de 8 a 10 días, donde se ve muy reflejado el continuo y rápido crecimiento de la plántula.

### **Condiciones de Cultivo**

La semilla permite que se siembre tanto en suelos bien preparados como en suelos con mínima labranza. La siembra se puede realizar de forma manual depositando la semilla en los surcos o con maquinaria a una profundidad de 5 cm con una separación entre hileras de 60 cm a 80 cm y una separación entre plantas de 25 a 50 cm.

La tasa de crecimiento de las plantas está relacionada directamente con la temperatura, por lo que la duración de las etapas variará de acuerdo con la temperatura entre las fases de crecimiento. La deficiencia de nutrientes o humedad puede incrementar la duración de las etapas vegetativas, pero también acortar la duración de las etapas reproductivas. (SIAP, 2021)



## Plantación y cosecha

Para el ciclo otoño-invierno se siembra en noviembre y para el ciclo primavera-verano en junio. (SIAP, 2011)

El cultivo del maíz es de régimen anual, su ciclo vegetativo oscila entre 80 y 200 días, desde la siembra hasta la cosecha. (INEGI, 2016)

## Gráfico de coeficiente de desarrollo parcial

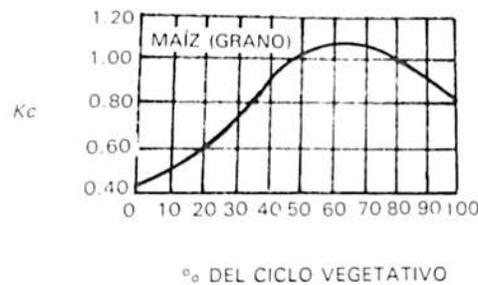


Gráfico V. Coeficiente de Desarrollo Parcial para el Maíz. (Aparicio Mijares, 2010)

## 3.3 COEFICIENTES DE DESARROLLO PARCIAL DE LOS CULTIVOS

Dado que no se encontraron los gráficos de desarrollo parcial para el cultivo de zarzamora, se presenta la siguiente tabla que contiene los valores iniciales, medios y finales del coeficiente de desarrollo para los cultivos de estudio.

Cultivo	Kc inicial	Kc medio	Kc fin	Altura Cultivo (h) (m)
Aguacate, sin cobertura de suelo	0.6	0.85	0.75	3
Cítricos con cobertura activa del suelo o malezas <sup>1</sup>				
70% cubierta vegetativa	0.75	0.7	0.7	4
50% cubierta vegetativa	0.8	0.8	0.8	3
20% cubierta vegetativa	0.85	0.85	0.85	2
Cítricos sin cobertura del suelo <sup>2</sup>				
70% cubierta vegetativa	0.75	0.65	0.7	4
50% cubierta vegetativa	0.65	0.6	0.65	3
20% cubierta vegetativa	0.5	0.45	0.55	2
Maíz <sup>3</sup>		1.2	0.60,0.35 <sup>11</sup>	2
Moras (arbusto)	0.3	1.05	0.5	1.5

Tabla 1. Coeficiente de desarrollo parcial de los cultivos de estudio



## 3.4 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES (EMC)

La disponibilidad de información meteorológica confiable y representativa de una zona contribuye a una buena planificación en urbanismo, ingeniería o en ordenación del territorio, también es utilizada para análisis del tiempo, pronóstico, advertencias de clima extremo, en operaciones locales que dependen del clima (operaciones en aeropuerto o vuelo, trabajos de construcción sobre tierra y mar).

En la agricultura es importante para la estimación de la evapotranspiración de referencia, así como para estimar el consumo hídrico.

Para el registro de las variables o elementos climatológicos se emplean las estaciones meteorológicas cuyos datos esenciales a medir son: temperatura, humedad del aire, viento, radiación solar, precipitación y evaporación, resulta necesario determinar el valor de la información recogida en relación con su utilidad y finalidad de la misma para lo que los instrumentos de medida deben estar homologados, ser robustos y estar bien calibrados (Romo y Arteaga, 1989; WMO, 1993; Elías y Castellví, 2001; Texeira et al., 2003; WMO, 2008; Funari et al., 2010).

La *meteorología* es la ciencia que estudia las propiedades físicas de la atmósfera en periodos cronológicamente cortos, donde se comprende el estudio del tiempo atmosférico. (SMN, 2021).

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. El Servicio Meteorológico Nacional, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los objetivos del SMN se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y sobre todo originar la pérdida de vidas humanas. El SMN también realiza el acopio de la información climatológica nacional.

Sus funciones principales son:

1. Mantener informado al Sistema Nacional de Protección Civil de las condiciones meteorológicas que puedan afectar a la población y a sus actividades económicas.
2. Difundir al público boletines y avisos de las condiciones del tiempo, especialmente durante la época de ciclones, que abarca de mayo a noviembre.
3. Proporcionar al público información meteorológica y climatológica.
4. Realizar estudios climatológicos o meteorológicos.



5. Concentrar, revisar, depurar y ordenar la información, generando el Banco Nacional de Datos Climatológicos, para consulta del público.

Para llevar a cabo sus objetivos el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con una red con la siguiente infraestructura de observación:

- Red sinóptica de superficie, integrada por 79 observatorios meteorológicos, cuyas funciones son las de observación y transmisión en tiempo real de la información de las condiciones atmosféricas.
- Red sinóptica de altura. Consta de 16 estaciones de radio sondeo, cuya función es la observación de las capas altas de la atmósfera. Cada estación realiza mediciones de presión, temperatura, humedad y viento mediante una sonda que se eleva por medio de un globo dos veces al día.
- Red de 13 radares meteorológicos distribuidos en el Territorio Nacional. Esta red comenzó a funcionar en 1993 y proporciona información continua que se recibe en el Servicio Meteorológico Nacional, vía satélite. Los radares permiten detectar la evolución de los sistemas nubosos. Con ello puede conocerse la intensidad de la precipitación (lluvia, granizo o nieve), la altura y densidad de las nubes y su desplazamiento, así como la velocidad y dirección del viento, en un radio máximo de 480 Km alrededor de cada radar. Con la actual red de doce radares se cubre casi en su totalidad el Territorio Nacional.
- Estación terrena receptora de imágenes del satélite meteorológico GOES-8; Con esta estación se reciben imágenes cada 30 minutos de cinco diferentes bandas: una visible, tres infrarrojas y una de vapor de agua. Cada imagen cubre la región meteorológica número IV, la cual abarca México, Canadá, Estados Unidos, el Caribe y Centro América. Además, cada tres horas se recibe una imagen visible, otra infrarroja y una de vapor de agua que cubren el total del continente americano.

Existen tres tipos de estaciones meteorológicas empleadas por el Servicio Meteorológico Nacional de México las cuales se basan en los tipos de observación utilizadas. Las observaciones de las que parten el tipo de estaciones meteorológicas usadas por el SMN se enuncian a continuación:

#### **Observación meteorológica:**

Es la medición cuantitativa de una o más variables meteorológicas, se remiten inmediatamente a un centro recolector de datos, mediante mensajes codificados, por la vía de comunicación más rápida disponible.



## **Observación sinóptica:**

Es el conjunto de medidas de diferentes variables meteorológicas que se realizan a nivel de superficie a determinadas horas, y cuyos fines son contribuir a la elaboración de la predicción meteorológica de la zona y la climatología del lugar donde se realizan. De lo anterior, las estaciones meteorológicas empleadas por el SMN son las siguientes:

### **3.4.1 Estaciones sinópticas convencionales de superficie**

Equipadas con instrumentos que requieren de un operador para medir, registrar y transmitir las observaciones meteorológicas de superficie para generar un reporte sinóptico cada 3 horas los 365 días del año transmitiendo los datos mediante mensajes codificados por la vía de comunicación más rápida disponible al Servicio Meteorológico Nacional que le corresponda. Generalmente se les conoce como observatorios meteorológicos.

Las observaciones que deben cuantificarse son las siguientes:

- a) Mediciones sensoriales:
  - Tiempo presente;
  - Tiempo pasado;
  - Nubosidad;
  - Tipo de nube;
  - Altura de la base de la nube;
  - Visibilidad; y
  - Dirección del movimiento de las nubes
  
- b) Mediciones Instrumentales:
  - Dirección y rapidez del viento;
  - Temperatura;
  - Humedad relativa;
  - Presión atmosférica;
  - Precipitación;
  - Capa de nieve;
  - Insolación;
  - Radiación solar; y
  - Temperatura del suelo



En congruencia a las mediciones que se efectúan en las estaciones sinópticas convencionales de superficie, los instrumentos de medición con los que cuentan son: pluviómetro, regla graduada para medición de capa de nieve, termómetro de ambiente, termómetro de máxima, termómetro de mínima, higrotermómetro digital, geotermómetro, evaporímetro (conocido internacionalmente como tanque clase A), anemógrafo o anemómetro digitales, barómetro, sensores de tipo termo-eléctrico, piranómetro, pirheliómetro, radiómetros y detector de rayos.

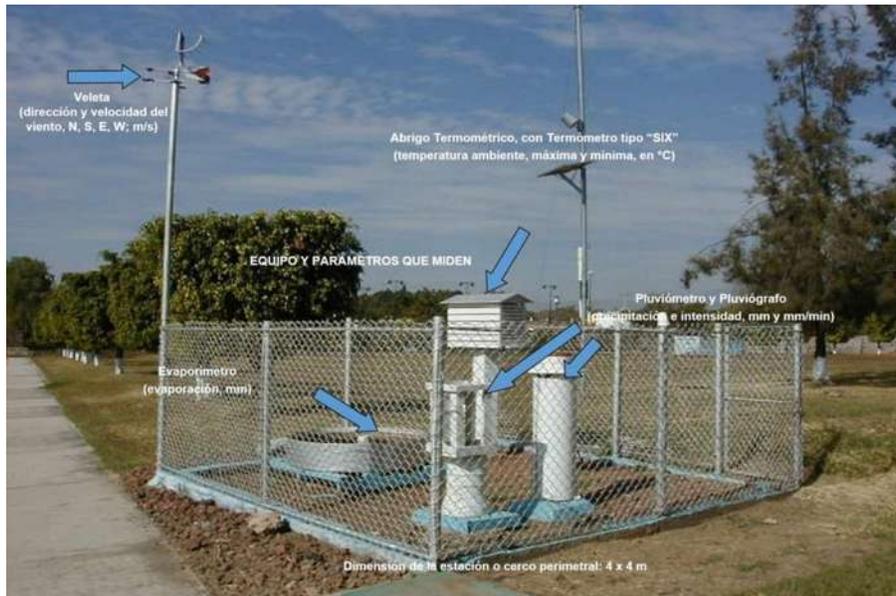
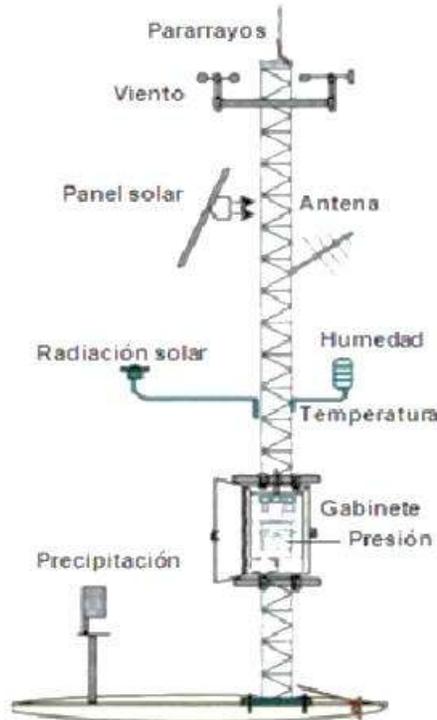


Ilustración 13 Estación Meteorológica Convencional (CONAGUA, 2016)

### 3.4.2 Estación meteorológica automática (EMA)

Es un conjunto de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas en forma numérica, está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática y autónoma. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos, esta información es enviada por algún medio de transmisión a intervalos regulares.



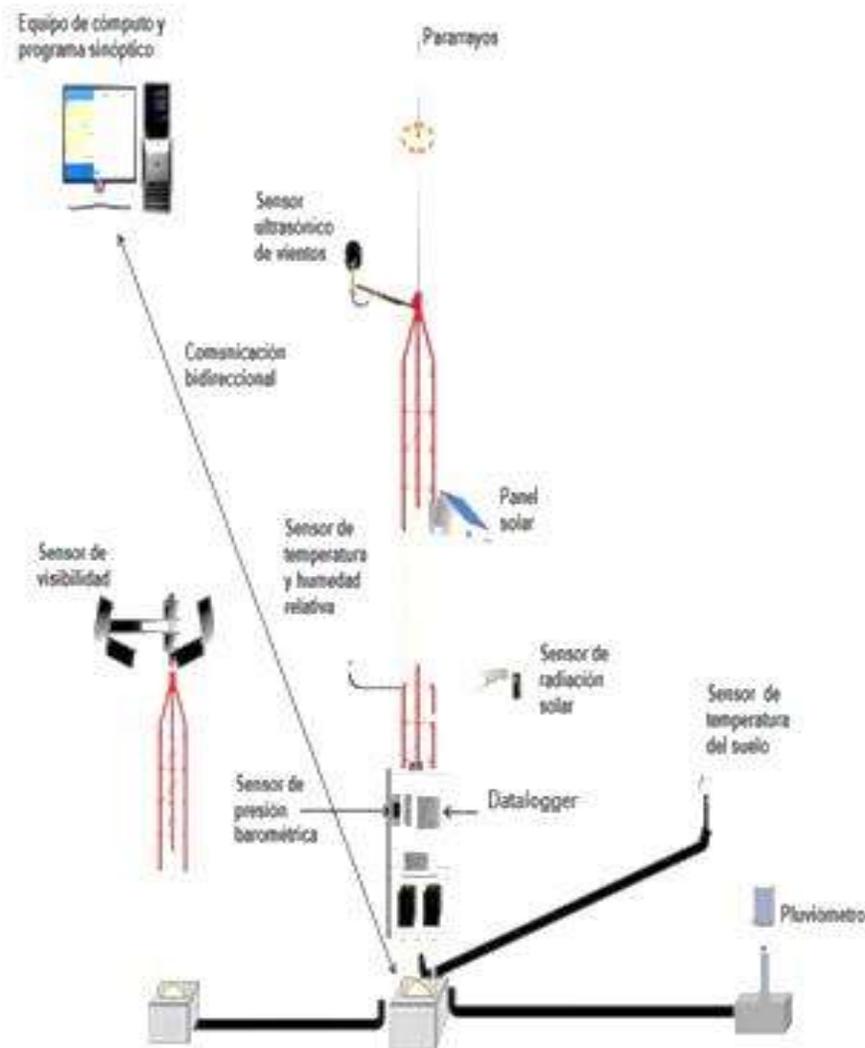
*Ilustración 14* Estación meteorológica automatizada. (NMX-AA-166/1-SCFI-2013)

### 3.4.3 Estación sinóptica meteorológica (ESIME):

Es un conjunto de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática y autónoma. Generan una base de datos y un mensaje sinóptico cada tres horas y se encuentran ubicadas exclusivamente en los observatorios meteorológicos.

Los mensajes sinópticos son reportes que se generan simultáneamente en todos los observatorios cada tres horas y presentan información meteorológica de tiempo presente y pasado de manera codificada. A diferencia de las Estaciones Meteorológicas Automatizadas que solamente registran y envían los datos, las Estaciones Meteorológicas Sinópticas procesan, transmiten y almacenan en una base de datos las variables, y otras son calculadas con un software especializado.

Las ESIME's transfieren datos a un servidor de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, cada diez minutos y cada tres horas es codificada la información en mensajes sinópticos.



**Ilustración 15** Estación sinóptica meteorológica. (NMX-AA-166/1-SCFI-2013)

Para las EMA'S Y ESIME'S los elementos que las componen son los siguientes:

- Sistema de adquisición. Procesamiento y almacenamiento de datos (SAPAD)
- Interfaz que muestra datos o información al usuario (Monitor) (EMAs).
- Transmisor de alta velocidad.
- Sensor de temperatura ambiente.
- Sensor de humedad relativa.
- Sensor de humedad del suelo.
- Sensor de temperatura del suelo
- Sensor de presión atmosférica.



- Sensor de precipitación
- Sensor de velocidad y dirección del viento.
- Sensor de radiación solar.
- En casos necesarios, se añaden sensores para aplicaciones específicas
- Software especializado para la administración y el manejo de datos de las EMA'S.
- Sistema de alimentación autónomo; dispositivo regulador, panel solar y batería.
- Gabinete General.
- Torre de 10 metros.
- Sistemas de protección primaria y secundaria, contra sobre voltajes por descargas eléctricas.

Con relación a las ESIME' S agrega lo siguiente:

- Sensor de temperatura mínima a la intemperie (a 10 cm sobre el suelo).
- Sensor de temperatura del suelo.
- Cable de comunicación de 60 m de longitud.
- Equipo para recepción, almacenamiento, procesamiento y envío de datos.
- Software especial para el manejo de datos, captura y envío de datos.
- Sensor de visibilidad.

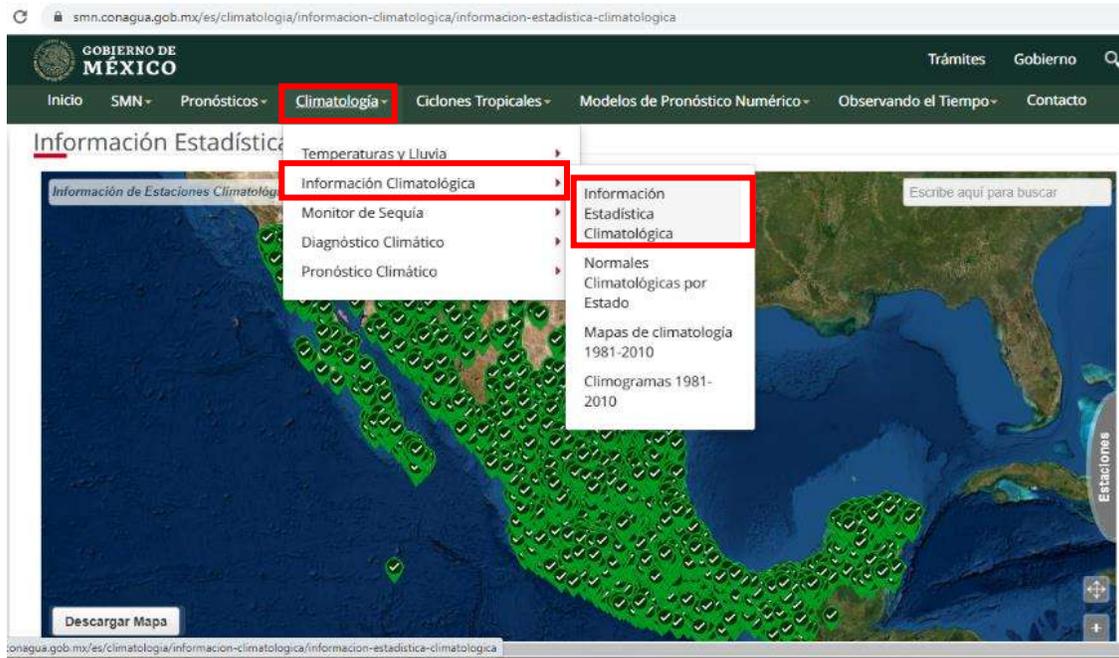
Debido a que en la definición de la ETP es necesaria la utilización de información climatológica (precipitación, temperatura, radiación solar, humedad y movimiento del viento) es necesario identificar las EMC cercanas a los sitios de estudio.

Para ello la información que se muestra concentrada en la **Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6** fue consultada y obtenida de la página web del Sistema Meteorológico Nacional de México.



*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

María Isabel Maldonado Mercado



**Ilustración 16** Ruta de consulta de estaciones meteorológicas en el SMN.

Para los sitios de estudio se presentan las estaciones meteorológicas convencionales cercanas a cada municipio, su clave, coordenadas y su distancia al centroide del municipio en cuestión.



**MUNICIPIO: TANCÍTARO**

ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS				DISTANCIA A Km
		UTM		GEOGRAFICAS		
Los Chorros del Varal	16072	754982.90 m E	2160173.20 m N	19°31'11.99"N	102°34'13.03"O	31.46
Tancítaro	16266	777090.63 m E	2139576.82 m N	19°19'52.00"N	102°21'46.00"O	1.66
Acahuato	16228	780435.11 m E	2129135.58 m N	19°14'10.98"N	102°19'57.00"O	20.37
Uruapan (CFE)	16165	809650.32 m E	2147181.34 m N	19°23'41.99"N	102° 03'7.01"O	31.83
Piedras Blancas (CFE)	16090	734581.19 m E	2129627.44 m N	19°14'48.00"N	102°46'6.00"O	45.32

Tabla 2. Estaciones meteorológicas para el municipio de Tancítaro

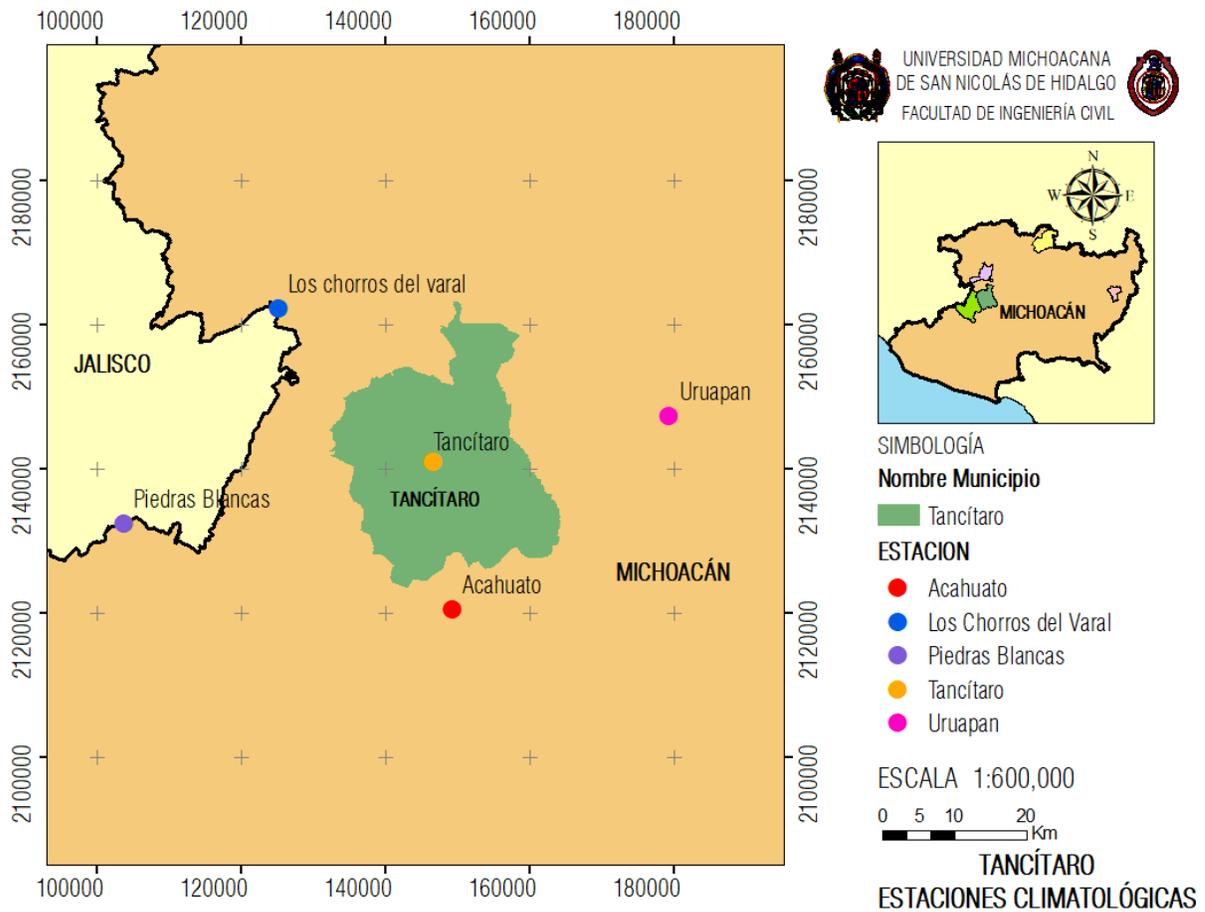


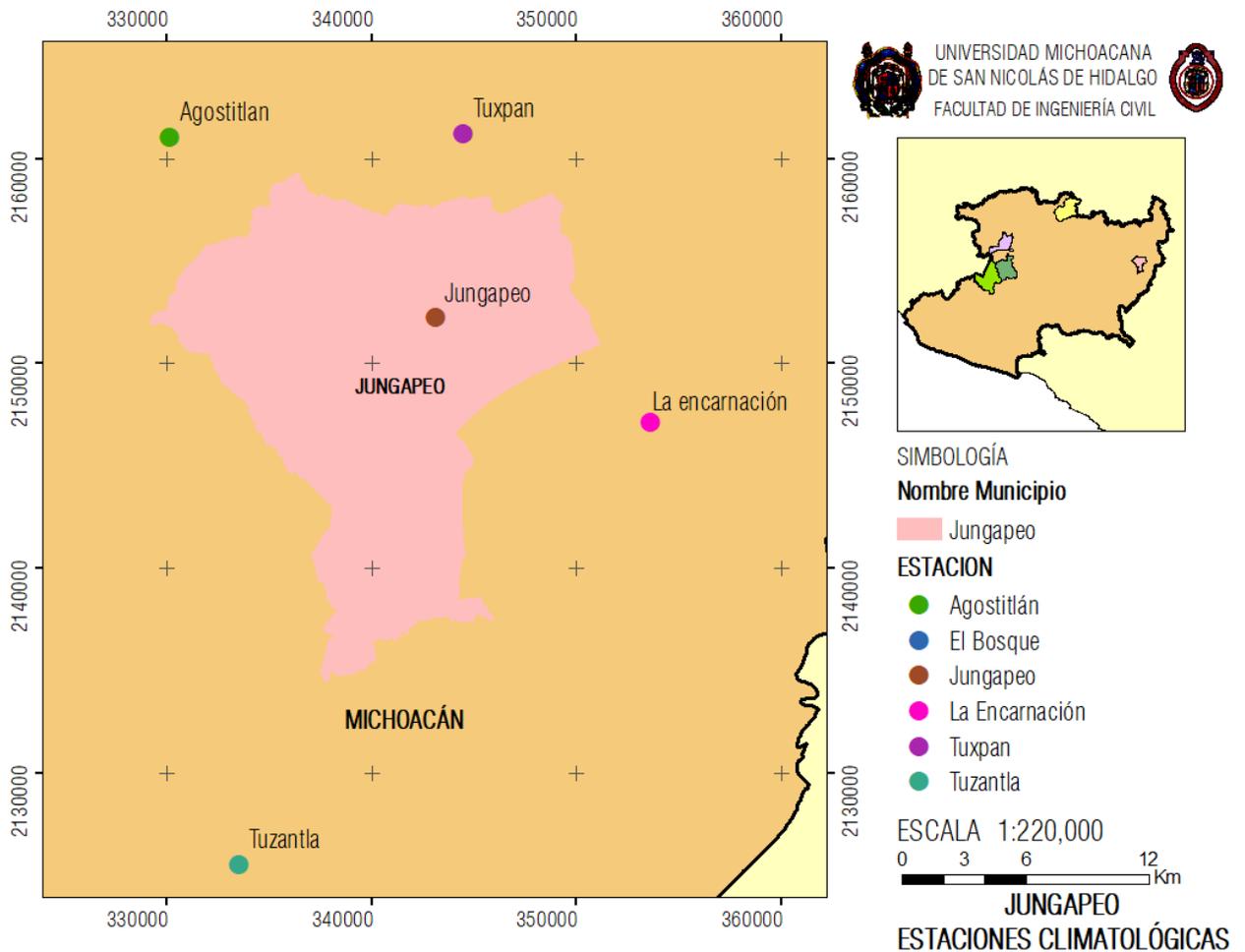
Ilustración 17 Localización de las EMC en el municipio de Tancítaro.



**MUNICIPIO: JUNGAPEO**

ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS				DISTANCIA Km
		UTM		GEOGRAFICAS		
Agostitlán	16002	330206.76 m E	2161042.91 m N	19°32'12.97"N	100°37'6.02"O	15.52
Presa Tuxpan (CFE)	16099	345133.85 m E	2161215.58 m N	19°32'23.00"N	100°28'56.02"O	12.42
Jungapeo	16058	343160.73 m E	2152223.60 m N	19°27'30.00"N	100°29'39.00"O	3.82
La encarnación	16192	353647.55 m E	2147093.23 m N	19°24'45.99"N	100°23'38.02"O	13.33
Tuzantla (SMN)	16135	333554.54 m E	2125558.56 m N	19°12'59.98"N	100°35'0.02"O	24.89

**Tabla 3** Estaciones meteorológicas para el municipio de Jungapeo.



**Ilustración 18** Localización de las EMC en el municipio de Jungapeo.



**MUNICIPIO: BUENAVISTA**

ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS				DISTANCIA Km
		UTM		GEOGRAFICAS		
Piedras Blancas (CFE)	16090	734581.19 m E	2129627.44 m N	19°14'48.00"N	102°46'6.00"O	20.00
Presa Los Olivos	16264	736575.08 m E	2124547.00 m N	19°12'02.00"N	102°45'0.00"O	26.69
El Cajón	16158	736901.84 m E	2099112.90 m N	18°58'14.97"N	102°45'0.03"O	31.20
Acahuato	16228	780585.40 m E	2119322.96 m N	19° 08.867'N	102° 19.950'O	27.19
Los Chorros del Varal (CFE)	16072	754982.90 m E	2160173.20 m N	19°31'11.99"N	102°34'13.03"O	35.07

Tabla 4 Estaciones meteorológicas para el municipio de Buenavista.

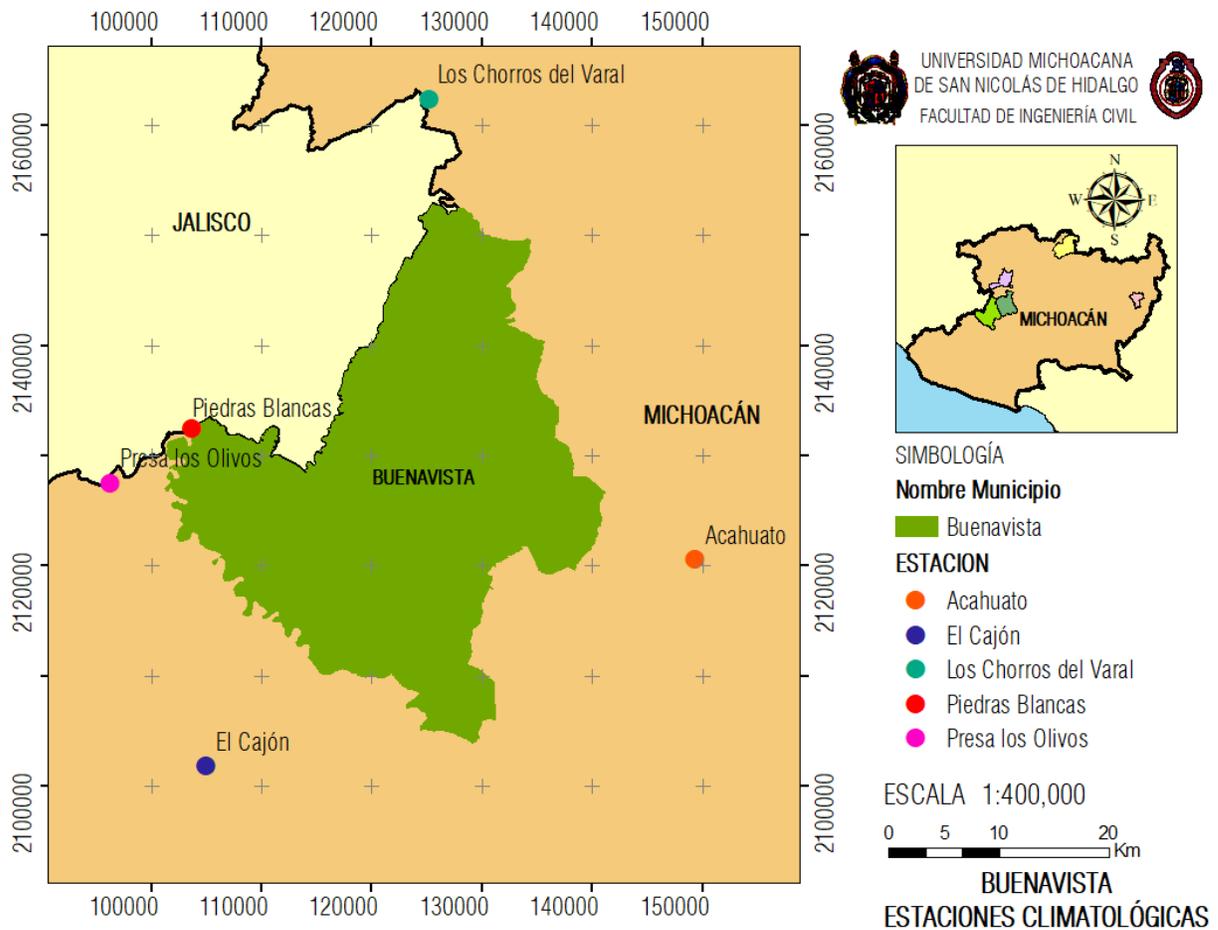


Ilustración 19 Localización de las EMC en el municipio de Buenavista.



MUNICIPIO: LOS REYES

ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS				DISTANCIA
		UTM		GEOGRAFICAS		Km
PATAMBAN	16251	784030.64 m E	2191903.94 m N	19°48'9.00"N	102°17'20.00"O	20.01
CHARAPAN	16032	793536.42 m E	2180703.02 m N	19°41'60.00"N	102°12'0.00"O	21.19
E.T.A. 039 TOCUMBO	16194	759939.77 m E	2180396.21 m N	19°42'7.00"N	102°31'13.00"O	14.17
LOS LIMONES (CFE)	16073	759285.28 m E	2169279.96 m N	19°36'6.00"N	102°31'41.00"O	15.02
LOS REYES	16077	764008.50 m E	2167318.34 m N	19°34'60.00"N	102°28'60.00"O	12.02
PERIBAN	16088	771284.81 m E	2160534.78 m N	19°31'16.00"N	102°24'54.00"O	14.75

Tabla 5. Estaciones meteorológicas para el municipio de Los Reyes.

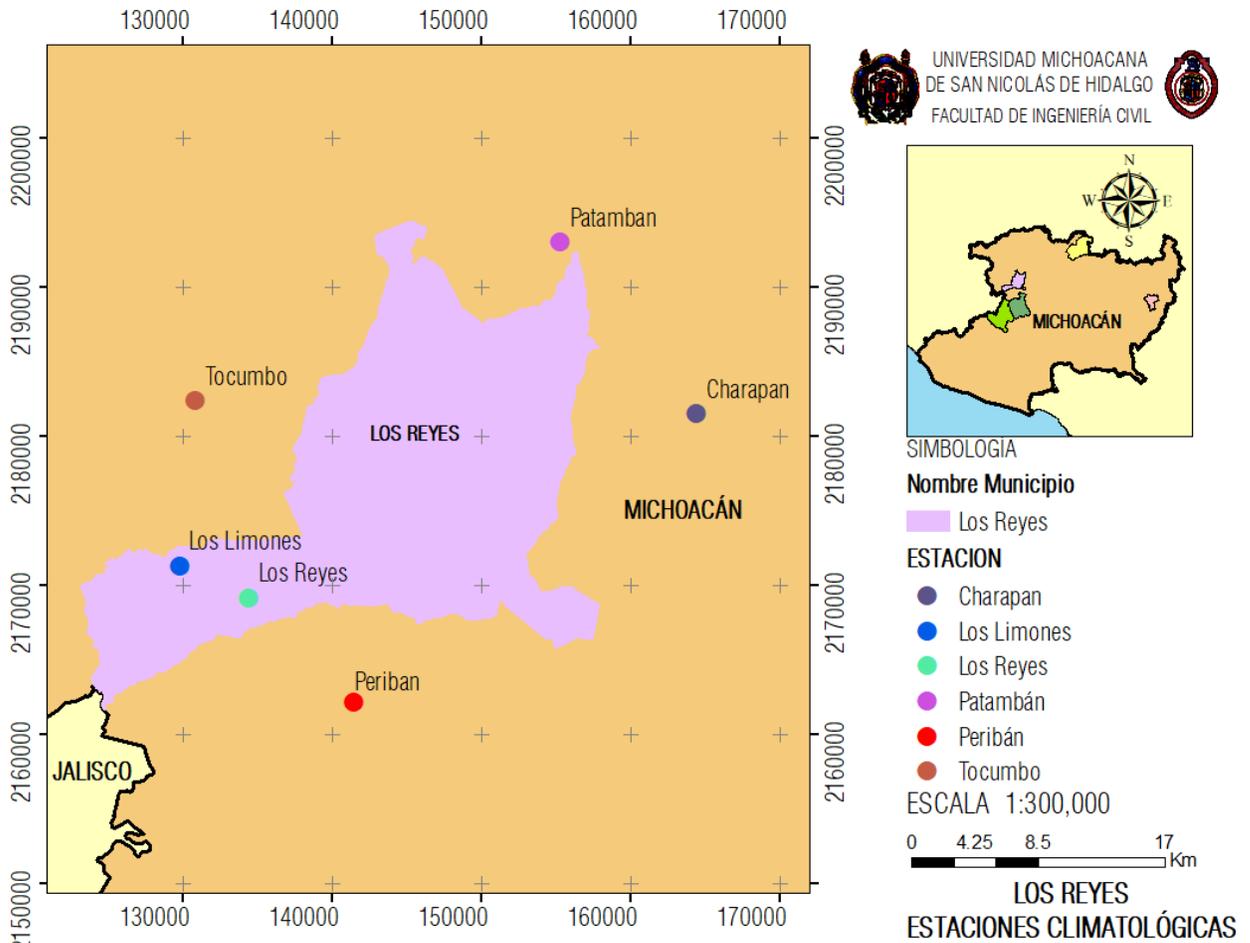


Ilustración 20 Localización de las EMC en el municipio de Los Reyes.



MUNICIPIO: PURUÁNDIRO

ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS				DISTANCIA Km
		UTM		GEOGRAFICAS		
Casa Blanca	16017	243220.94 m E	2248746.00 m N	20° 19' 10.00" N	101° 27' 33.00" O	23.70
Las Jicamas	11146	253627.29 m E	2243763.68 m N	20° 16' 33.00" N	101° 21' 32.00" O	25.06
Cerano	11010	249487.61 m E	2224471.10 m N	20° 6' 4.00" N	101° 23' 45.00" O	13.94
Puruándiro	16104	236912.33 m E	2223210.39 m N	20° 5' 17.00" N	101° 30' 57.00" O	3.31
Galeana	16234	230637.89 m E	2217859.82 m N	20° 2' 20.00" N	101° 34' 30.00" O	9.81
El Rosario	16159	212601.38 m E	2228087.30 m N	20° 7' 43.00" N	101° 44' 56.00" O	23.14

Tabla 6. Estaciones meteorológicas para el municipio de Puruándiro.

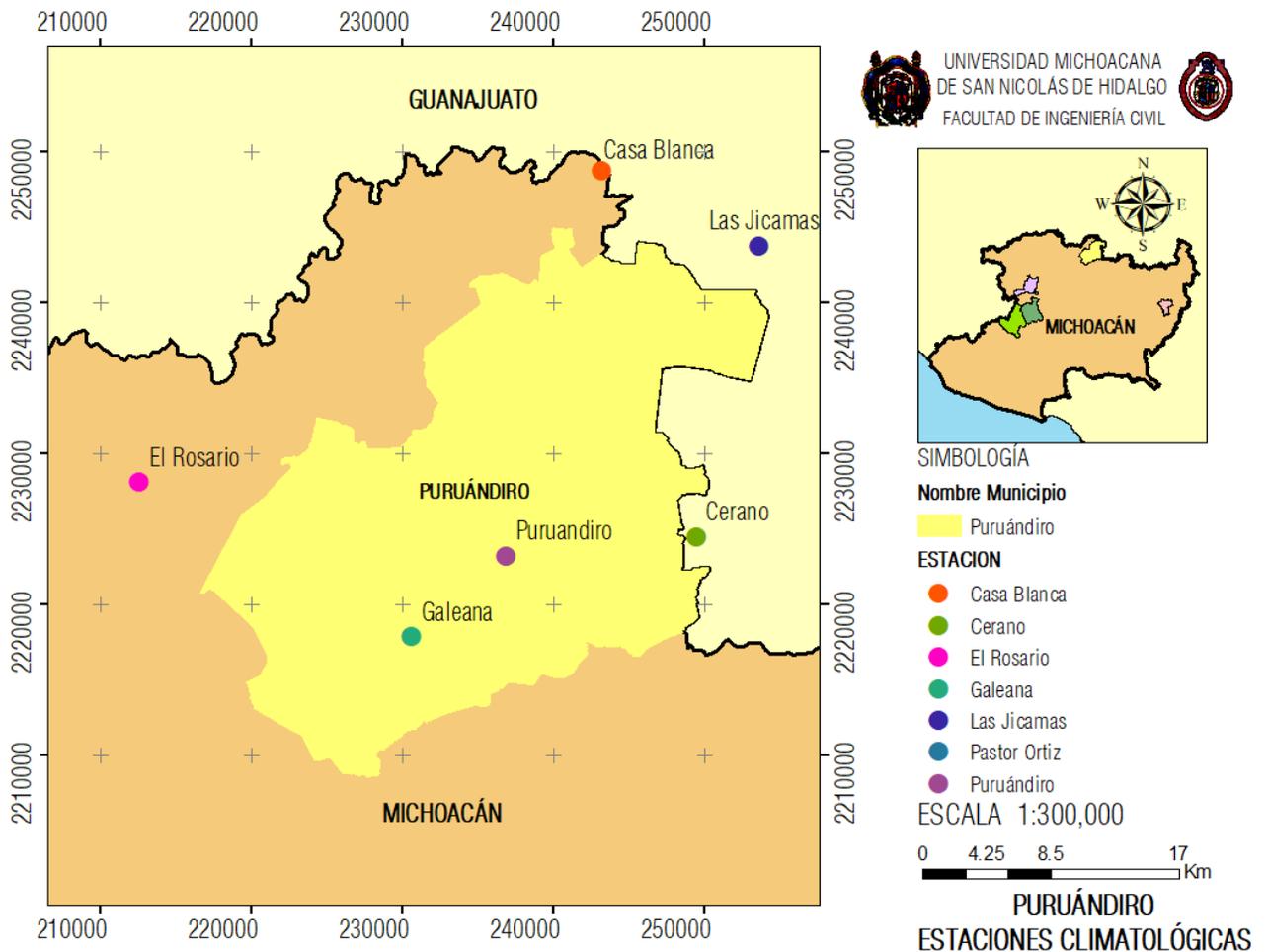


Ilustración 21 Localización de las EMC en el municipio de Puruándiro.



### 3.4.4 Análisis de los datos de precipitación

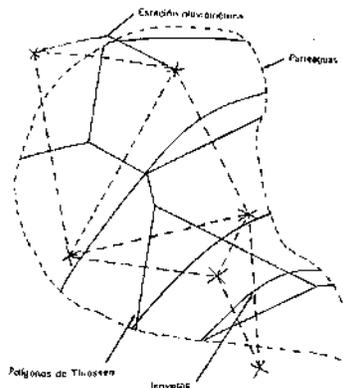
#### Lluvia media

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sean sitios cercanos. Uno de los métodos empleados para calcular la lluvia media de una tormenta dada es el de los *polígonos de Thiessen*.

#### Polígonos de Thiessen

Este método consiste en lo siguiente:

1. Unir mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí (líneas discontinuas en la ilustración XX). Con ellos se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones meteorológicas.
2. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos (líneas rectas continuas en la figura XX). Por geometría elemental, las líneas correspondientes convergerán en un solo punto.
3. Cada estación meteorológica quedará rodeada por líneas rectas del paso 2, que forman los llamados polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.
4. La lluvia media se calcula entonces como un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente.

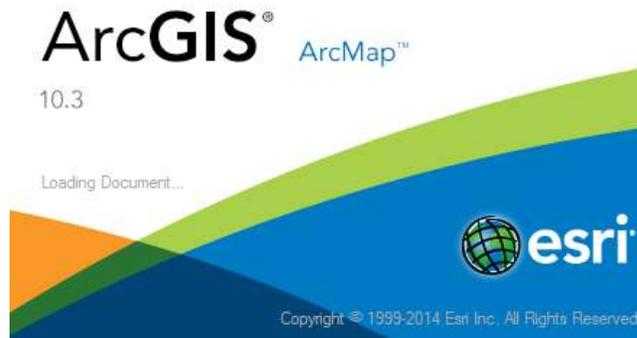


**Ilustración 22** Polígonos de Thiessen.



Para efectos de la investigación, únicamente se empleará la información del área de influencia de cada estación para los municipios de estudio.

Existen programas especializados (software) que permiten recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica, uno de ellos es el denominado ArcGIS. Con este programa, una vez localizadas las estaciones cercanas a la cuenca en estudio, se generarán los polígonos de Thiessen para el análisis de datos de precipitación.



**Ilustración 23** Software para análisis de información geográfica, ArcGIS.

### 3.5 INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Una vez localizadas las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio se identificaron las estaciones que tienen influencia significativa en la zona de análisis. Hecho ésto se procedió a obtener la información climatológica de dichas estaciones.

La información requerida se descarga del sitio web oficial del SMN, en el apartado de *Climatología, Información Estadística Climatológica*. Donde se cargará un mapa de la República Mexicana que contiene todas las estaciones meteorológicas registradas en el territorio mexicano.

Para acceder a los datos de climatología se procede a buscar la estación de interés, una vez localizada la estación se selecciona y se elige la información adecuada a la búsqueda, para este caso la *Estadística*, con dicha acción se descargará un archivo que contiene información estadística climatológica, dentro de ésta los datos de precipitación y temperatura máxima para todos los años de registro con que cuente la estación; indispensables para el cálculo de la evapotranspiración.



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

María Isabel Maldonado Mercado

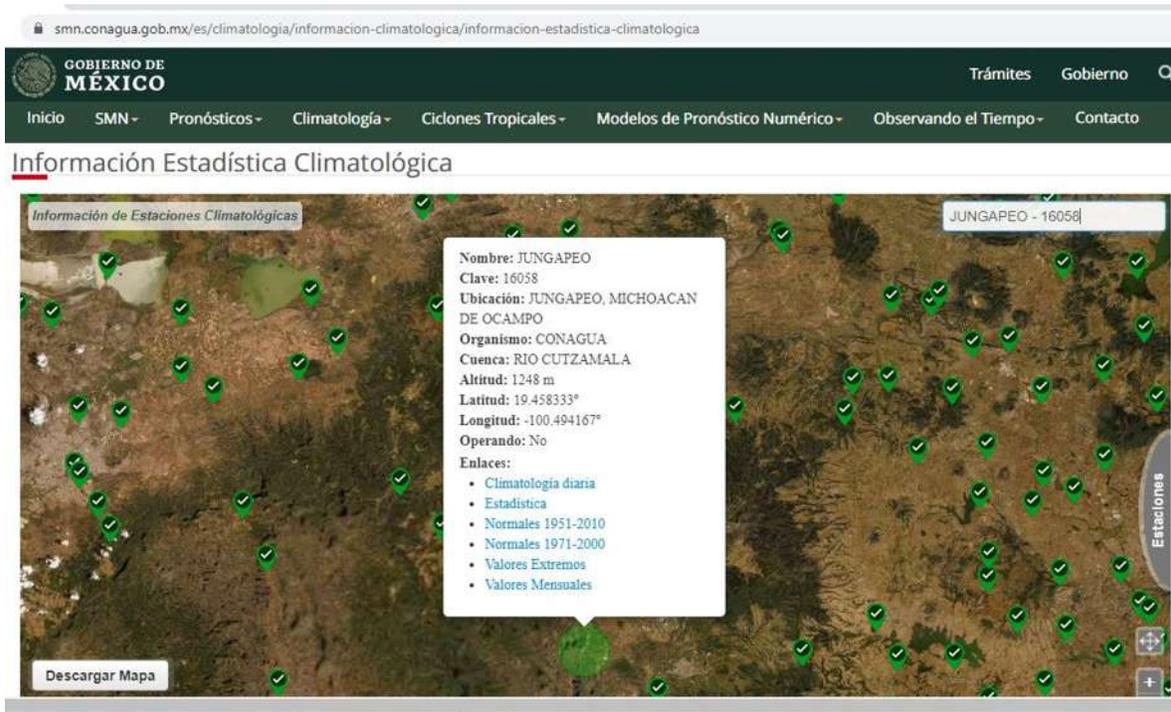


Ilustración 24 Ruta de consulta de Información Estadística Meteorológica para estación de estudio en el SMN.

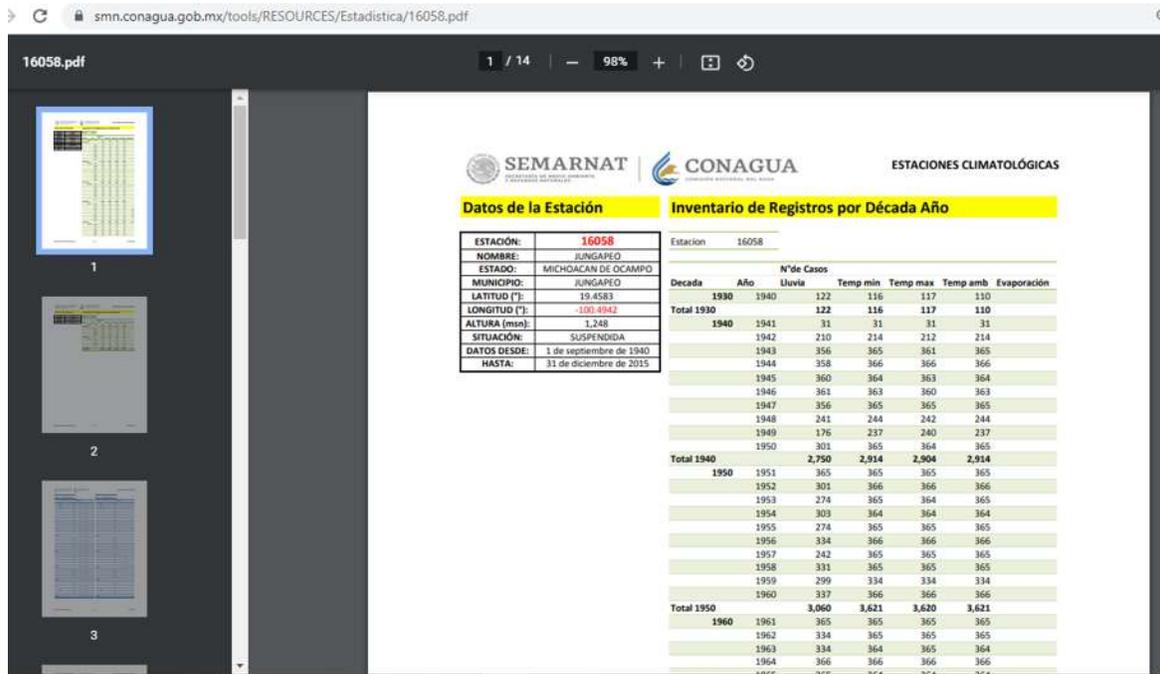


Ilustración 25 Archivo descargable de Estadística para la estación de estudio en el SMN.



## 3.6 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

### 3.6.1 Evaporación del agua

La evaporación del agua es un proceso físico frecuente en la naturaleza, por lo que, sus efectos son conocidos. Por la evaporación el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso o de vapor. El agua que se evapora pasa a la atmósfera circundante si existen las condiciones apropiadas para que el fenómeno pueda efectuarse.

La evaporación se incrementa cuando lo hace la radiación solar que alcanza la superficie de un cuerpo de agua o suelo húmedo, la temperatura del ambiente, la velocidad del viento y la superficie evaporante, y por el contrario disminuye al incrementarse la humedad de la atmósfera.

Para que la evaporación pueda realizarse las moléculas de agua necesitan de la energía necesaria para vencer la tensión superficial del líquido que las contiene. Esta energía la suministra la radiación solar, bien como radiación directa o como calor del ambiente, en el caso de la evaporación del agua de los suelos y las plantas.

Por tanto, la temperatura del aire es un factor importante en el proceso de evaporación, de forma que, se produce más rápidamente a temperaturas del aire elevadas.

### 3.6.2 Transpiración

Es el proceso por el cual el agua se evapora desde los tejidos internos de las hojas de las plantas a la atmósfera. Lo anterior una vez que el agua ha pasado, junto con ciertos nutrientes, desde el suelo a las raíces de las plantas y de ellas a través de los tallos a la atmósfera.

Por tanto, se trata de un proceso similar al de la evaporación. Una gran parte del agua que absorbe la planta se “pierde”, sobre todo en las hojas, por evaporación a través de unos pequeños orificios denominados estomas, que facilitan la comunicación del interior de la planta con el ambiente exterior, lo que garantiza el intercambio de gases como el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), etc.



Estos pequeños orificios se cierran y abren dependiendo de numerosos factores como la luz, el estado hídrico de la planta, el contenido interno de anhídrido carbónico de la planta, etc. Las características y el número de estomas por unidad de superficie foliar, así como la superficie foliar expuesta al sol, la forma y el tipo de hoja y la superficie foliar total de la planta, tienen una gran influencia en la cantidad de transpiración y pérdida de agua por la planta, ya que el agua transpirada por la planta es la cantidad más importante del agua absorbida del suelo.

De esta agua que circula por la planta, únicamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos formadores de la propia planta. Todas estas particularidades, dependen del tipo de planta y determinan, junto con otras cualidades de defensa ante la pérdida de agua y prácticas agronómicas de manejo, su capacidad de adaptación al medio donde se encuentran.

La valoración del proceso de transpiración no solamente depende de la capacidad evaporativa de la atmósfera sino también del tipo de cultivo, estado de desarrollo vegetativo, vigor, manejo del cultivo y microclima creado dentro de la cubierta vegetal.

En la evaluación de la transpiración de las plantas cultivadas también influyen todos los factores que pueden ser limitantes del crecimiento de la cubierta vegetal de las plantas, como pueden ser las temperaturas extremas, tanto máximas como mínimas, para cada tipo de plantas, el contenido de agua del suelo, la falta de aireación de los suelos y por tanto falta de un buen desarrollo radicular, la disponibilidad de nutrientes (sobre todo el nitrógeno) para el crecimiento y desarrollo, la profundidad y la capacidad del suelo de aportar agua a las raíces, así como la salinidad de los suelos y del agua de riego. (Bruna Lavilla, Ortega Salinas, 2021)

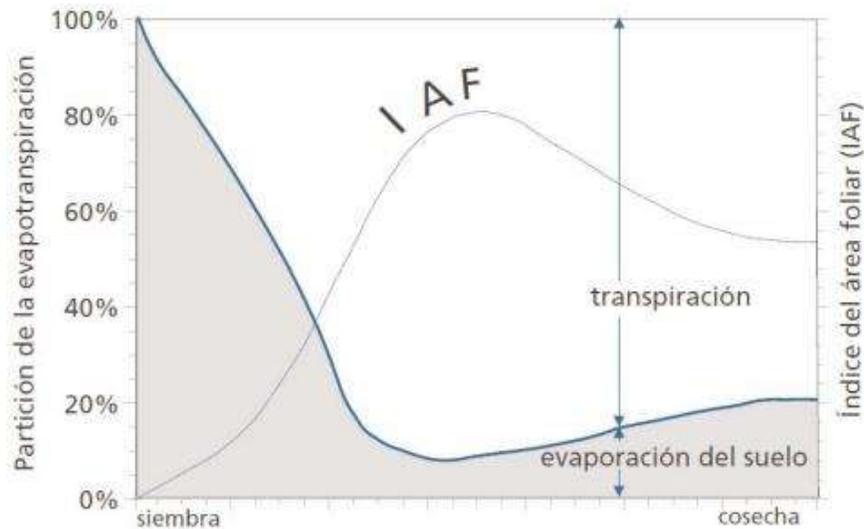
### **3.6.3 Evapotranspiración de los cultivos**

El concepto de evapotranspiración nace como consecuencia de la dificultad de separar e identificar la evaporación del suelo y la transpiración de los cultivos de una superficie amplia y uniforme. En las primeras fases de desarrollo de un cultivo después de la siembra, como consecuencia de la falta de cubierta y sombreado del suelo por las plantas y si existe humedad en la superficie del suelo, las pérdidas de agua se producen principalmente como consecuencia de la evaporación.

Del mismo modo es razonable pensar que la evaporación del agua del suelo en un cultivo herbáceo, después de un riego de superficie o aspersión antes de que el cultivo cubra la tierra, es mucho mayor que en el caso de un riego por goteo de un cultivo leñoso, donde la zona húmeda creada por el goteo está a la sombra de la cubierta de los árboles. Pero si el desarrollo del cultivo es elevado y cubre la superficie del suelo casi en su totalidad, la captación de energía solar por las plantas estará cerca del máximo y, por lo tanto, la evaporación del suelo irá disminuyendo conforme se incrementa la transpiración.



En la **Ilustración 26**, presentada en el estudio de la FAO de riegos y drenajes N° 56 en la publicación "Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", se muestra cómo se divide la evapotranspiración en sus dos componentes (evaporación y transpiración) dependiendo del desarrollo de la cubierta vegetal expresada como índice de área foliar del cultivo.



**Ilustración 26** Representación de la evaporación y la transpiración de un ciclo vegetativo para un cultivo herbáceo. (FAO Manual 56, 2014)

Por otra parte, las unidades en que se expresa normalmente la evapotranspiración de los cultivos son los milímetros (mm) equivalente a litros por metro cuadrado ( $l/m^2$ ) por unidad de tiempo expresada en horas, días, mes, año o campaña.

Otra forma de expresar la evapotranspiración es en  $m^3/ha$  y tiempo. Para ello tendremos en cuenta que, si una hectárea tiene  $10,000 m^2$  y 1 milímetro equivale a 0.001 m, si se produce una evapotranspiración de 1 milímetro en un día significa que se ha perdido por evapotranspiración  $10 m^3/ha/día$ , equivalente a  $10,000 l-ha/día$ . (Bruna Lavilla, Ortega Salinas, 2021)

### 3.6.4 Método de Blaney-Criddle

En México se usan fundamentalmente dos métodos para el cálculo del uso consuntivo: el de Thorntwaite y el de Blaney-Criddle. El primero por tomar en cuenta solo la temperatura media mensual arroja resultados estimativos que pueden usarse únicamente en estudios preliminares o de gran visión mientras que el segundo es aplicable a métodos más específicos. (Aparicio Mijares, 2010).



Para efecto de desarrollo de la presente investigación se empleará el método de Blaney-Criddle. Este método toma en cuenta, además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona.

El ciclo vegetativo de un cultivo es el tiempo que transcurre entre la siembra y la cosecha y varía de un cultivo a otro. Si se desea estimar la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo, se puede emplear la fórmula:

$$E_t = K_g F$$

**Ecuación 1** Cálculo de la Evapotranspiración

Dónde:

$E_t$  = Evapotranspiración durante el ciclo vegetativo, cm.

$K_g$  = Coeficiente global de desarrollo, adim.

$F$  = Factor de temperatura y luminosidad, cm.

El factor de luminosidad se calcula como:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i$$

**Ecuación 2** Cálculo del Factor de Luminosidad

Dónde:

$n$  = Número de meses que dura el ciclo vegetativo.

$$f_i = P_i \left( \frac{T_i + 17.8}{21.8} \right)$$

**Ecuación 3** Cálculo de  $f_i$

$P_i$  = Porcentaje de horas de sol del mes  $i$  con respecto al año. (**Tabla 7**)

$T_i$  = Temperatura media del mes  $i$  en °C.



Cuando la zona en cuestión es árida, los valores de  $f_i$  se multiplican por un factor de corrección  $K_{ti}$  que se calcula como:

$$K_{ti} = 0.03114 T_i + 0.2396$$

**Ecuación 4** Factor de corrección  $K_{ti}$  para zonas áridas

Para determinar valores de la evapotranspiración en periodos más cortos que un ciclo vegetativo, por ejemplo, de un mes, se usa la fórmula:

$$E_{ti} = K_{ci} f_i$$

**Ecuación 5** Cálculo de evapotranspiración para periodos menores a un ciclo vegetativo

LATITUD NORTE (°)	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.20	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.46	9.07	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	9.16	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
21	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.40	8.56	9.22	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.42
26	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.31
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
31	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32	7.20	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
33	7.15	6.94	8.36	8.78	9.68	9.65	9.82	9.31	8.35	7.94	7.07	6.98
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.77	9.76	9.94	9.37	8.37	7.88	6.97	6.85
36	6.99	6.85	8.35	8.85	9.82	9.82	9.99	9.40	8.37	7.85	6.92	6.79
38	6.87	6.79	8.34	8.90	9.92	9.95	10.10	9.47	8.38	7.80	6.82	6.66
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
42	6.63	6.65	8.31	9.00	10.14	10.22	10.35	9.62	8.40	7.69	6.62	6.37
44	6.49	6.58	8.30	9.06	10.26	10.38	10.49	9.70	8.41	7.63	6.49	6.21
46	6.34	6.50	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
48	6.17	6.41	8.27	9.18	10.53	10.71	10.80	9.89	8.44	7.51	6.23	5.86
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.90	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
52	5.77	6.19	8.21	9.29	10.85	11.13	11.20	10.12	8.49	7.39	5.93	5.43
54	5.55	6.08	8.18	9.36	11.03	11.38	11.43	10.26	8.51	7.30	5.74	5.18
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.52	7.21	5.54	4.89
58	5.01	5.81	8.12	9.55	11.46	12.00	11.98	10.55	8.51	7.10	4.31	4.56
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.51	6.98	5.04	4.22

Tabla 7. Porcentaje de horas de sol del mes i con respecto al año. (Pérez Morales et al., 2018)



### 3.6.5 Uso Consuntivo

Es la sumatoria de la evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración (aproximadamente el 1%), por lo que los términos de evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos. (Aparicio Mijares, 2010)

#### Determinación del coeficiente unitario de riego (C.U.R.)

De acuerdo a *Pérez Morales et.al*, una vez obtenida la ETP por cada cultivo y por cada mes se procede a calcular la altura de precipitación efectiva ( $I_{LL}$ ), al multiplicar la altura de lluvia mensual por los coeficientes de infiltración y el coeficiente de aprovechamiento en la zona radicular, matemáticamente:

$$I_{LL} = h_{LL} K_I K_R$$

**Ecuación 6** Cálculo de la altura de precipitación efectiva ( $I_{LL}$ ).

Dónde:

$I_{LL}$  = Altura de precipitación efectiva, mm.

$h_{LL}$  = Altura de lluvia media de cada mes, mm.

$K_I$  = Coeficiente de infiltración, adim.

$K_R$  = Coeficiente de aprovechamiento en la zona radicular, adim.

Al restar al valor de la ETP calculada el valor de la lámina de lluvia efectiva ( $I_{LL}$ ) se obtiene la lámina de riego neta ( $I_{RN}$ ) en milímetros, para cada cultivo y para cada mes, tomando en cuenta todos y cada uno de los cultivos existentes.

$$I_{RN} = ETP - h_{LL}$$

**Ecuación 7** Cálculo de la lámina de riego neta ( $I_{RN}$ ).

Se debe tener el cuidado, de que, en los meses donde no se cultivó todo el mes, es decir medio mes o fracción de mes de un cultivo en especial, restar solo la altura de lluvia efectiva multiplicada por dicha fracción (v. g. si solo se cultiva medio mes, la ETP debe ser multiplicada por el factor 0.5 y se debe restar la lámina de lluvia efectiva multiplicada por dicho factor).



Consignando al final del cálculo, de todas y cada una de las restas para cada cultivo, la suma de ellas para obtener la *lámina de riego neta total*, generalmente en unidades de milímetros, por lo que se debe considerar que la ETP calculada por el método de Blaney-Criddle está en centímetros, por lo que se necesita convertir a milímetros.

Posteriormente se calcula la *lámina de riego bruta* ( $I_{R\text{ bruta}}$ ), al dividir cada valor de la lámina de riego neta ( $I_{RN}$ ) entre el valor de cada uno de los porcentajes de *eficiencia en el manejo del agua* ( $\eta_M$ ) y el de *aplicación en el riego* ( $\eta_R$ ), que se tenga en el sistema de riego o, en el caso de un nuevo sistema de riego; considerar los porcentajes de eficiencia de un sistema de riego similar y cercano a la zona del proyecto.

$$I_{R\text{ bruta}} = \frac{I_{RN}}{\eta_R \eta_M}$$

**Ecuación 8** Cálculo de la lámina de riego bruta ( $I_{R\text{ bruta}}$ ).

Dónde:

- $I_{R\text{ bruta}}$  = Lámina de riego bruta, mm.
- $\eta_R$  = Porcentaje de eficiencia de aplicación en el riego, adim.
- $\eta_M$  = Porcentaje de eficiencia en el manejo del agua, adim.

Para terminar de calcular la *lámina de riego bruta total* se realiza la suma por cada mes de cada uno de los cultivos y se procede a determinar el mes de máxima demanda, es decir aquel mes de mayor valor de lámina de riego bruta, al cual se le denomina *mes crítico*.

Una vez definido el mes de máxima lámina de riego bruta o mes crítico, se recomienda hacer una tabla donde se consignen los diferentes cultivos del mes crítico, las láminas de riego brutas y las superficies cultivadas, ordenados de mayor a menor valor de lámina de riego bruta y, en los casos de tener dos o más cultivos el mismo valor de lámina, se pone primero el de mayor superficie cultivada.

Posteriormente se continúa con la tabla transformando la lámina de riego bruta mensual en diaria (tomando en cuenta el número de días que tiene el mes en cuestión) y conforme al área cultivada se procede a determinar el *volumen demandado diario*, anotando en otra columna los volúmenes acumulados y las áreas o superficies cultivadas acumuladas.



$$I_{R \text{ bruta diaria}} = \frac{l_{R \text{ bruta}}}{\text{Días del mes crítico}}$$

**Ecuación 9** Cálculo de la lámina de riego bruta diaria ( $I_{R \text{ bruta diaria}}$ ).

Dónde:

$$I_{R \text{ bruta}} = \text{Lámina de riego bruta, mm.}$$

$$I_{R \text{ bruta diaria}} = \text{Lámina de riego bruta diaria, mm.}$$

Finalmente, dividiendo los volúmenes acumulados entre las áreas acumuladas y, cuidando las unidades, se obtiene el C.U.R. en l/s-ha, que es muy común se presente en papel logarítmico para que sea fácilmente utilizado para determinar las necesidades de caudal para diferentes áreas.

Con la finalidad de definir el volumen de agua demandada por el sistema, se multiplican las áreas cultivadas por las láminas de riego brutas de cada cultivo y por cada mes logrando obtener los volúmenes demandados mensuales y finalmente el volumen demandado anual. (Pérez Morales et.al., 2018)

$$V_{\text{demandado}} = l_{R \text{ bruta diaria}} \text{ Sup}_{\text{cultivo}}$$

**Ecuación 10** Cálculo del volumen demandado ( $V_{\text{demandado}}$ ).

Dónde:

$$V_{\text{demandado}} = \text{Volumen Demandado, m}^3.$$

$$l_{R \text{ bruta diaria}} = \text{Lámina de riego bruta diaria, mm.}$$

$$\text{Sup}_{\text{cultivo}} = \text{Lámina de riego bruta diaria, ha.}$$

$$C. U. R. = V_{\text{demandado}} \text{ Sup}_{\text{cultivo}}$$

**Ecuación 11** Cálculo del coeficiente unitario de riego (C.U.R.).

Dónde:

$$C. U. R. = \text{Coeficiente Unitario de Riego, l/s-ha.}$$

$$l_{R \text{ bruta diaria}} = \text{Lámina de riego bruta diaria, mm.}$$

$$\text{Sup}_{\text{cultivo}} = \text{Lámina de riego bruta diaria, ha.}$$



## Eficiencia de riego

En términos generales, la eficiencia de riego implica el manejo adecuado del agua en el predio agrícola, en otras palabras, implica el grado de habilidad que tiene el regante para manejar el agua.

Sin embargo, por más cuidado que se tenga en el manejo del agua, siempre van a existir pérdidas, estas pérdidas ocurren principalmente durante la aplicación del agua al suelo y también durante la conducción, tanto en la red de riego externa como en la red interna de distribución del agua a la parcela.

Existen expresiones matemáticas para el cálculo de la eficiencia de riego, no obstante, al no estar dentro de los alcances de esta investigación, se presentan únicamente las tablas de valores para la eficiencia en el manejo del agua y del sistema de riego según el *Soil Conservation System EE.UU.* y el *International Institute for Land Reclamation and Improvement*.

VALORES DE EFICIENCIA EN EL MANEJO DEL AGUA		
Método de riego	SCS (%)	ILRI (%)
Melgas rectas en pendiente	60-75	53
Pozas o melgas sin pendientes	60-80	58
Desbordamiento	50-55	-
Surcos	55-70	57
Corrugaciones	50-70	-

**Tabla 8.** Valores de eficiencia en el manejo del agua (*Soil Conservation System EE.UU., International Institute for Land Reclamation and Improvement.*)

VALORES DE EFICIENCIA DEL SISTEMA DE RIEGO		
Sistema de riego	Manejo Bueno (%)	Manejo Pobre (%)
Surcos	50-75	30-50
Melgas	50-85	30-50
Aspersión	60-85	40-60
Goteo	60-85	50-60

**Tabla 9.** Valores de eficiencia del sistema de riego (*Centro Internacional de Riego, EE.UU. Manual No. 3, 1985*)

De los valores mostrados en la **Tabla 8** y **Tabla 9** se realizará un análisis de sensibilidad para la elección de dos escenarios límites que puedan cubrir las dos condiciones extremas (manejos buenos y manejos pobres) que se tienen para la eficiencia del manejo del agua y de los sistemas de riego.



### 3.6.6 Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular

#### Agua Disponible

Es el porcentaje de agua retenida por el suelo entre la capacidad de campo y el coeficiente de marchitez. Del 50 al 75% del agua disponible se denomina *humedad fácilmente disponible*. En este caso el agua es retenida en el suelo resistiendo los efectos de la gravedad y la planta debe ejercer cierta fuerza para vencer la tensión que lo mantiene dentro del perfil edáfico. (Cerna Bazán, 2007)

El patrón típico de distribución de las raíces de un cultivo se asemeja a un triángulo equilátero invertido de donde el 40% de las raíces está en la primera cuarta parte de su profundidad total; el 30% en la segunda cuarta parte, el 20% en la tercera cuarta parte y el 10% restante en la parte más profunda.

Si el 70% de las raíces del cultivo están localizadas en la mitad superior de la zona radicular; conviene considerar la profundidad de riego no en la totalidad de la profundidad de la raíz sino 75% de ella. A esta profundidad se le conoce como profundidad efectiva de las raíces y constituye el valor de la profundidad del suelo a regar. (CONGOPE, 2014)

La investigación reporta que la planta extrae hasta 70% de la humedad que necesita de la mitad superior de la zona de las raíces. La absorción tiene una distribución de: 40, 30, 20, 10 % de cada cuarta parte de las zonas de las raíces. (Cerna Bazán, 2007)

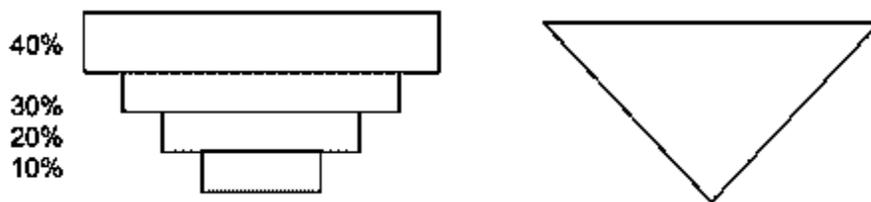


Ilustración 27 Padrón típico de distribución de las raíces de un cultivo. (CONGOPE, 2014)

En la **Tabla 10** se muestra la profundidad radicular de los cultivos de estudio; al igual que en el apartado 3.2.2, *Gráfico de coeficiente de desarrollo parcial*, se realiza la misma consideración para la guayaba con relación a los cítricos.



Cultivo	Profundidad Radicular	
Aguacate	0.50	1.00
Zarzamora	0.60	1.20
Maíz	1.00	1.70
<b>Cítricos</b>		
70% de cobertura vegetal	1.20	1.50
50% de cobertura vegetal	1.10	1.50
20% de cobertura vegetal	0.80	1.10

**Tabla 10.** Profundidad radicular de los cultivos de estudio. (Manual 56 FAO, 2014)

Por otra parte, de acuerdo al *Manual 56 de la FAO* llamado *Evapotranspiración de Cultivo*, la disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo.

La capacidad de campo representa la cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias, o sea la cantidad de agua remanente en el suelo cuando el drenaje descendente ha disminuido significativamente.

En ausencia de una fuente de agua, el contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reducirá como resultado del consumo de agua por el cultivo. A medida que aumenta el consumo de agua, el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que reducirá su energía potencial y hará más difícil su extracción por las plantas.

Eventualmente, se alcanzará un punto donde el cultivo no podrá extraer el agua remanente. En este momento la extracción de agua será nula y se habrá alcanzado el punto de marchitez permanente. El punto de marchitez permanente es el contenido de humedad en el suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente.



Ilustración 28 Estados del agua en el suelo. (Pérez Morales et.al., 2018)

### Agua fácilmente aprovechable (AFA)

Según el *Manual 56 de la FAO*, a pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el punto de marchitez permanente.

Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la  $ET_c$ . A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer.

Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir de estrés. La fracción del total de agua disponible en la zona radicular del suelo (ADT) que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada *agua fácilmente aprovechable en el suelo*:

$$AFA = p ADT$$

**Ecuación 12** Cálculo del agua fácilmente aprovechable (AFA).



Dónde:

$AFA$  = Agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo, mm.

$p$  = Fracción promedio del total de agua disponible en el suelo ( $ADT$ ) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la  $ET$ )  $[0 - 1]$ , adim.

$ADT$  = Agua disponible en la zona radicular del suelo, mm.

El factor  $p$  varía de un cultivo a otro. El factor  $p$  varía normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de  $ET_c$  ( $> 8$  mm/día), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de  $ET_c$  ( $< 3$  mm/día).

Un valor de 0,50 para  $p$  es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos. El valor de  $p$  está en función del poder evaporante de la atmósfera. Los valores de  $p$  presentados en la **Tabla 11** serán mayores a tasas bajas de  $ET_c$  que a tasas altas de  $ET_c$ .

Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de  $ET_c$  es alto,  $p$  será 10-25% menor que los valores presentados en la **Tabla 11**, y el suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés.

Cultivo	$p$
Aguacate	0.70
Zarzamora	0.50
Maíz	0.55
Cítricos	0.50

**Tabla 11.** Valores de  $p$  para los cultivos de estudio. (Manual 56 FAO Evapotranspiración de Cultivo, 2014)

Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de  $p$  será hasta 20% mayor que los valores tabulados. Generalmente se utiliza un valor constante de  $p$  para cada período específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de  $p$  de acuerdo a la tasa de  $ET_c$  es:



$$p_{ajustado} = p_{tabla10} + 0.04(5 - ETc)$$

**Ecuación 13** Cálculo de  $p$  ajustado de acuerdo a la tasa de  $ETc$ . (Manual 56 FAO, 2014)

Dónde:

$p_{tabla10}$  = Valor de  $p$  ajustado, adim.

$p_{tabla10}$  = Valor de  $p$  contenido en la **Tabla 11**, adim.

$ETc$  = Evapotranspiración del cultivo, mm/día

Nota:

El valor ajustado de  $p$  es limitado a  $0.1 \leq p \leq 0.8$  y el valor de  $ETc$  es en mm/día.

Es necesario mencionar que no es totalmente correcto el expresar la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico como una función de la fracción ( $p$ ). En realidad, la tasa de extracción del agua por parte de las raíces está influenciada más directamente por el nivel de energía potencial del agua del suelo (potencial matricial del suelo y la conductividad hidráulica asociada), que por el contenido de agua.

Debido a que potenciales matriciales similares pueden corresponder a distintos tipos de suelos con diferentes contenidos de humedad, el valor de  $p$  es también función del tipo de suelo. En general, se puede establecer que para suelos de textura fina (arcilla) los valores de  $p$  indicados en la **Tabla 11** pueden ser reducidos en un 5-10%, mientras para suelos de textura más pesada (arenosos), estos pueden incrementarse en un 5-10%.

El término AFA es similar al término Agotamiento Máximo Permisible (AMP) introducido por *Merriam* (1996). Sin embargo, los valores del AMP están influenciados por las prácticas de manejo y factores económicos, además de los factores físicos que influyen el valor de  $p$ . En general, el valor de  $AMP < AFA$  cuando se quiere evitar riesgos o imprevistos y  $AMP > AFA$  cuando se utiliza intencionalmente el estrés hídrico como práctica de manejo del agua del suelo.



Para efectos de esta investigación el coeficiente  $p$  se empleará como coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular del cultivo. Por lo que se tiene:

$$K_R = p$$

**Ecuación 14** Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular.

Dónde:

$K_R$  = Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular, adim.

$p$  = Valor  $p$  o  $p$  ajustado (según sea el caso de acuerdo a la **Tabla 11** y **Ecuación 13**), adim.

De acuerdo a lo dicho anteriormente se puede considerar de manera general que el coeficiente de aprovechamiento de agua en la zona radicular está en función de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), la textura del suelo, contenido de humedad del suelo y tamaño de las raíces de los cultivos.

### **3.6.7 Edafología y uso de suelo**

Dentro de los factores importantes para la evaluación de las necesidades hídricas de los cultivos se encuentra la infiltración que está determinada por las características físicas de los suelos, estas características a su vez influyen en la naturaleza y desarrollo de la vegetación.

#### **Edafología**

La Edafología como ciencia desarrolla el estudio del suelo desde el punto de vista de las necesidades de las plantas, en particular aquellas que se relacionan con la actividad agrícola, para determinar las técnicas que conlleven a un uso racional. (Universidad Autónoma de Chapingo, 2018).

#### **Uso de suelo**

El término “uso de suelo” se emplea para definir la utilización que se hace del suelo para realizar distintos tipos de actividades humanas



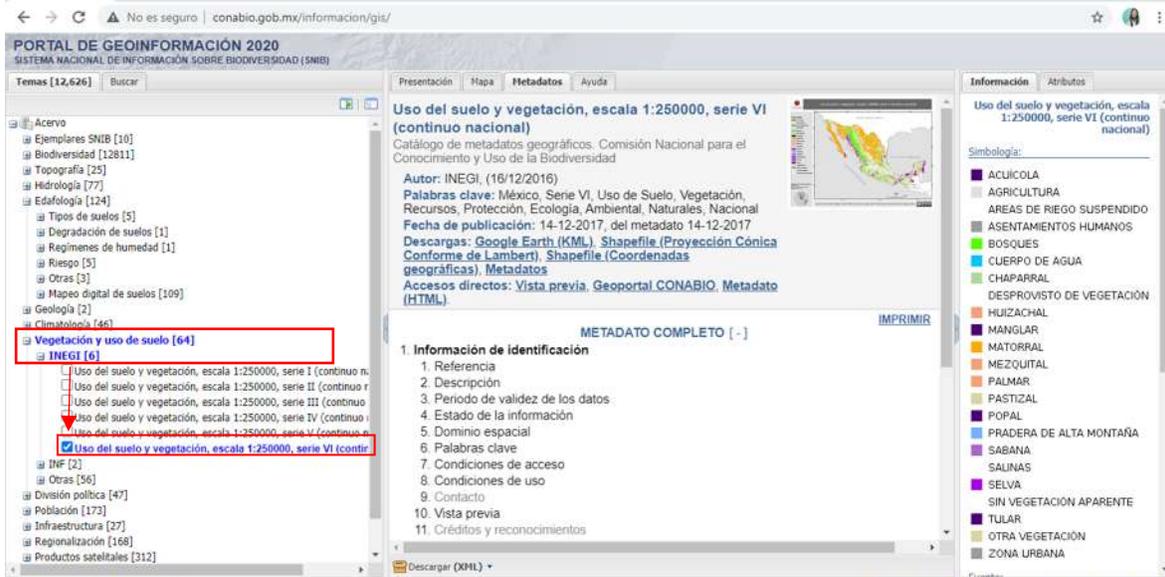
*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

María Isabel Maldonado Mercado

Para determinar la edafología y uso de suelo de las zonas de estudio se utilizará el conjunto de datos vectoriales del acervo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).



**Ilustración 29** Ruta de acceso a la información edafológica en el portal de geoinformación de la CONABIO.



**Ilustración 30** Ruta de acceso a la información de uso de suelo en el portal de geoinformación de la CONABIO



### 3.6.8 Coeficiente de Infiltración

La entrada de agua en la matriz del suelo a través de la interfase suelo-atmósfera se denomina infiltración (Lal & Shukla, 2004).

En este proceso el agua que se encuentra en la superficie del terreno penetra desde ésta hacia el interior del suelo.

De acuerdo a Aparicio Mijares (2010) dicho proceso depende de un gran número de factores entre los que destacan:

- Textura de suelo.
- Contenido de humedad inicial.
- Contenido de humedad de saturación.
- Cobertura vegetal.
- Uso del suelo.
- Aire atrapado.
- Lavado de material fino.
- Compactación
- Temperatura, sus cambios y diferencias.

Para obtener el coeficiente de infiltración se tomó el modelo analítico de Schosinsky y Losilla (2000).

La ecuación que describe el modelo analítico para la determinación de la infiltración a partir de la precipitación mensual propuesto por Schosinsky y Losilla (2000) es:

$$I = (1 - ki)CP$$

**Ecuación 15** Infiltración mensual.

Dónde:

$I$  = Infiltración mensual, mm/mes.

$ki$  = Fracción de lluvia que es interceptada por el follaje, adim.

$C$  = Coeficiente de infiltración, adim.

$P$  = Precipitación mensual, mm/mes.



Los autores, después de hacer una revisión bibliográfica, asumen una retención por follaje del 12%, es decir, consideran  $k_i = 0.12$ , de esta manera la ecuación anterior queda:

$$I = (0.88)CP$$

**Ecuación 16** Infiltración mensual corregida por retención de follaje.

Las metodologías para la obtención del resto de los elementos en el modelo (Paz López, 2016) se describen detalladamente en los apartados siguientes.

### **Coeficiente De Infiltración ( $C$ )**

El coeficiente de Infiltración ( $C$ ) resulta de considerar tres elementos como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$C = k_p + k_v + k_{fc}$$

**Ecuación 17** Coeficiente de infiltración.

Dónde:

$k_p$ = Fracción que infiltra por efecto de la pendiente, adim.

$k_v$ = Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal, adim.

$k_{fc}$ = Fracción que infiltra por la textura del suelo, adim.

Existen dos consideraciones hechas por Schosinsky y Losilla (2000) con respecto a este coeficiente:

- $C \leq 1$  Debido a que no se puede infiltrar más del total de precipitación que cae sobre determinada área.
- Si  $P \leq 5mm$ , entonces  $C = 0$ . Se asume que precipitaciones mensuales iguales o menores a estas no generan infiltración ni escurrimiento.



Los tres componentes del coeficiente de infiltración son detallados en las siguientes secciones.

### Coeficiente de Infiltración por Pendiente ( $k_p$ )

Con base en una revisión bibliográfica, Schosinsky y Losilla (2000), proponen la clasificación para las pendientes mostradas en la **Tabla 12**.

COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR PENDIENTE ( $k_p$ )		
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	> de 7%	0.06

**Tabla 12.** Coeficiente de infiltración por pendiente. (Schosinsky y Losilla,2000)

Dado que la **Tabla 12** presentada por Schosinsky y Losilla deja fuera un rango importante de pendientes, se procedió a interpolar linealmente los valores para asignarlos a las pendientes faltantes, quedando de la siguiente manera:

COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR PENDIENTE $k_p$		
Muy plana	0.02% - 0.06%	<b>0.300</b>
Semi plana	0.06% - 0.3%	<b>0.250</b>
Plana	0.3% - 0.4%	<b>0.200</b>
Poco plana	0.4% - 1%	<b>0.175</b>
Algo plana	1% - 2%	<b>0.150</b>
Promedio	2% - 7%	<b>0.100</b>
Fuerte	> de 7%	<b>0.060</b>

**Tabla 13.** Coeficiente de infiltración por pendiente modificado.



### Coeficiente de Infiltración por Cobertura Vegetal ( $k_v$ )

La **Tabla 14** expone las coberturas vegetales que Schosinsky y Losilla (2000) presentaron con sus respectivos valores asociados:

COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR COBERTURA VEGETAL ( $k_v$ )	
Cobertura con zacate menos de 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más de 75%	0.21

**Tabla 14.** Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal. (Schosinsky y Losilla,2000)

### Coeficiente de Infiltración por Textura del Suelo ( $k_{fc}$ )

Schosinsky y Losilla (2000) proporcionan, para la fracción de infiltración por efecto de la textura del suelo, los valores y texturas que exponen en la **Tabla 15**.

COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR TEXTURA DE SUELO ( $k_{fc}$ )	
Arcilla compacta impermeable	0.10
Combinación de limo y arcilla	0.20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0.40

**Tabla 15.** Coeficiente de infiltración por textura de suelo. (Schosinsky y Losilla,2000)

De la información anterior se obtendrá el coeficiente de infiltración, empleando el programa *Arcgis 10.3* para procesar la información.

Una vez reunida y procesada la información de los sujetos, se procedió a la realización de los cálculos, empleando los procedimientos y metodologías pertinentes, que conducen a la determinación de la necesidad hídrica de los cultivos de análisis en las zonas de estudio se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.



## **CAPITULO IV. RESULTADOS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Siguiendo la metodología para alcanzar los objetivos planteados se presentan los resultados obtenidos del análisis para la evaluación de las necesidades hídricas mediante el método de Blaney-Criddle para los cultivos de aguacate, guayaba, limón, maíz y zarzamora en los municipios de mayor producción en el estado de Michoacán de Ocampo, México.

Durante la búsqueda de información para conocer a detalle las zonas de mayor producción de cada uno de los cultivos se presentó una doble dificultad resultado de la emergencia sanitaria por COVID 19 durante los años de 2020 y 2021. La primera fue la imposibilidad de realizar visitas de campo y una segunda fue la dificultad para conseguir información en las cabeceras municipales debido a que las dependencias limitaron al máximo la prestación de servicios.

Por otro lado, se buscó establecer contacto con personas nativas de los municipios que pudieran conocer la información requerida para ubicar las zonas de mayor producción de los cultivos, sin embargo, únicamente para dos de los cinco municipios de estudio se logró contactar a personas que conocían la ubicación de las áreas a localizar. Por lo anterior se tomó una solución alternativa para llevar a cabo el desarrollo de la investigación, la cual consistió en buscar en las páginas web de la SAGARPA información de utilidad con relación a los temas de investigación

En los siguientes apartados se mostrarán los resultados obtenidos del análisis de la información que fue requerida para lograr alcanzar los objetivos planteados, éstos se presentarán en tablas de resumen, gráficos e ilustraciones.

### **4.2 ANÁLISIS DE DATOS**

#### **4.2.1 Polígonos de Thiessen**

Ante la imposibilidad de obtener la localización espacial exacta de las áreas con mayor producción para cada uno de los cultivos de análisis en los municipios respectivos, se optó por zonificar éstos de acuerdo a las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas cercanas a las zonas de estudio. Para realizar dicha zonificación se utilizaron los polígonos de Thiessen, a su vez la información meteorológica de la estación de influencia para un área determinada se utilizó para calcular la evapotranspiración en la zona.



María Isabel Maldonado Mercado

Dicho lo anterior, para alguna zona dentro del área de análisis se procede a ubicarla espacialmente en los mapas mostrados. En las siguientes ilustraciones se presentan los polígonos de Thiessen obtenidos utilizando el software denominado ArcGIS, para cada uno de los municipios.

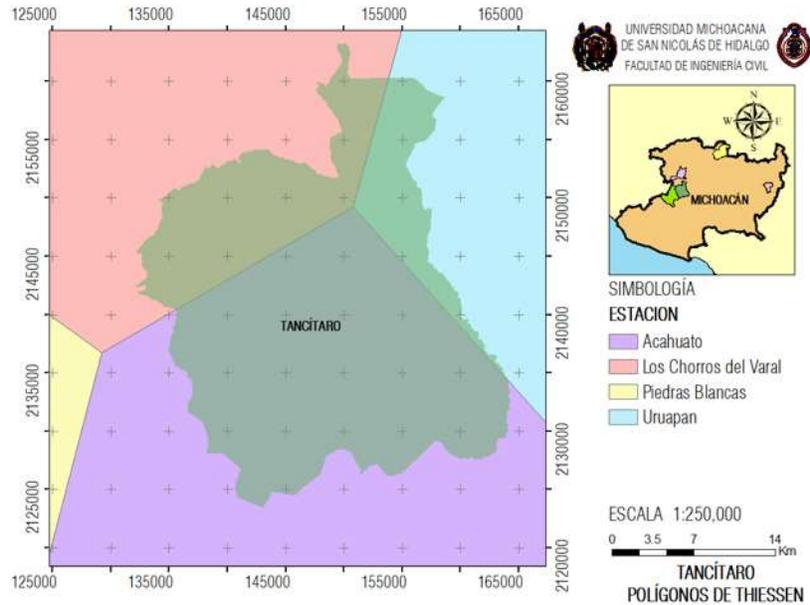


Ilustración 31 Polígonos de Thiessen para el municipio de Tancitaro.

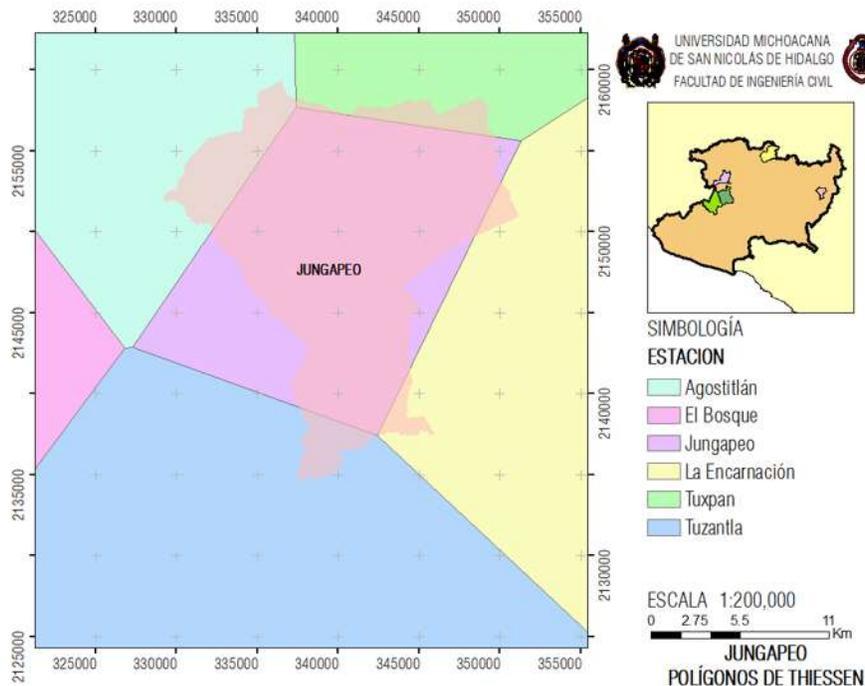


Ilustración 32 Polígonos de Thiessen para el municipio de Jungapeo.



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

María Isabel Maldonado Mercado

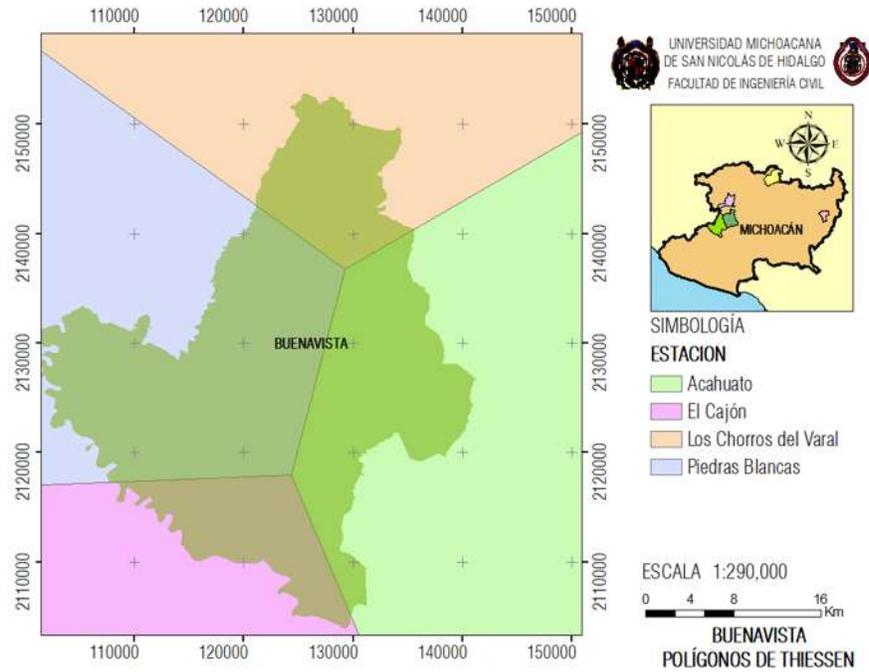


Ilustración 33 Polígonos de Thiessen para el municipio de Buenavista.

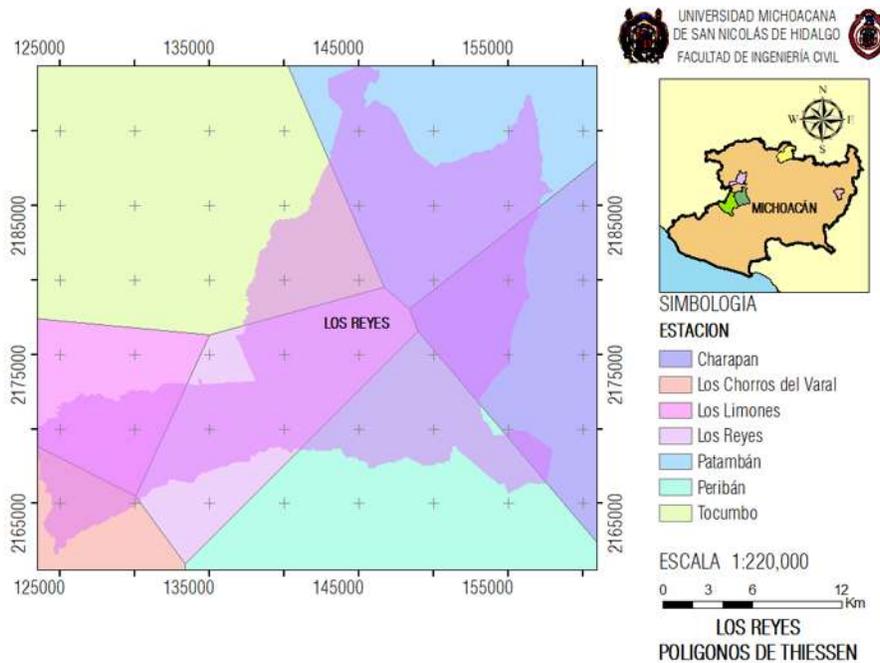


Ilustración 34 Polígonos de Thiessen para el municipio de Los Reyes.

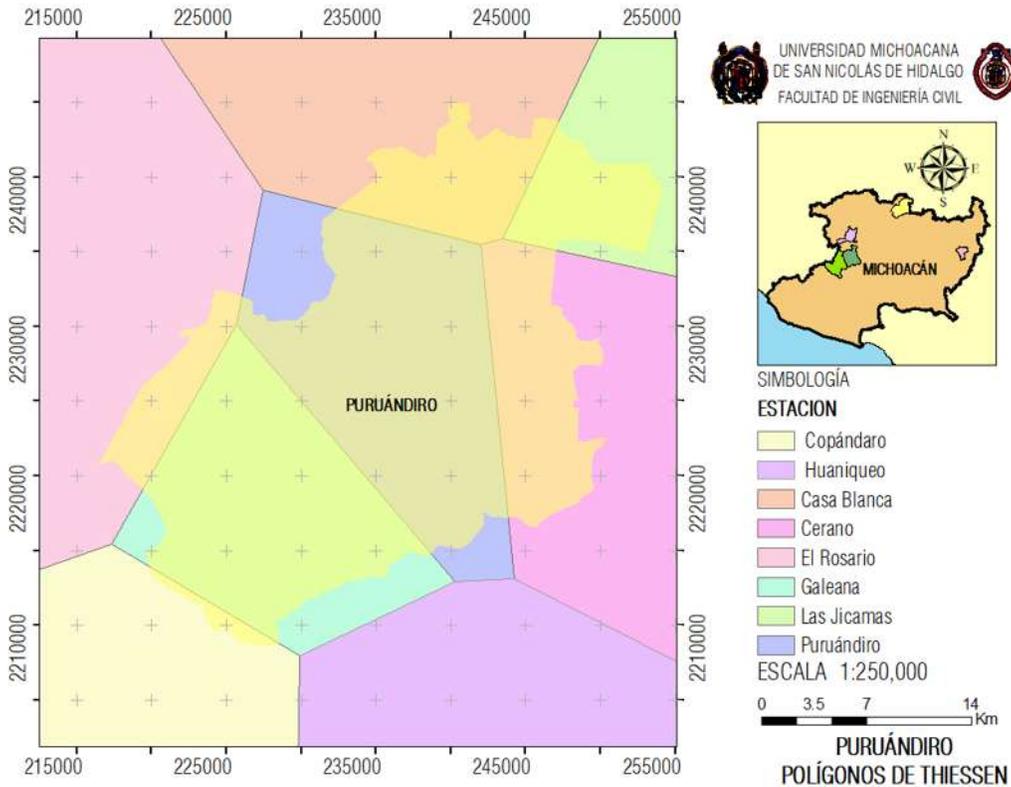


Ilustración 35 Polígonos de Thiessen para el municipio de Los Puruándiro.

#### 4.2.2 Cálculo de la Evapotranspiración de los cultivos

Para cada uno de los municipios de estudio una vez zonificados por el área de influencia de las estaciones climatológicas, y reunidos los datos geográficos y climatológicos de las mismas, así como los coeficientes de desarrollo de los cultivos, se procedió a calcular la evapotranspiración de éstos siguiendo la metodología del apartado 3.6.4.

Cabe mencionar que los cultivos de aguacate, limón, guayaba y zarzamora son perennes por lo que su ciclo vegetativo se considera de enero a diciembre y únicamente para el cultivo del maíz en el municipio de Puruándiro; el inicio del ciclo vegetativo se toma con inicio en el mes de abril y finalización en el mes de noviembre.



En la siguiente tabla se muestra el concentrado de datos utilizados para calcular el valor de la evapotranspiración. Para evitar la saturación de la presente investigación se omite presentar cada una de las tablas correspondientes a las estaciones de influencia de los municipios de estudio, ya que se sigue la misma metodología, sin embargo; se presentan los gráficos de evapotranspiración resultado de los cálculos realizados para cada uno de los cultivos en el municipio correspondiente y estación climatológica de influencia.

**TANCÍTARO**  
**ETc aguacate**

Mes Crítico JUNIO    Dias mes Crítico 30  
ETP MAX (mm)= 158.81

Cultivo Los Chorros del Varal  
AGUACATE

Num. Días	MES	Latitud		Kg	19.52	T media °C	F	ETP cm	ETP mm	ETP mm/día
		19	20							
31	ENERO	7.79	7.74	0.26	7.764	21.500	13.997	3.639	36.391	1.174
28	FEBRERO	7.28	7.25	0.37	7.264	22.500	13.429	4.969	49.688	1.775
31	MARZO	8.41	8.41	0.55	8.410	24.000	16.126	8.869	88.691	2.861
30	ABRIL	8.51	8.52	0.68	8.515	26.500	17.304	11.767	117.666	3.922
31	MAYO	9.11	9.15	0.82	9.131	26.750	18.660	15.301	153.008	4.936
30	JUNIO	8.97	9.00	0.86	8.986	27.000	18.466	15.881	158.806	5.294
31	JULIO	9.2	9.25	0.77	9.226	20.250	16.103	12.399	123.994	4.000
31	AGOSTO	8.92	8.96	0.68	8.941	25.000	17.553	11.936	119.364	3.850
30	SEPTIEMBRE	8.28	8.3	0.56	8.290	21.500	14.946	8.370	83.695	2.790
31	OCTUBRE	8.19	8.18	0.48	8.185	23.500	15.506	7.443	74.429	2.401
30	NOVIEMBRE	7.63	7.58	0.37	7.604	23.500	14.406	5.330	53.301	1.777
31	DICIEMBRE	7.71	7.66	0.28	7.684	20.500	13.500	3.780	37.800	1.219

**Tabla 16.** Resultado del cálculo de la ETc para la estación Los Chorros del Varal en el municipio de Tancítaro.

Para cada uno de los gráficos se considera enero como el mes 1, y así sucesivamente hasta diciembre el mes 12.

Para el gráfico de ETP para el cultivo de maíz se considera abril como el mes 1, siguiendo la sucesión numérica correspondiente a cada uno de los meses consecutivos para terminar en noviembre, el mes 8.



### ETP AGUACATE

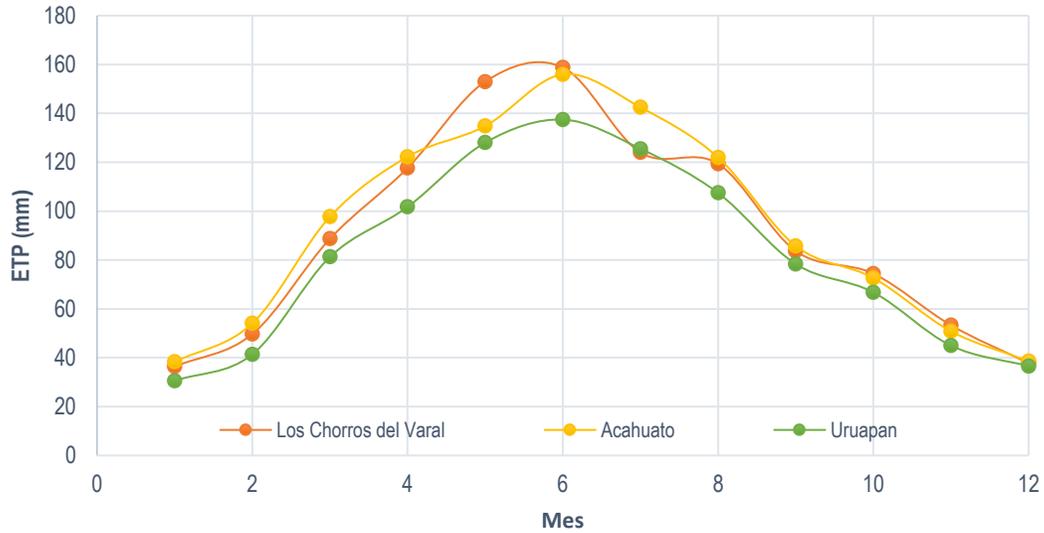


Gráfico VI. Evapotranspiración para el aguacate por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Tancítaro.

### ETP GUAYABA

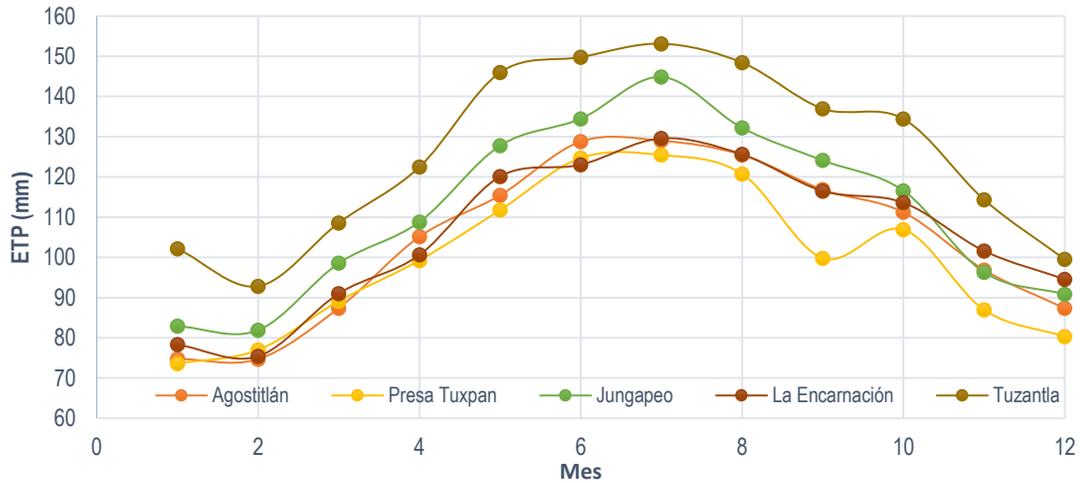


Gráfico VII. Evapotranspiración para la guayaba por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Jungapeo.



### ETP LIMÓN

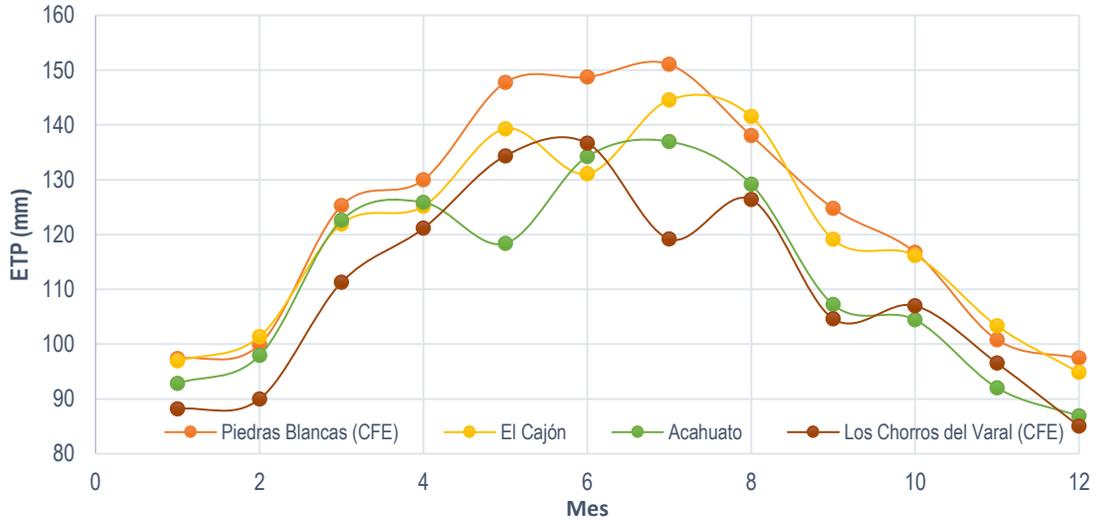


Gráfico VIII. Evapotranspiración para el limón por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Buenavista.

### ETP ZARZAMORA

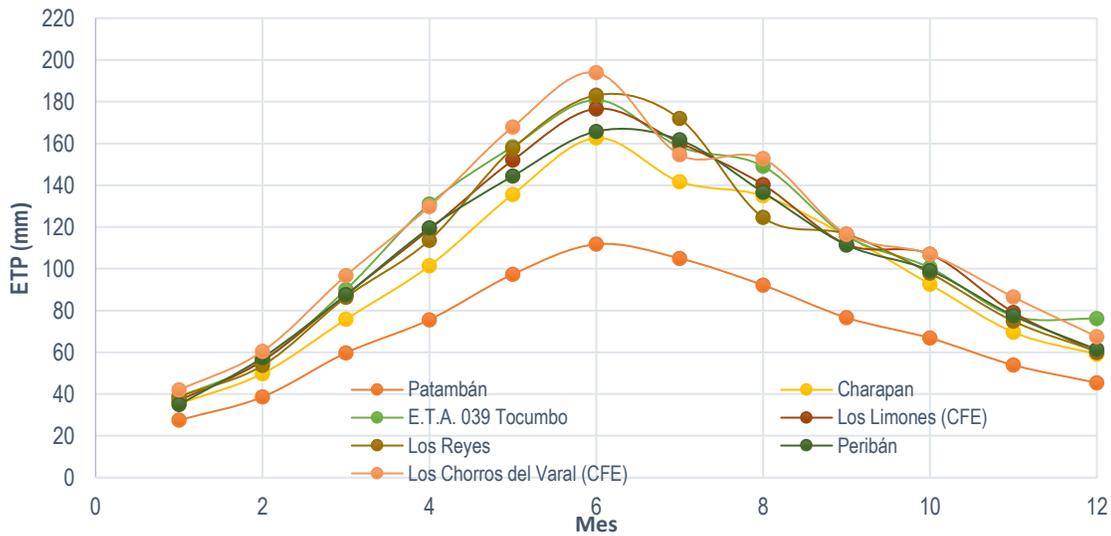


Gráfico IX. Evapotranspiración para la zarzamora por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Los Reyes.



### ETP MAÍZ

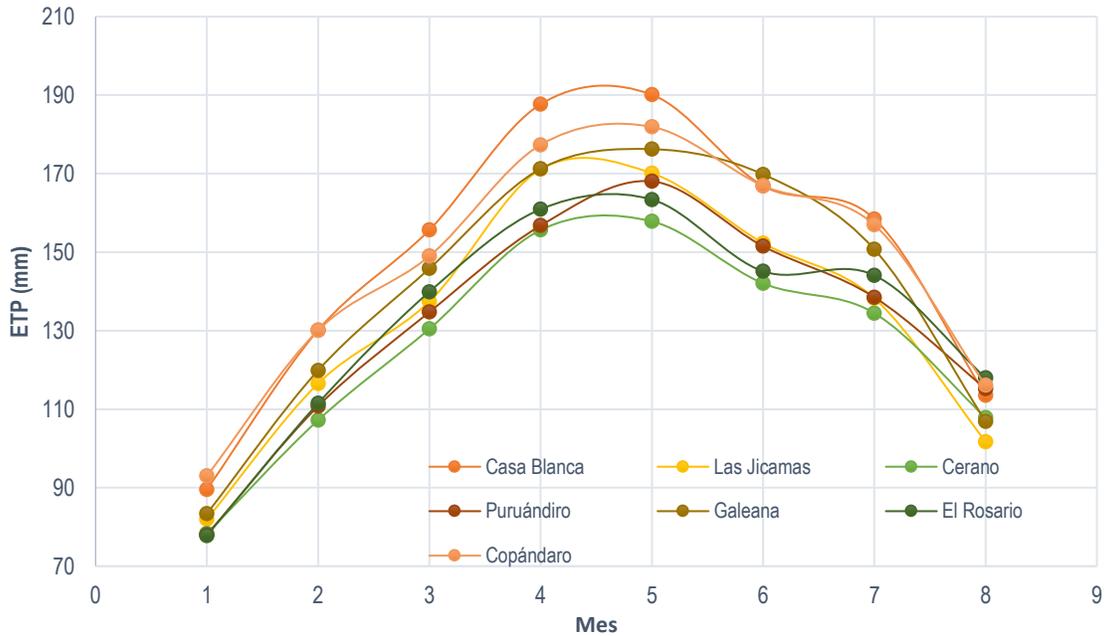


Gráfico X. Evapotranspiración para el maíz por área de influencia de estación climatológica para el municipio de Puruándiro.

#### 4.2.3 Edafología, cobertura vegetal y uso de suelo

A fin de la correcta elección del coeficiente de infiltración para establecer el CUR, se procedió a conocer la edafología, cobertura vegetal y uso de suelo para cada uno de los municipios.

Acorde al acervo digital de archivos de la CONABIO, en el ámbito de edafología para cada uno de los municipios se tienen los siguientes tipos de suelo y cobertura vegetal.



María Isabel Maldonado Mercado

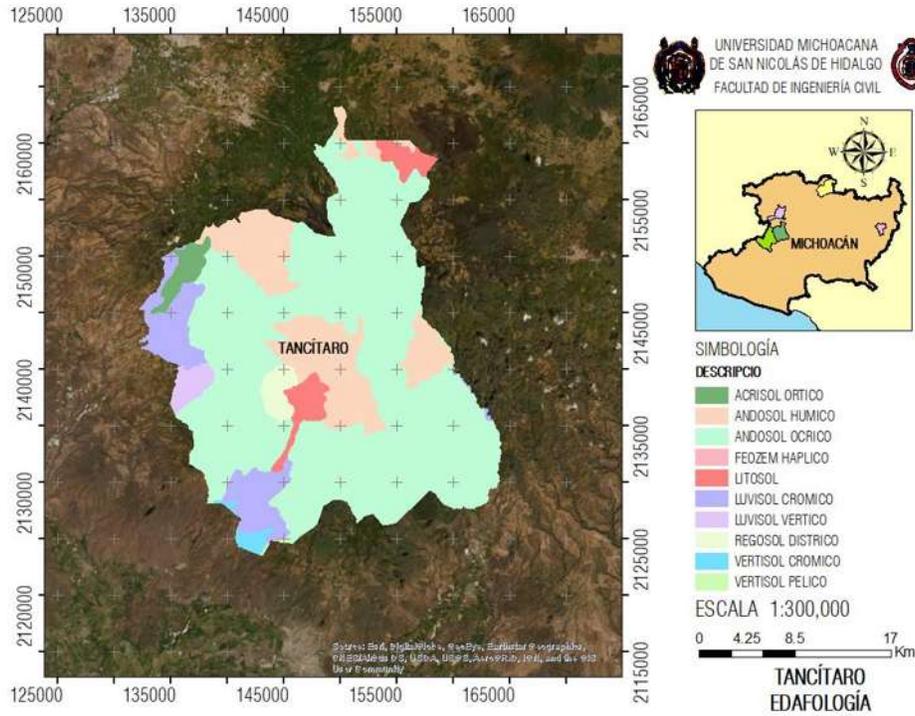


Ilustración 36 Edafología del municipio de Tancitaro.

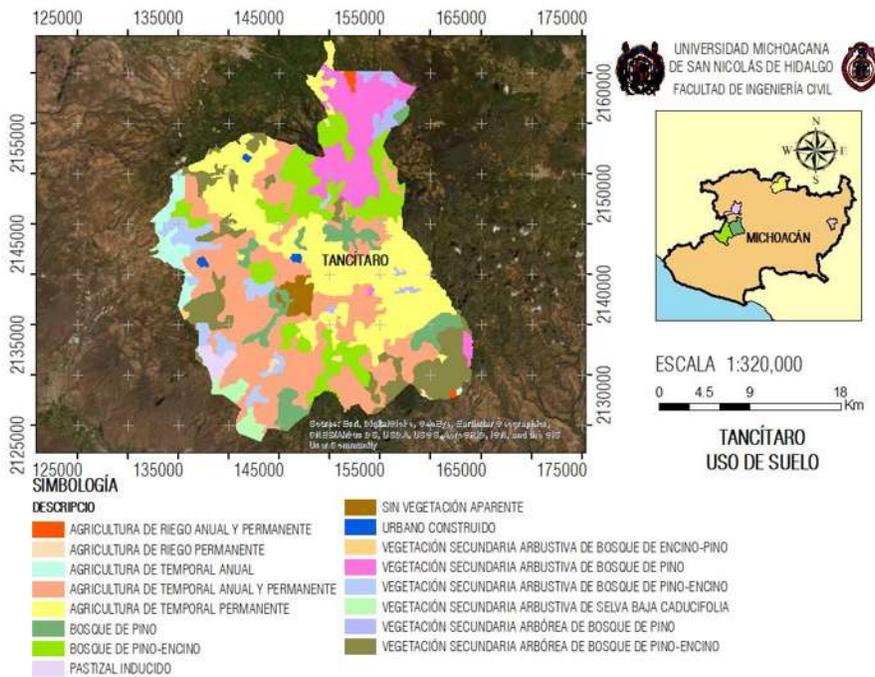


Ilustración 37 Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Tancitaro.



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

María Isabel Maldonado Mercado

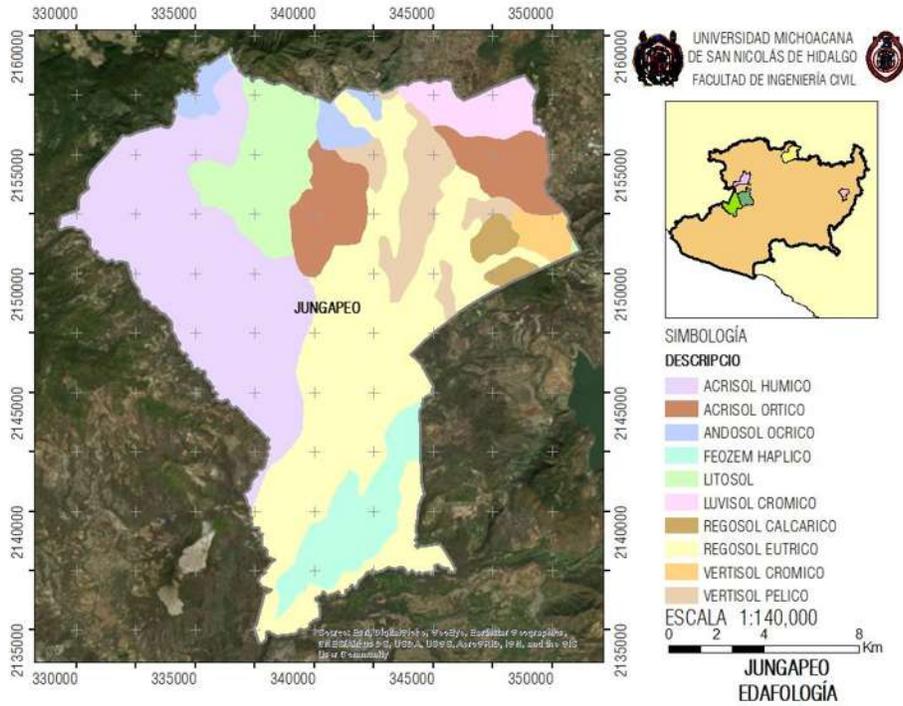


Ilustración 38 Edafología del municipio de Jungapeo.

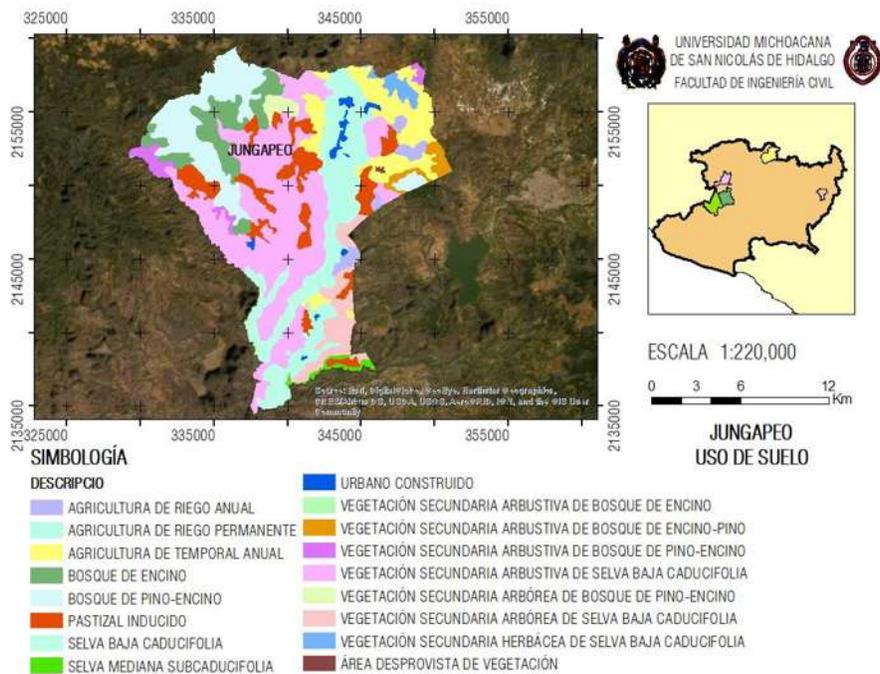


Ilustración 39 Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Jungapeo.



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

María Isabel Maldonado Mercado

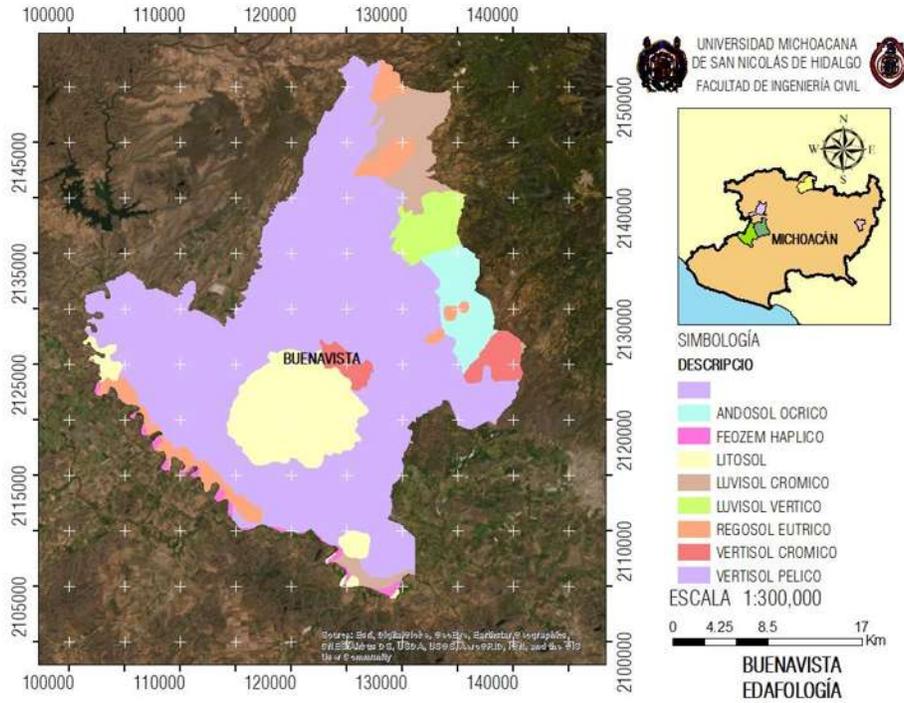


Ilustración 40 Edafología del municipio de Buenavista.

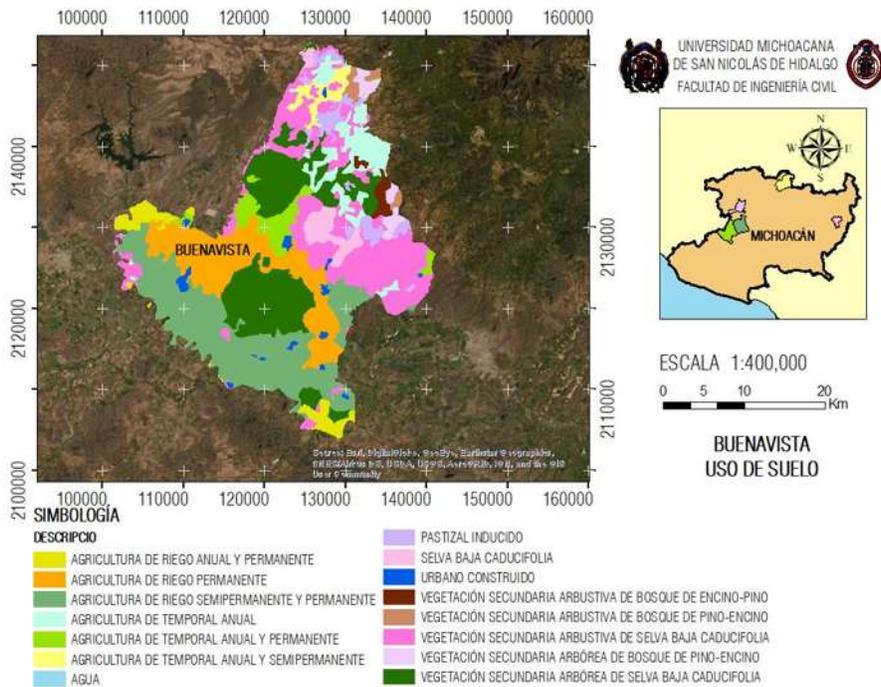


Ilustración 41 Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Buenavista.



María Isabel Maldonado Mercado

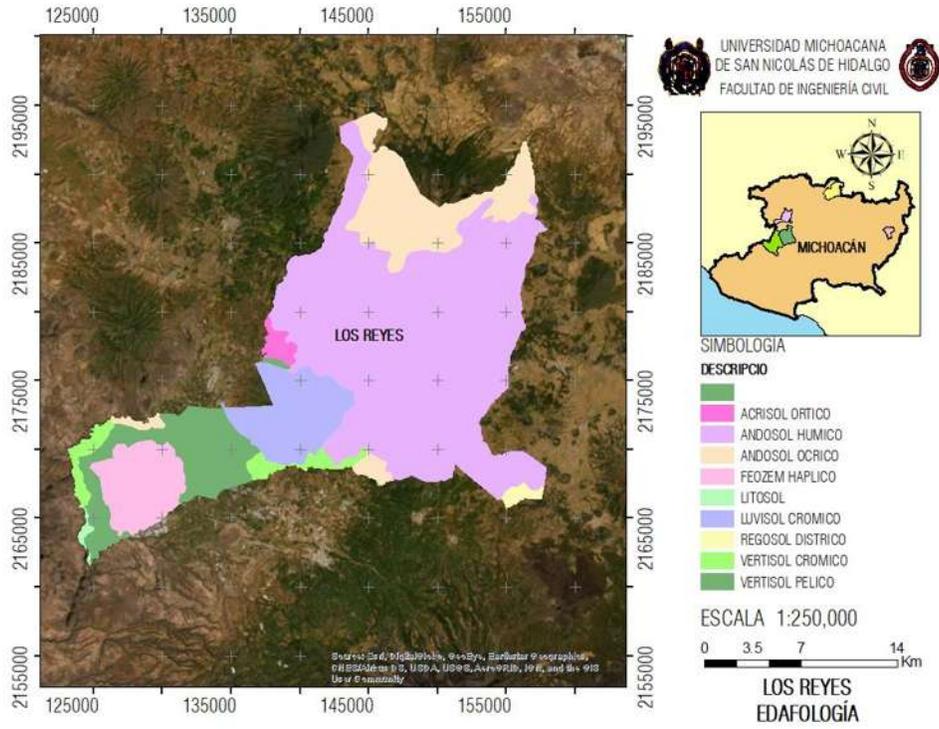


Ilustración 42 Edafología del municipio de Los Reyes.

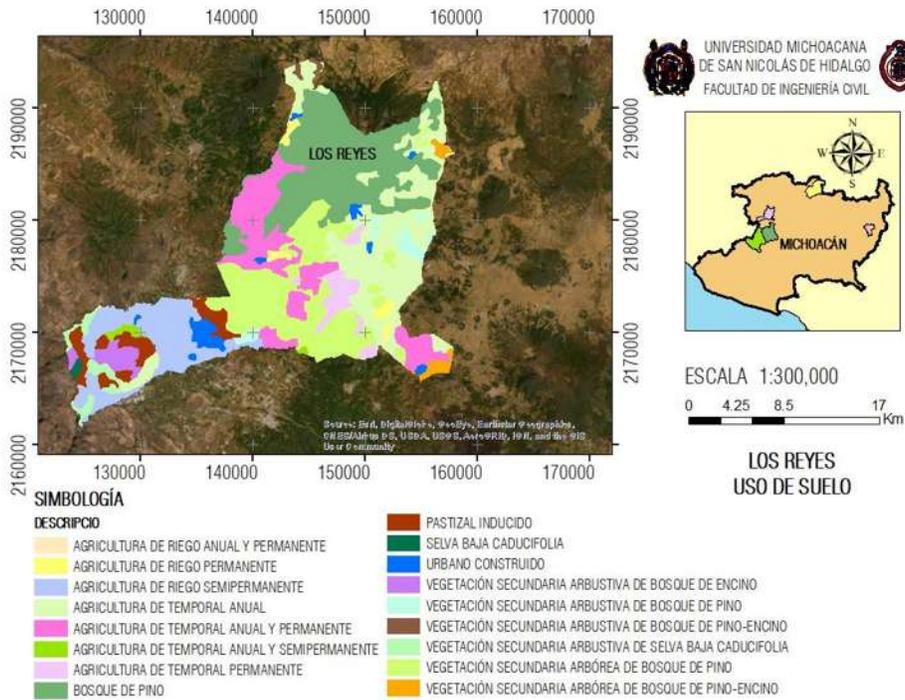


Ilustración 43 Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Los Reyes.



María Isabel Maldonado Mercado

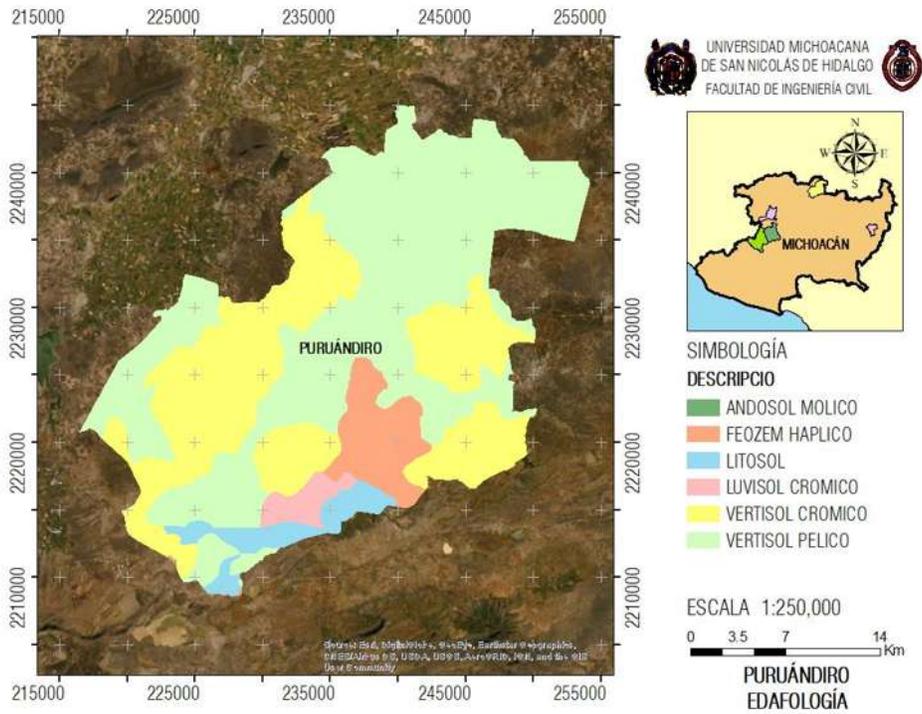


Ilustración 44 Edafología del municipio de Puruándiro.

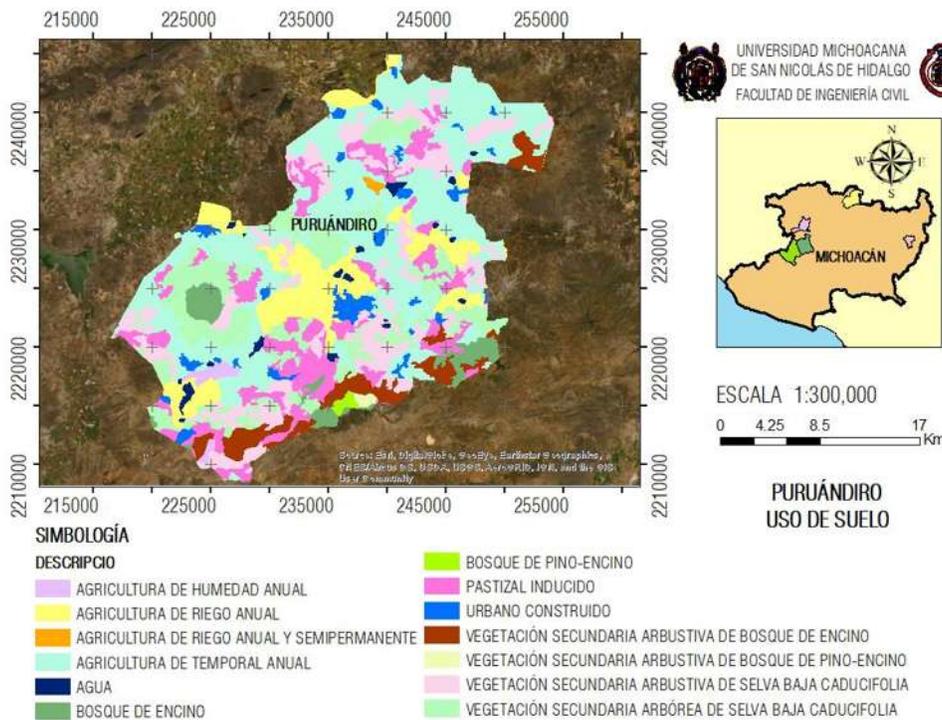


Ilustración 45 Uso de suelo y cobertura vegetal del municipio de Puruándiro.



#### 4.2.4 Coeficiente de Infiltración

Acorde al apartado 3.6.8, para determinar el coeficiente de infiltración fue necesario asignar al uso de suelo y edafología los valores que presentan Schosinsky y Losilla (2000) para los coeficientes por pendiente, cobertura vegetal y textura de suelo, por lo que se clasificó la información obtenida del acervo digital de archivos de la CONABIO presentados en los mapas anteriores en congruencia a la **Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14**, quedando de la siguiente manera:

##### Coeficiente de Infiltración por Textura del Suelo ( $k_v$ )

TEXTURA (CONABIO)	COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN POR TEXTURA DE SUELO ( $k_v$ )
Fina	Arcilla compacta impermeable 0.10
Media	Combinación de limo y arcilla 0.20
Gruesa	Suelo limo arenoso no muy compacto 0.40

Tabla 17. Ajuste de textura de suelo a coeficiente de infiltración por textura de suelo.

##### Coeficiente de Infiltración por Cobertura Vegetal ( $k_v$ )

Agua 0

##### COBERTURA CON ZACATE MENOS DE 50%

Área desprovista de vegetación	
Sin vegetación aparente	
Urbano construido	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	0.09
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	



### TERRENOS CULTIVADOS

Agricultura de humedad anual	
Agricultura de riego anual	
Agricultura de riego anual y permanente	
Agricultura de riego anual y semipermanente	
Agricultura de riego permanente	
Agricultura de riego semipermanente	0.10
Agricultura de riego semipermanente y permanente	
Agricultura de temporal anual	
Agricultura de temporal anual y permanente	
Agricultura de temporal anual y semipermanente	
Agricultura de temporal permanente	

### COBERTURA CON PASTIZAL

Pastizal inducido	0.18
-------------------	------

### BOSQUES

Bosque de encino	
Bosque de pino	0.20
Bosque de pino-encino	

### COBERTURA CON ZACATE MAS DE 75%

Selva baja caducifolia	
Selva mediana subcaducifolia	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	0.21
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	

**Tabla 18.** Ajuste de cobertura vegetal a coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.



Para el caso de las pendientes al tener un rango específico manejado por Schosinsky y Losilla (2000), en el programa Arcgis se realizó la asignación de valores directamente a las pendientes existentes de acuerdo a la **Tabla 13**.

A continuación, se muestra la obtención de los coeficientes  $k_{fc}$  y  $k_v$  para una estación, posteriormente se muestra solo el concentrado de los datos obtenidos para las estaciones restantes para cada uno de los municipios de estudio siguiendo la misma metodología.

### TANCÍTARO

#### ESTACIÓN LOS CHORROS DEL VARAL

COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO	$k_v$	Área	$k_v * \text{Área}$	% Área
Agricultura de riego anual y permanente	0.10	1713026.38	171302.64	0.98%
Agricultura de temporal anual	0.10	14489386.70	1448938.67	8.26%
Agricultura de temporal anual y permanente	0.10	5531851.34	553185.13	3.15%
Agricultura de temporal anual y permanente	0.10	8383574.46	838357.45	4.78%
Agricultura de temporal anual y permanente	0.10	14711998.58	1471199.86	8.38%
Agricultura de temporal permanente	0.10	41205684.90	4120568.49	23.48%
Agricultura de temporal permanente	0.10	7385448.91	738544.89	4.21%
Bosque de pino-encino	0.20	4299813.06	859962.61	2.45%
Bosque de pino-encino	0.20	360101.16	72020.23	0.21%
Bosque de pino-encino	0.20	25196547.24	5039309.45	14.36%
Pastizal inducido	0.18	9944.88	1790.08	0.01%
Urbano construido	0.09	529295.14	47636.56	0.30%
Urbano construido	0.09	308734.92	27786.14	0.18%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	0.21	530610.62	111428.23	0.30%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.21	4712517.83	989628.74	2.69%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.21	1018329.79	213849.26	0.58%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.21	1315049.50	276160.40	0.75%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.21	5160756.75	1083758.92	2.94%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.21	554559.80	116457.56	0.32%
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.21	2649953.22	556490.18	1.51%
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	0.09	24475943.83	2202834.95	13.95%
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	0.09	10298396.44	926855.68	5.87%
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	0.09	91645.17	8248.06	0.05%
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja	0.09	530976.61	47787.89	0.30%



COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO	$k_v$	Área	$k_v * \text{Área}$	% Área
caducifolia				
Suma = 175464147.25 21924102.07 100.00%				

$$k_v = 0.12$$

$$k_v = 0.10$$

**Tabla 19.** Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal para la estación Los Chorros del Varal.

Como puede observarse en la **Tabla 19**, para el área de influencia de la estación *Los chorros del varal* se tienen distintos usos de suelo y cobertura vegetal. De lo anterior para una determinación exacta del coeficiente  $k_v$ , así como para los coeficientes  $k_k$  y  $k_p$  se realiza un promedio ponderado. Como resultado se obtiene  $k_v = 0.12$  sin embargo, este resultado sale fuera del rango propuesto por Schosinsky y Losilla (2000) por lo que se procede a limitar el valor numérico a los que se presentan para el coeficiente  $k_v$ . De esta manera se redondea el valor a su inmediato superior o inferior según sea el caso para cada uno de los coeficientes por infiltración, de esta manera el criterio utilizado fue:

Rangos de valores $k_v$	Valor final $k_v$
$V_{pp} \leq 0.09$	0.09
$0.09 < V_{pp} \leq 0.14$	0.10
$0.14 < V_{pp} \leq 0.19$	0.18
$0.19 < V_{pp} \leq 0.20$	0.20
$0.20 < V_{pp} \leq 0.21$	0.21

**Tabla 20.** Rango de valores para asignación final del valor del coeficiente  $k_v$ .

Dónde:

$V_{pp}$  = Valor obtenido del promedio ponderado.

Al aplicar el criterio anterior el valor final del coeficiente  $k_v$  es 0.10 (valor resaltado en color rojo).



## TANCÍTARO

### ESTACIÓN LOS CHORROS DEL VARAL

TIPO DE SUELO	Textura	$k_{fc}$	Área	$k_{fc} * \text{Área}$	% Área
Acrisol ortico	Fina	0.10	12303284.63	1230328.46	7.01%
Andosol húmico	Media	0.20	6073374.73	1214674.95	3.46%
Andosol húmico	Gruesa	0.40	37663786.71	15065514.68	21.47%
Andosol ocrico	Media	0.20	4480753.91	896150.78	2.55%
Andosol ocrico	Gruesa	0.40	2076072.80	830429.12	1.18%
Andosol ocrico	Gruesa	0.40	46871740.15	18748696.06	26.71%
Andosol ocrico	Gruesa	0.40	7688766.51	3075506.60	4.38%
Andosol ocrico	Media	0.20	14798807.31	2959761.46	8.43%
Andosol ocrico	Media	0.20	16240953.47	3248190.69	9.26%
Litosol	Gruesa	0.40	385792.90	154317.16	0.22%
Luvisol crómico	Fina	0.10	2755021.27	275502.13	1.57%
Luvisol crómico	Fina	0.10	24125113.32	2412511.33	13.75%
Luvisol vertico	Fina	0.10	679.32	67.93	0.00%
			175464147.03	50111651.36	100.00%
		$k_{fc} =$	0.29		
		$k_{fc} =$	0.20		

Tabla 21. Coeficiente de infiltración por textura de suelo para la estación Los Chorros del Varal.

Rangos de valores $k_{fc}$	Valor final $k_{fc}$
$V_{pp} < 0.20$	0.10
$0.20 \leq V_{pp} \leq 0.30$	0.20
$0.30 < V_{pp} \leq 0.40$	0.40

Tabla 22. Rango de valores para asignación final del valor del coeficiente  $k_{fc}$ .



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

María Isabel Maldonado Mercado

## TANCÍTARO

### ESTACIÓN LOS CHORROS DEL VARAL

$k_p$	Área	$k_p * \text{Área}$	% Área
0.06	115037.00	6902.22	0.07%
0.06	133693.92	8021.63	0.08%
0.06	479919.99	28795.20	0.27%
0.06	230074.00	13804.44	0.13%
0.06	345860.09	20751.61	0.20%
0.06	115037.00	6902.22	0.07%
0.06	4829133.61	289748.02	2.77%
0.06	435689.31	26141.36	0.25%
0.06	2004559.66	120273.58	1.15%
0.06	78760.91	4725.65	0.05%
0.06	115037.00	6902.22	0.07%
0.06	78760.91	4725.65	0.05%
0.06	5466433.08	327985.99	3.13%
0.06	78760.91	4725.65	0.05%
0.06	309092.72	18545.56	0.18%
0.06	2949864.36	176991.86	1.69%
0.06	367972.88	22078.37	0.21%
0.06	78760.91	4725.65	0.05%
0.06	52550784.92	3153047.09	30.10%
0.06	25154083.63	1509245.02	14.41%
0.10	1706080.93	170608.09	0.98%
0.10	230074.00	23007.40	0.13%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	2790304.50	279030.45	1.60%
0.10	1729548.70	172954.87	0.99%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	423473.31	42347.33	0.24%
0.10	3182020.05	318202.00	1.82%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	5168.02	516.80	0.00%
0.10	115037.00	11503.70	0.07%
0.10	345111.01	34511.10	0.20%
0.10	115037.00	11503.70	0.07%
0.10	153704.60	15370.46	0.09%
0.10	1074806.78	107480.68	0.62%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%



Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán

María Isabel Maldonado Mercado

$k_p$	Área	$k_p * \text{Área}$	% Área
0.10	78759.97	7876.00	0.05%
0.10	115037.00	11503.70	0.07%
0.10	305567.04	30556.70	0.17%
0.10	115037.00	11503.70	0.07%
0.10	230570.77	23057.08	0.13%
0.10	230570.77	23057.08	0.13%
0.10	12649.60	1264.96	0.01%
0.10	73668.37	7366.84	0.04%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	160499.93	16049.99	0.09%
0.10	117435.20	11743.52	0.07%
0.10	78760.91	7876.09	0.05%
0.10	33228831.49	3322883.15	19.03%
0.10	30784914.41	3078491.44	17.63%
0.15	73668.37	11050.26	0.04%
0.15	157072.06	23560.81	0.09%
0.15	78760.91	11814.14	0.05%
0.15	78760.91	11814.14	0.05%
0.15	49363.71	7404.56	0.03%
0.15	73668.37	11050.26	0.04%
0.15	78760.91	11814.14	0.05%
0.15	78760.91	11814.14	0.05%
0.18	73668.37	12891.97	0.04%
	174613796.02	13663652.86	100.00%

$$k_p = 0.08$$

$$k_p = 0.06$$

Tabla 23. Coeficiente de infiltración por pendiente para la estación Los Chorros del Varal.

Rangos de valores $k_p$	Valor final $k_p$
$V_{pp} \leq 0.08$	0.06
$0.080 < V_{pp} < 0.125$	0.10
$0.125 \leq V_{pp} < 0.175$	0.15
$0.175 \leq V_{pp} < 0.200$	0.175
$0.200 \leq V_{pp} < 0.250$	0.20
$0.250 \leq V_{pp} \leq 0.30$	0.30

Tabla 24. Rango de valores para asignación final del valor del coeficiente  $k_p$ .



María Isabel Maldonado Mercado

De acuerdo con lo anterior se presentan los municipios de estudio con los valores correspondientes de  $k_v$ ,  $k_{fc}$  y  $k_p$  según Schosinsky y Losilla (2000) para cada uno de éstos.

### Tancítaro

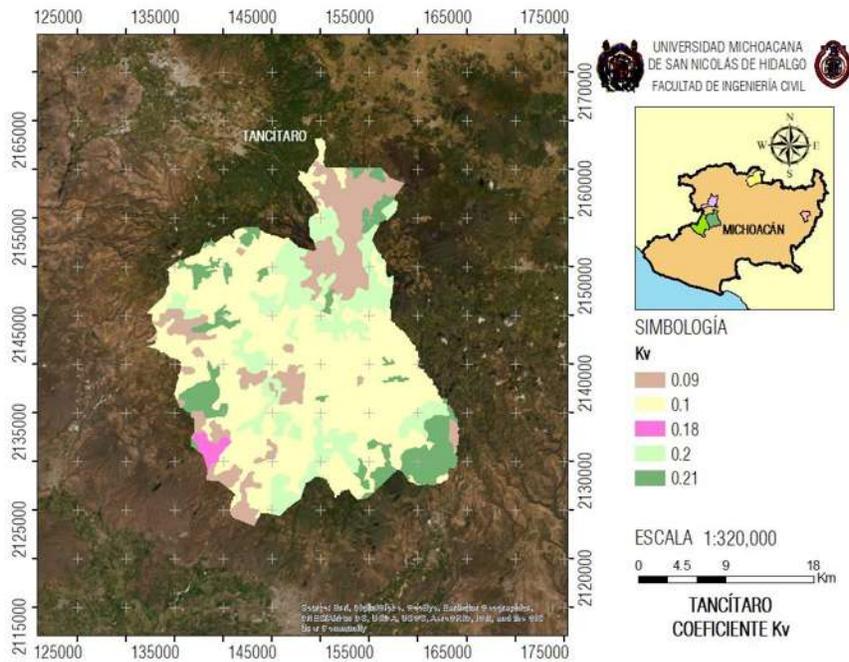


Ilustración 46 Coeficiente  $k_v$  para el municipio de Tancítaro.

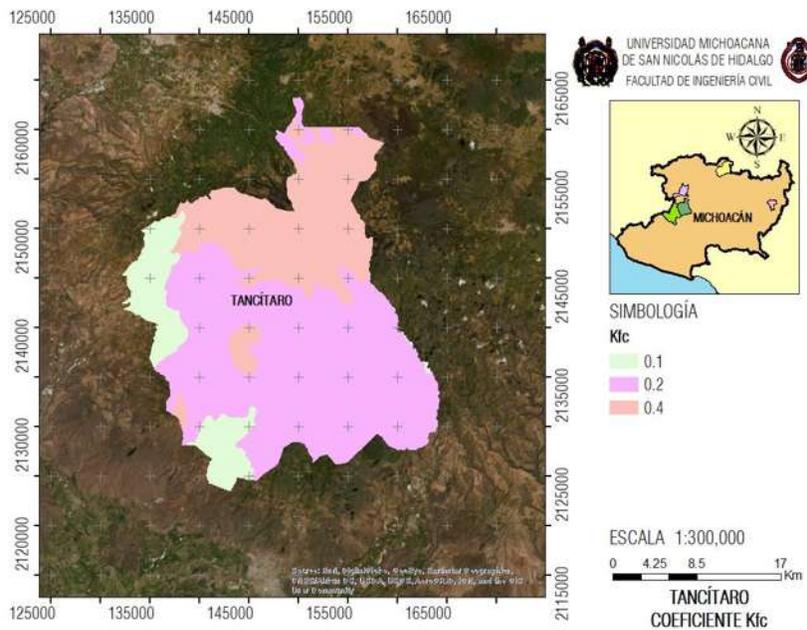


Ilustración 47 Coeficiente  $k_{fc}$  para el municipio de Tancítaro.

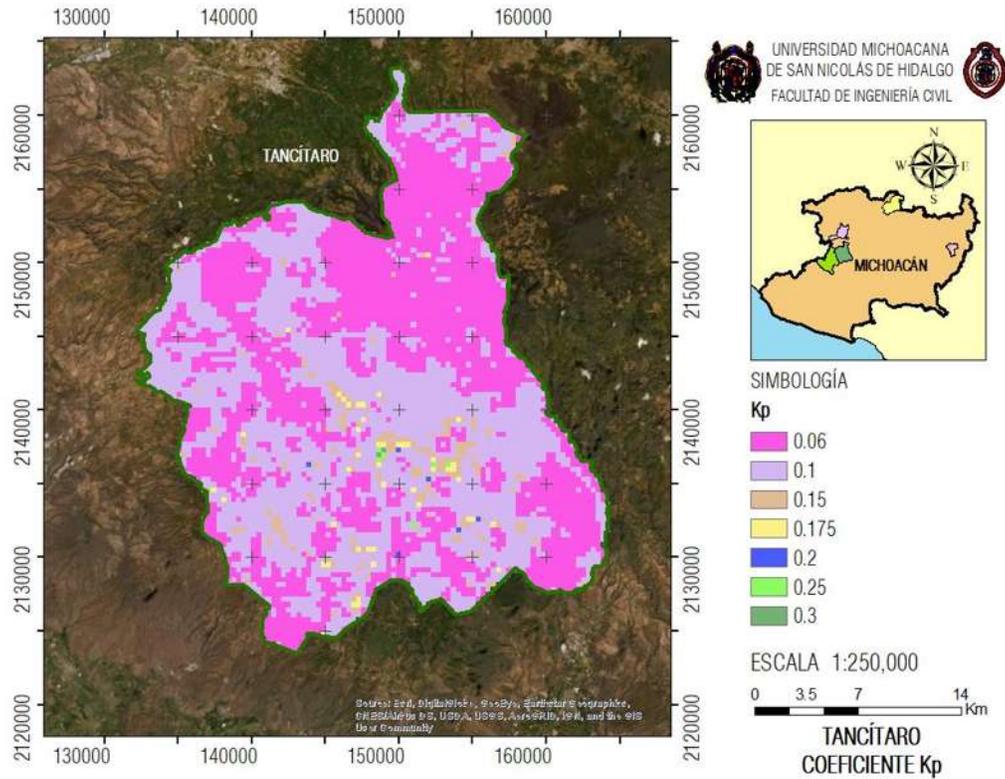


Ilustración 48 Coeficiente  $k_p$  para el municipio de Tancitaro.

TANCÍTARO						
ESTACIÓN	CLAVE	$k_{fc}$	$k_v$	$k_p$	KI	
Los Chorros del Varal	16072	0.20	0.10	0.06	0.36	
Acahuato	16228	0.20	0.10	0.10	0.40	
Uruapan (CFE)	16165	0.40	0.20	0.06	0.66	

Tabla 25. Coeficientes  $k_v$ ,  $k_{fc}$ ,  $k_p$  y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Tancitaro.



### Jungapeo

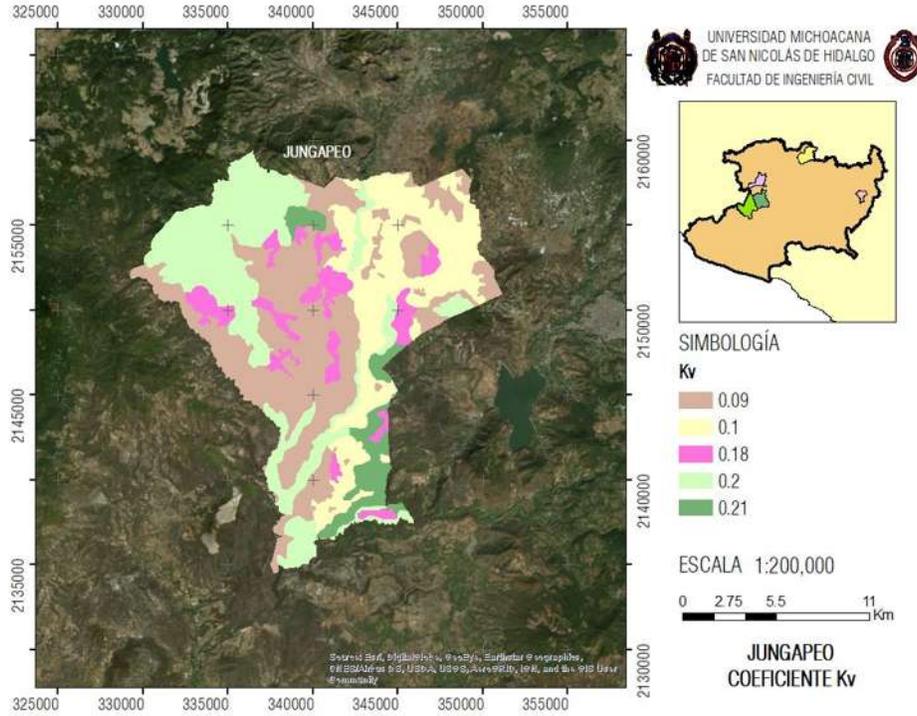


Ilustración 49 Coeficiente  $k_v$  para el municipio de Jungapeo.

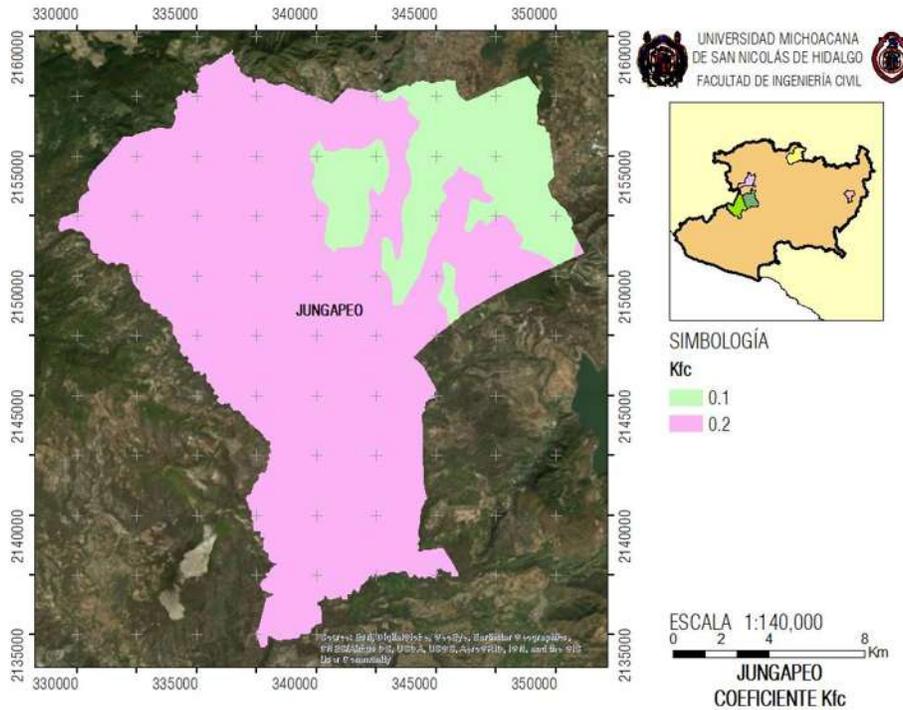


Ilustración 50 Coeficiente  $k_{rc}$  para el municipio de Jungapeo.

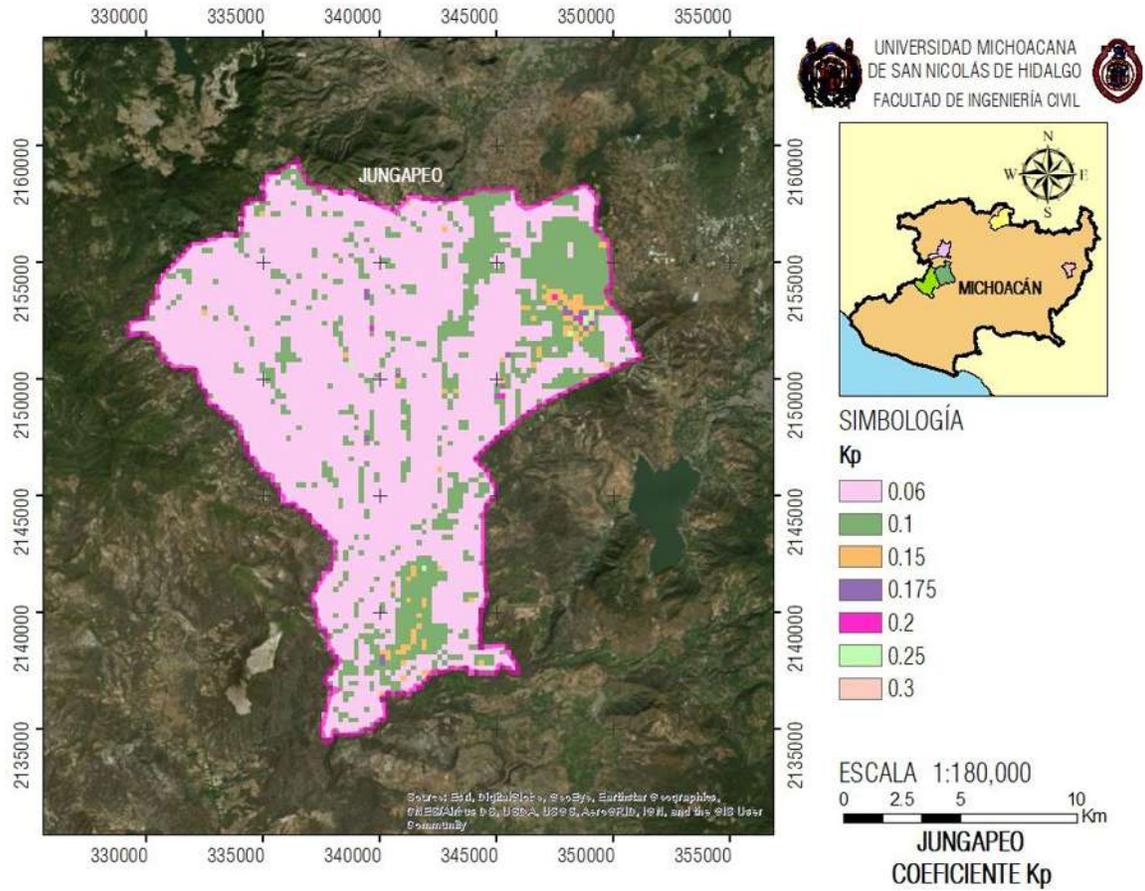


Ilustración 51 Coeficiente  $k_p$  para el municipio de Jungapeo.

**JUNGAPEO**

ESTACIÓN	CLAVE	$k_{fc}$	$k_v$	$k_p$	KI
Agostitlán	16002	0.20	0.18	0.06	0.44
Presa Tuxpan (CFE)	16099	0.10	0.10	0.06	0.26
Jungapeo	16058	0.20	0.10	0.06	0.36
La encarnación	16192	0.20	0.18	0.06	0.44
Tuzantla (SMN)	16135	0.20	0.18	0.06	0.44

Tabla 26. Coeficientes  $k_v$ ,  $k_{fc}$ ,  $k_p$  y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Jungapeo.



**BUENAVISTA**

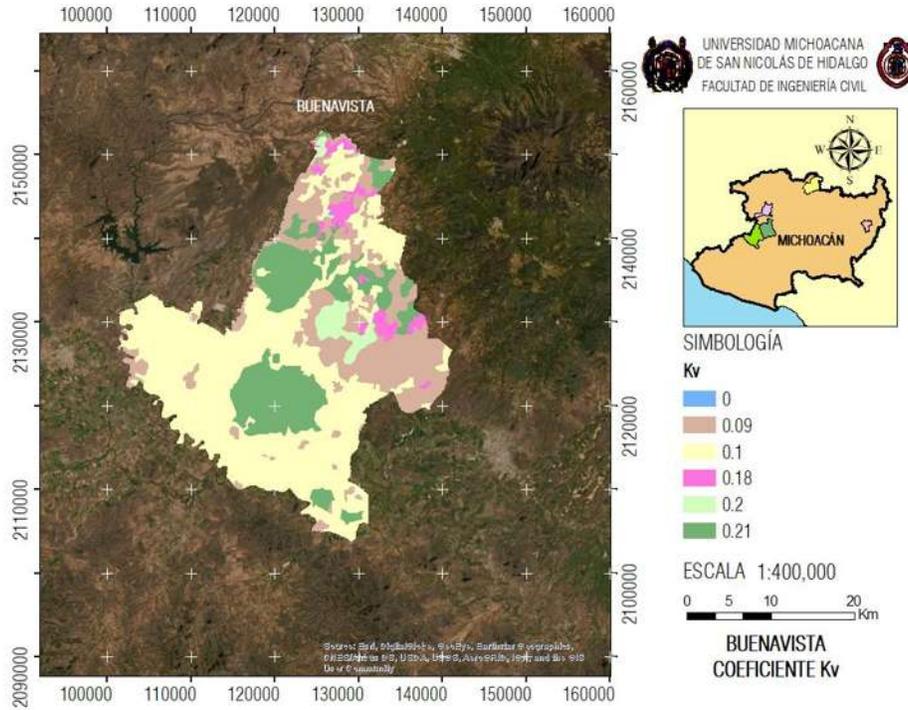


Ilustración 52 Coeficiente  $k_v$  para el municipio de Buena Vista.

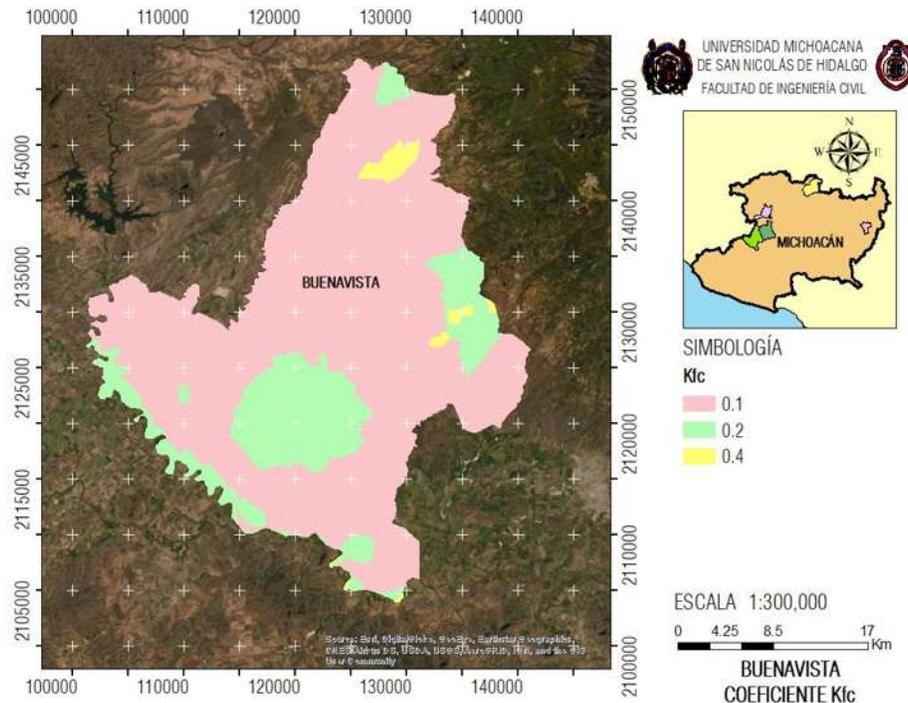


Ilustración 53 Coeficiente  $k_{lc}$  para el municipio de Buena Vista.

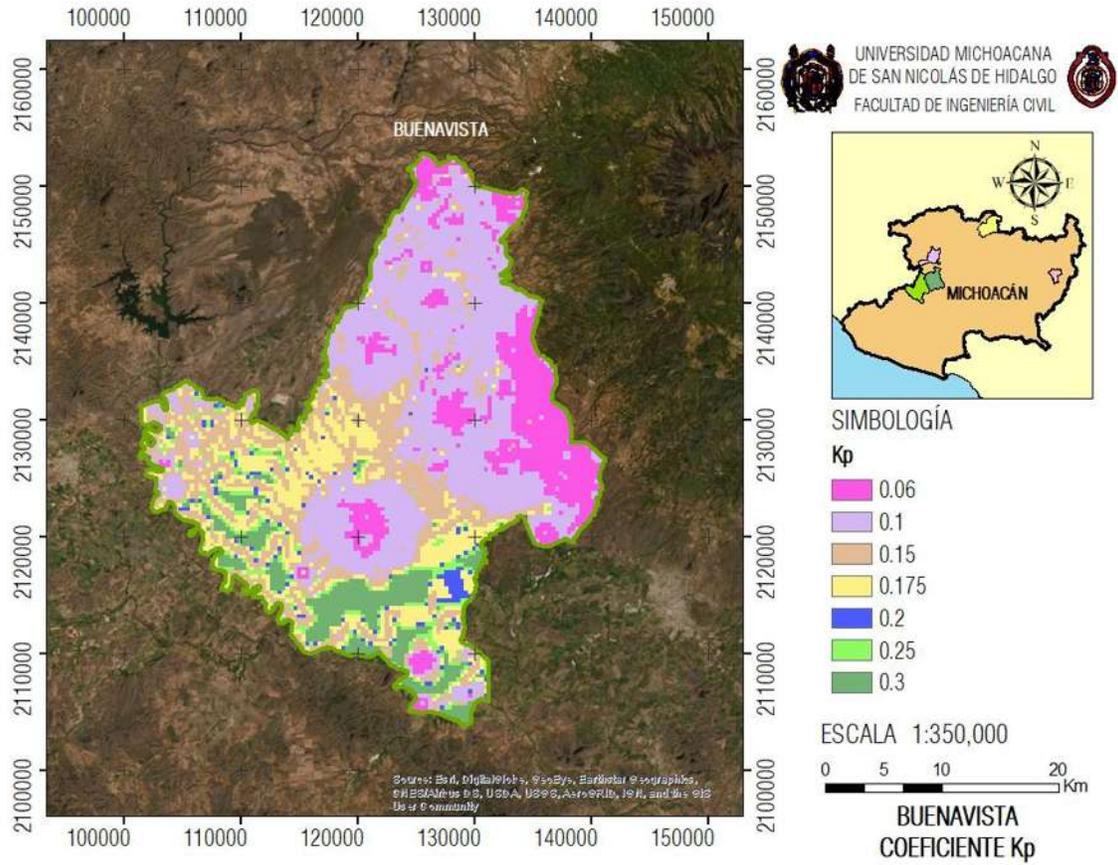


Ilustración 54 Coeficiente  $k_p$  para el municipio de Buenavista.

BUENAVISTA					
ESTACIÓN	CLAVE	$k_{fc}$	$k_v$	$k_p$	KI
Piedras Blancas (CFE)	16090	0.10	0.10	0.30	0.39
El Cajón	16158	0.10	0.10	0.30	0.39
Acahuato	16228	0.10	0.10	0.10	0.30
Los Chorros del Varal	16072	0.10	0.10	0.10	0.30

Tabla 27. Coeficientes  $k_v$ ,  $k_{fc}$ ,  $k_p$  y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Buenavista.



**LOS REYES**

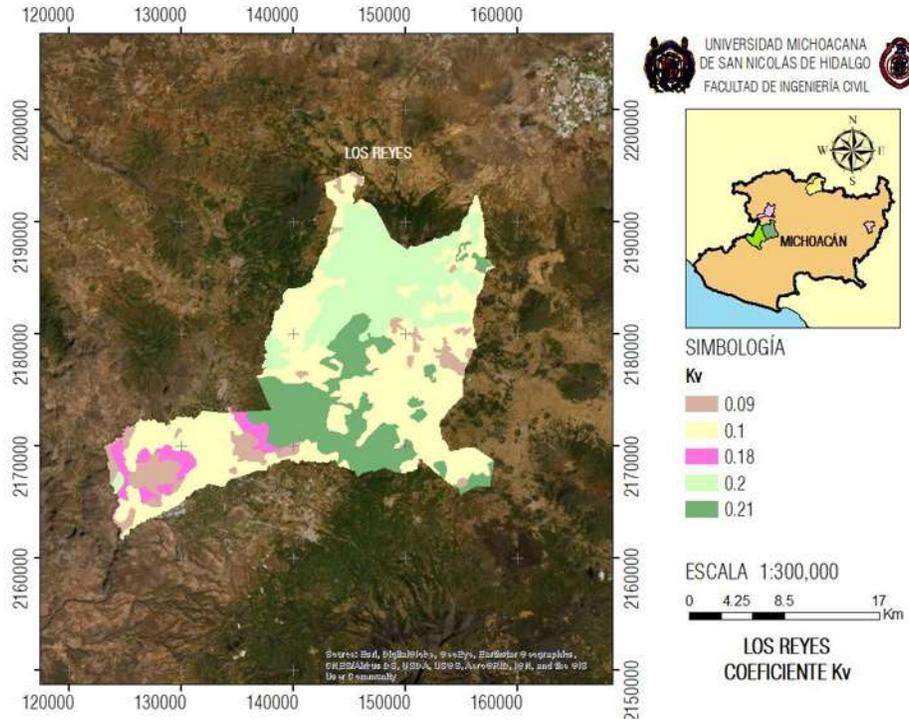


Ilustración 55 Coeficiente  $k_v$  para el municipio de Los Reyes.

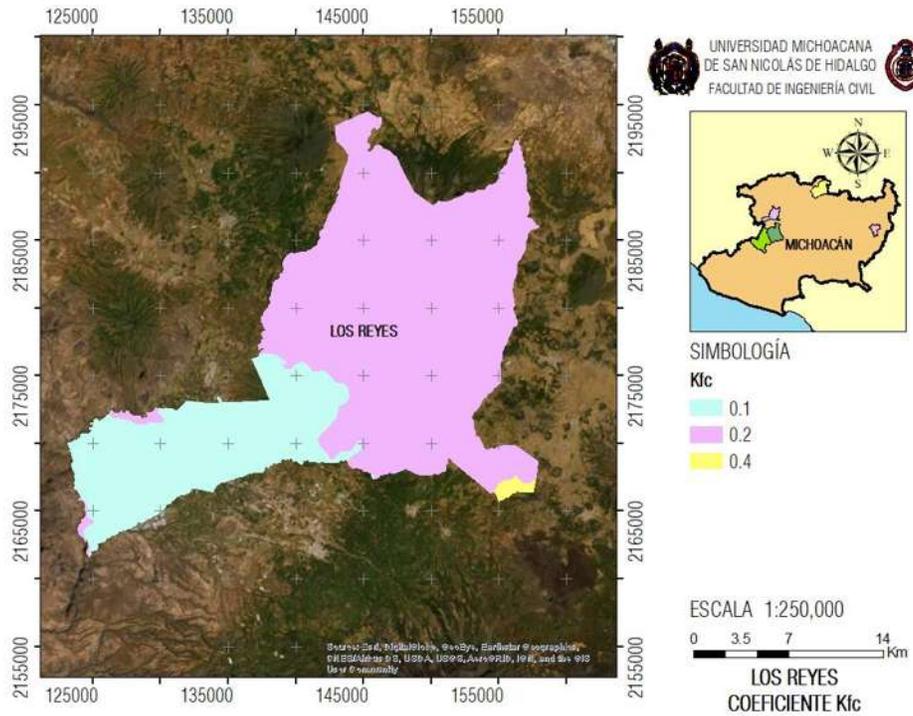


Ilustración 56 Coeficiente  $k_{rc}$  para el municipio de Los Reyes.

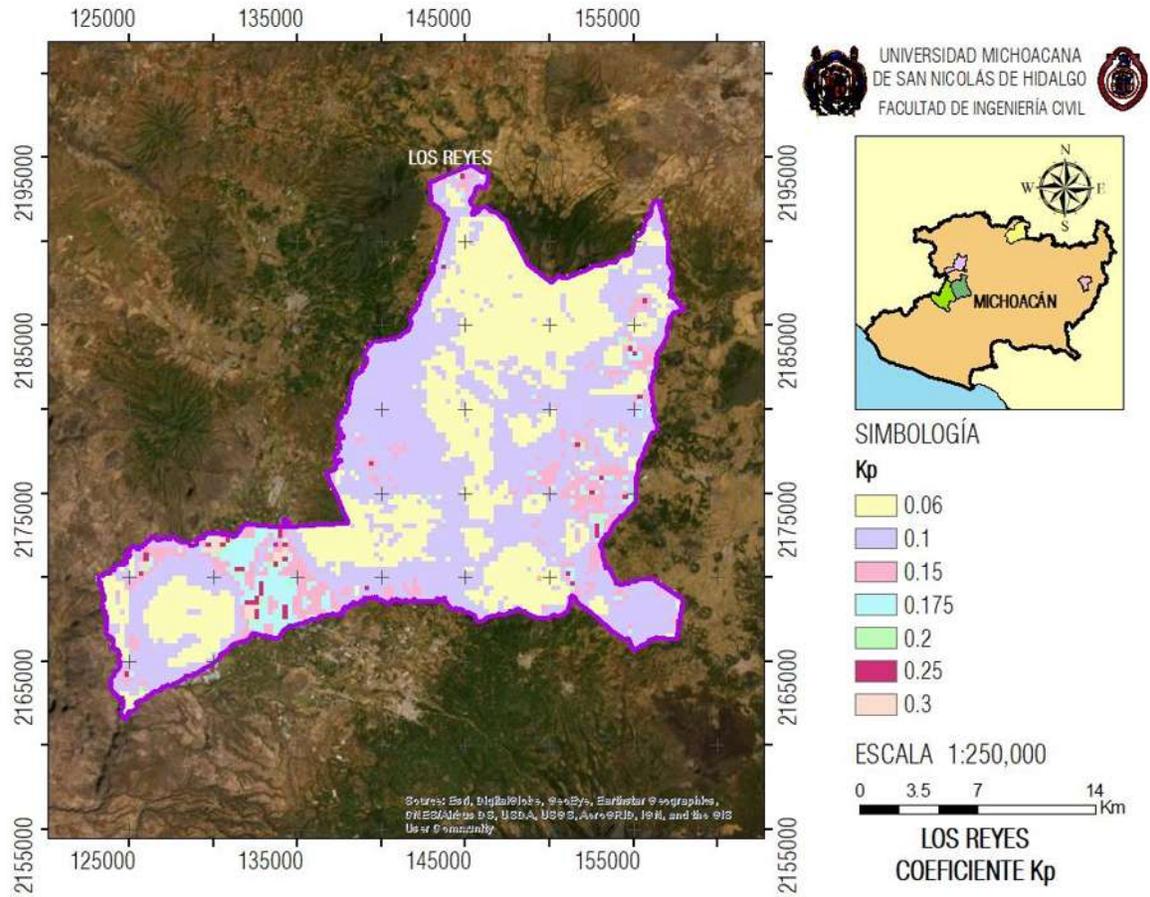


Ilustración 57 Coeficiente  $k_p$  para el municipio de Los Reyes.

LOS REYES						
ESTACIÓN	CLAVE	$k_{fc}$	$k_v$	$k_p$	KI	
Patambán	16251	0.20	0.18	0.06	0.44	
Charapan	16032	0.20	0.10	0.10	0.40	
E.T.A. 039 Tocumbo	16194	0.20	0.18	0.10	0.48	
Los Limones (CFE)	16073	0.10	0.10	0.10	0.30	
Los Reyes	16077	0.10	0.18	0.10	0.38	
Peribán	16088	0.20	0.18	0.10	0.48	
Los Chorros del Varal (CFE)	16072	0.10	0.10	0.10	0.30	

Tabla 28. Coeficientes  $k_v$ ,  $k_{fc}$ ,  $k_p$  y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Los Reyes.



**PURUÁNDIRO**

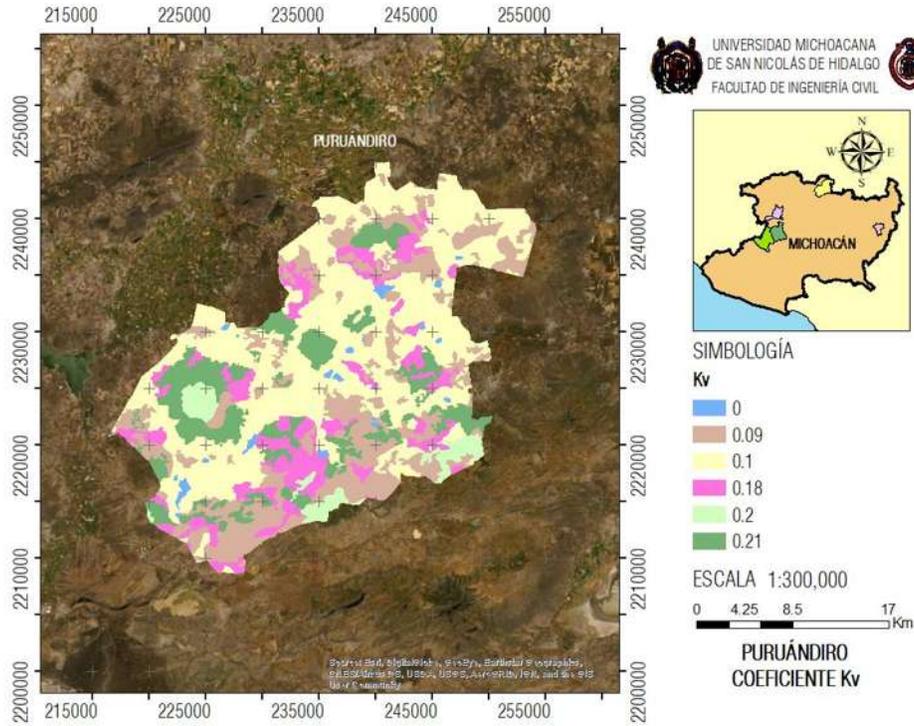


Ilustración 58 Coeficiente  $k_v$  para el municipio de Puruándiro.

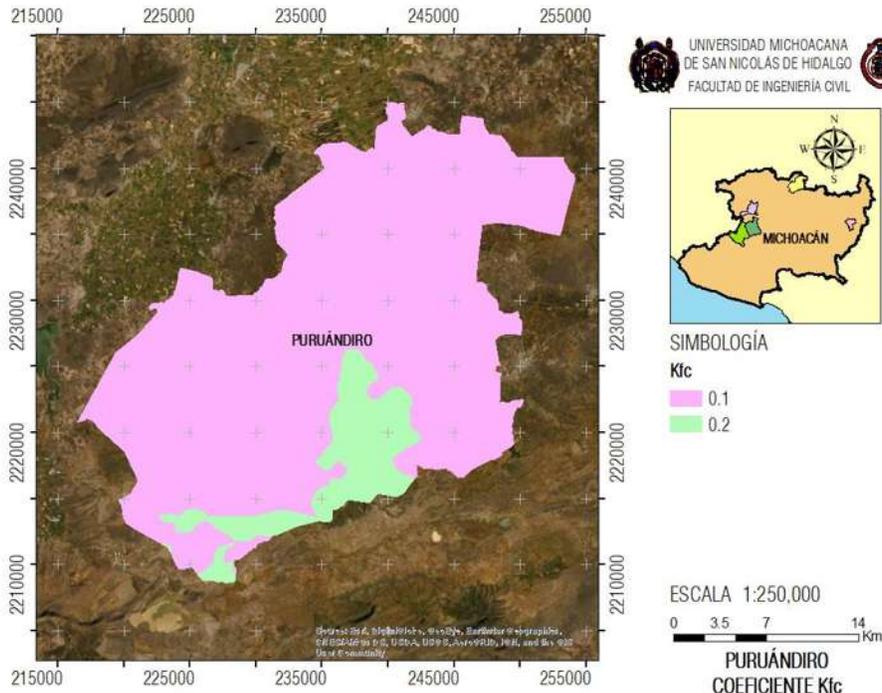


Ilustración 59 Coeficiente  $k_{rc}$  para el municipio de Puruándiro.



María Isabel Maldonado Mercado

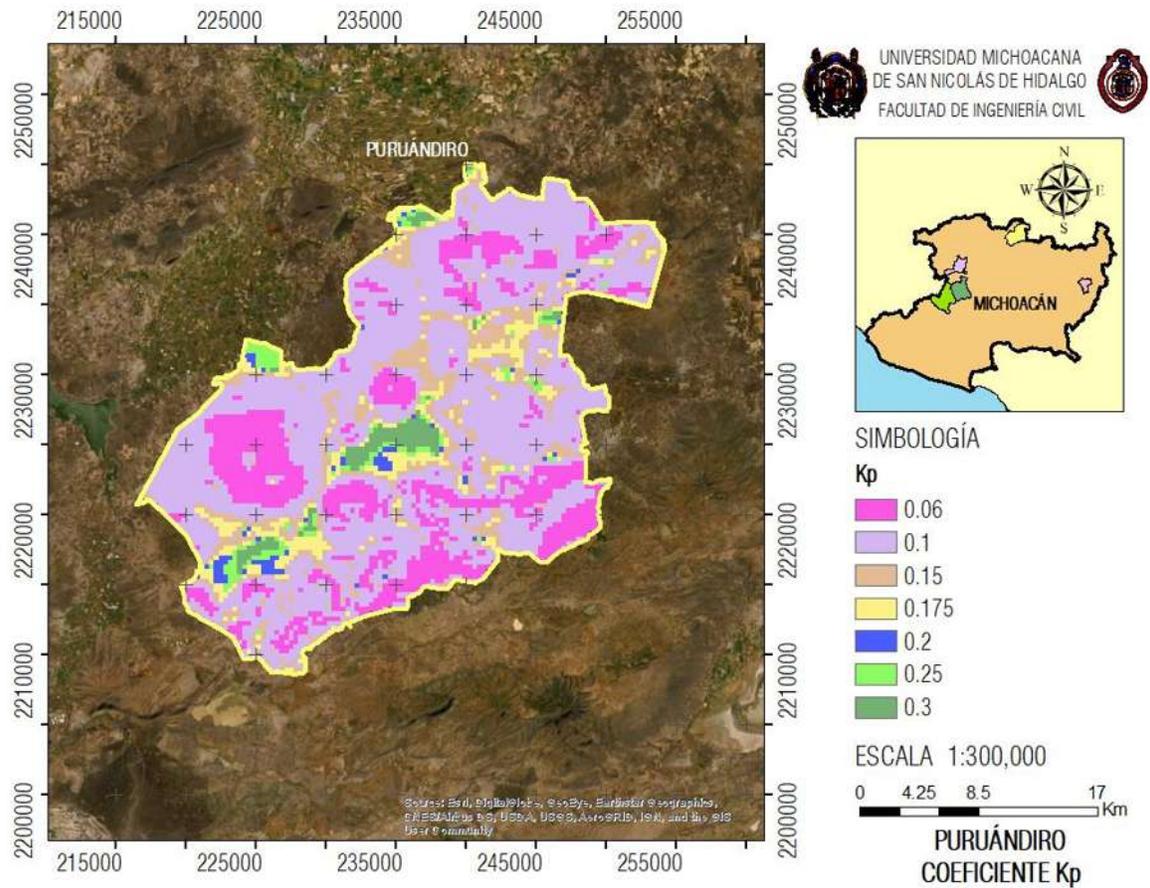


Ilustración 60 Coeficiente  $k_p$  para el municipio de Puruándiro.

PURUÁNDIRO						
ESTACIÓN	CLAVE	$k_{fc}$	$k_v$	$k_p$	KI	
Casa Blanca	16017	0.10	0.10	0.10	0.30	
Las Jícamas	11146	0.10	0.10	0.10	0.30	
Cerano	11010	0.20	0.10	0.10	0.40	
Puruándiro	16104	0.20	0.10	0.10	0.40	
Galeana	16234	0.10	0.18	0.10	0.38	
El Rosario	16159	0.10	0.10	0.06	0.26	
Copándaro	16155	0.10	0.10	0.10	0.30	

Tabla 29. Coeficientes  $k_v$ ,  $k_{fc}$ ,  $k_p$  y KI promedio para las estaciones de influencia del municipio de Puruándiro.



#### 4.2.5 Coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular

De acuerdo al apartado 3.6.6 se empleó el valor  $p$  de la **Tabla 11** para utilizarse como equivalente al coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular de los cultivos de estudio, **Ecuación 14**.

Al tener distintos climas para cada uno de los municipios se procedió a emplear el ajuste de  $p$  utilizando la **Ecuación 13** para cada uno de éstos, teniendo un valor de  $p$  para cada mes de desarrollo del cultivo en función de tres condiciones de clima: *cálido y seco*, *templado* y por último *frío*. Con referencia a los valores de corrección de  $p$  se optó por utilizar el promedio de los valores que presenta la *FAO* en el *Manual 56*.

De lo anterior, dado que se utiliza el promedio del rango de los valores de corrección por clima se decidió no incluir la corrección por textura de suelo al ser mínimo el porcentaje de ajuste y por considerarse que por emplear el promedio de la corrección por clima éste valor de ajuste queda cubierto.

Para los climas considerados se empleó el siguiente criterio para la corrección del valor  $p$ .

Clima	Ajuste
Cálido y seco	$p - 0.175$
Templado	$p$
Frío	$p + 0.1$

**Tabla 30.** Criterio de ajuste para el valor de  $p$ .

Para los municipios de Tancítaro, Buenavista y Los Reyes se empleó el ajuste para clima cálido y seco por igual para todos los meses considerados del desarrollo del cultivo en estudio. Para tomar la decisión anterior fue necesario consultar la literatura relacionada al clima de dichos municipios, sin embargo, ésta manejaba un clima templado y de acuerdo al conocimiento propio de la zona se conoce que los climas son calurosos aunado a que se consultaron los registros de temperatura del *SMN* para las estaciones empleadas y con base a esto se optó por dicho ajuste.

De lo anterior se llega a los resultados contenidos en la **Tabla 31** para la estación *Los Chorros del Varal*, en el municipio de Tancítaro. Los cálculos para las estaciones restantes de cada uno de los municipios de estudio se omiten por tratarse de la misma metodología empleada.



Mes	Clima	
	p	Pr
ENERO	0.85	0.68
FEBRERO	0.83	0.65
MARZO	0.79	0.61
ABRIL	0.74	0.57
MAYO	0.70	0.53
JUNIO	0.69	0.51
JULIO	0.74	0.57
AGOSTO	0.75	0.57
SEPTIEMBRE	0.79	0.61
OCTUBRE	0.80	0.63
NOVIEMBRE	0.83	0.65
DICIEMBRE	0.85	0.68

**Tabla 31.** Valor de p ajustado para la estación *Los Chorros del Varal* del municipio de Tancitaro.

#### 4.2.6 Valores de eficiencia en el manejo del agua y del sistema de riego

De los valores de la **Tabla 8** y **Tabla 9** derivado de un análisis de sensibilidad se decide contemplar dos escenarios para el cálculo final del CUR, siendo éstos los siguientes:

1. *Método de riego eficiente y un manejo bueno de la eficiencia del riego.*  
Se consideran los porcentajes promedio más altos de los valores de eficiencia del manejo del agua y del sistema de riego correspondientes a los métodos de riego en melgas rectas en pendiente y un sistema de riego por goteo o aspersión.
2. *Método de riego poco eficiente y manejo pobre de la eficiencia del riego.*  
Considera los porcentajes promedio más bajos de los valores de eficiencia del manejo del agua y del sistema de riego por un método de surcos y corrugaciones y un sistema de riego en surcos o melgas.

Esta decisión se tomó debido a que los métodos de riego varían aún para un mismo cultivo, ya que el tener un método eficiente de riego está condicionado a factores económicos, técnicos y sociales. Dado lo anterior no se tiene uniformidad en los municipios para los métodos de riego y de igual manera para los manejos de la eficiencia del riego.



Por lo cual se presentan los valores empleados para cada uno de los escenarios contemplados para el cálculo del CUR.

Eficiencia del manejo del agua ( $\eta_M$ )	Eficiencia del sistema de riego ( $\eta_R$ )
Riego por pozas o melgas sin pendientes	Sistema de riego por goteo
SCS(%)	Manejo bueno (%)
70.00	72.50

**Tabla 32.** Valores para un método de riego eficiente y un manejo bueno de la eficiencia del riego.

Eficiencia del manejo del agua ( $\eta_M$ )	Eficiencia del manejo de riego ( $\eta_R$ )
Riego por desbordamiento	Sistema de riego por surcos
SCS(%)	Manejo pobre (%)
52.50	40.00

**Tabla 33.** Valores para un método de riego poco eficiente y manejo pobre de la eficiencia del riego.

#### 4.2.7 Cálculo del Coeficiente Unitario de Riego

Una vez reunidos todos los datos necesarios para proceder al cálculo del CUR éstos se concentraron en una tabla para cada uno de los municipios de estudio y cada una de las estaciones de influencia.

En la **Tabla 34** se muestra el concentrado de datos para la estación *Los Chorros del Varal*, en el municipio de Tancítaro y los valores obtenidos del CUR para la estación y municipios mencionados anteriormente.

Al utilizar la misma secuencia y metodología de cálculo del CUR para los municipios y estaciones restantes se omiten las tablas de cálculo y se presentan únicamente los gráficos con los resultados obtenidos.



Superficie Cultivada (Ha) = 1

$KI_1 =$	0.36	$\eta_r$	0.40
		$\eta_m$	0.53

Clima

Cálido y Seco ▼

MES	$p$	$p_f$	$I_{LL}$ Efectiva mm	$I_{LR}$ Neta mm	$I_{LR}$ Bruta mm	$I_{LR}$ Diaria mm	Volumen Demandado $m^3$	CUR $m^3/s-m^2$	CUR lt/s-ha
ENERO	0.85	0.68	23.53	12.86	61.24	2.04	20.41	2.363E-08	0.24
FEBRERO	0.83	0.65	5.32	44.37	211.27	7.04	70.42	8.151E-08	0.82
MARZO	0.79	0.61	8.04	80.65	384.03	12.80	128.01	1.482E-07	1.48
ABRIL	0.74	0.57	4.66	113.00	538.11	17.94	179.37	2.076E-07	2.08
MAYO	0.70	0.53	15.19	137.81	656.26	21.88	218.75	2.532E-07	2.53
JUNIO	0.69	0.51	20.33	138.48	659.43	21.98	219.81	2.544E-07	2.54
JULIO	0.74	0.57	16.68	107.32	511.03	17.03	170.34	1.972E-07	1.97
AGOSTO	0.75	0.57	23.43	95.93	456.81	15.23	152.27	1.762E-07	1.76
SEPTIEMBRE	0.79	0.61	39.88	43.81	208.64	6.95	69.55	8.049E-08	0.80
OCTUBRE	0.80	0.63	13.65	60.78	289.41	9.65	96.47	1.117E-07	1.12
NOVIEMBRE	0.83	0.65	17.11	36.19	172.32	5.74	57.44	6.648E-08	0.66
DICIEMBRE	0.85	0.68	5.96	31.84	151.60	5.05	50.53	5.849E-08	0.58

Tabla 34. Cálculo del CUR para la estación *Los Chorros del Varal*, en el municipio de Tancitaro.

En los gráficos siguientes se muestran los coeficientes unitarios de riego para cada uno de los cultivos en el municipio correspondiente y estación climatológica de influencia, calculados para un área unitaria igual a 1 ha, por lo cual no se debe perder de vista que al emplear los coeficientes de los gráficos se tendrán que multiplicar por el área a considerar.

Para cada uno de los gráficos se considera el mes 1 al mes de enero, y así sucesivamente hasta el mes 12, siendo éste el mes de diciembre.

Para el gráfico del CUR para el cultivo de maíz el mes 1 se considera el mes de abril, siguiendo la sucesión numérica correspondiente a cada uno de los meses consecutivos para terminar con el mes 8, correspondiente al mes de noviembre.



### CUR AGUACATE

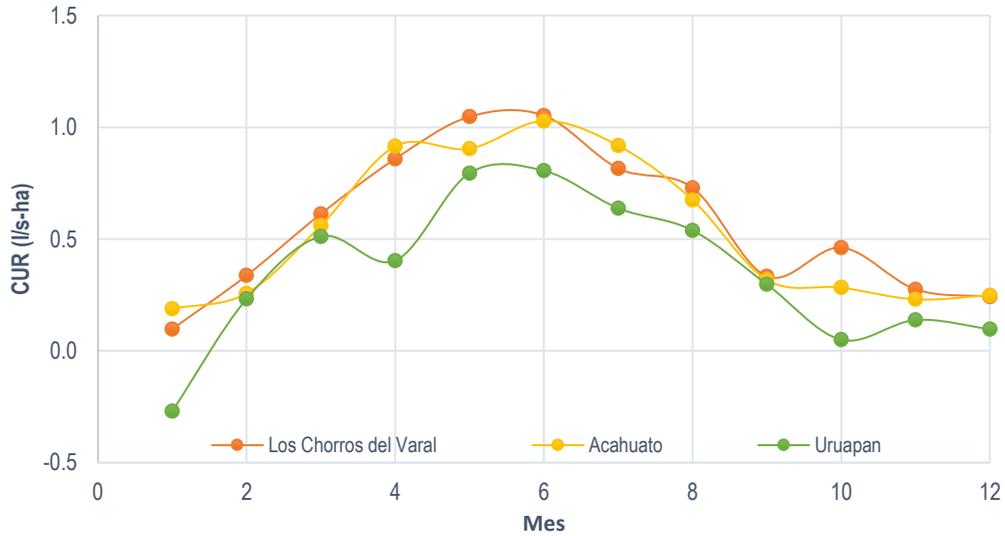


Gráfico XI. CUR para el aguacate por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Tancitaro, escenario 1.

### CUR AGUACATE

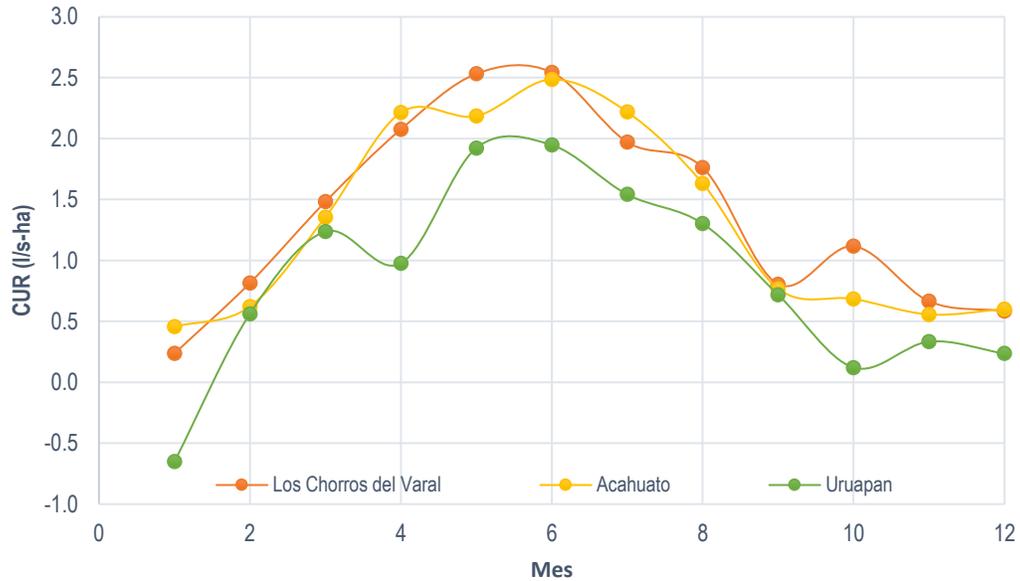


Gráfico XII. CUR para el aguacate por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Tancitaro, escenario 2.



### CUR GUAYABA

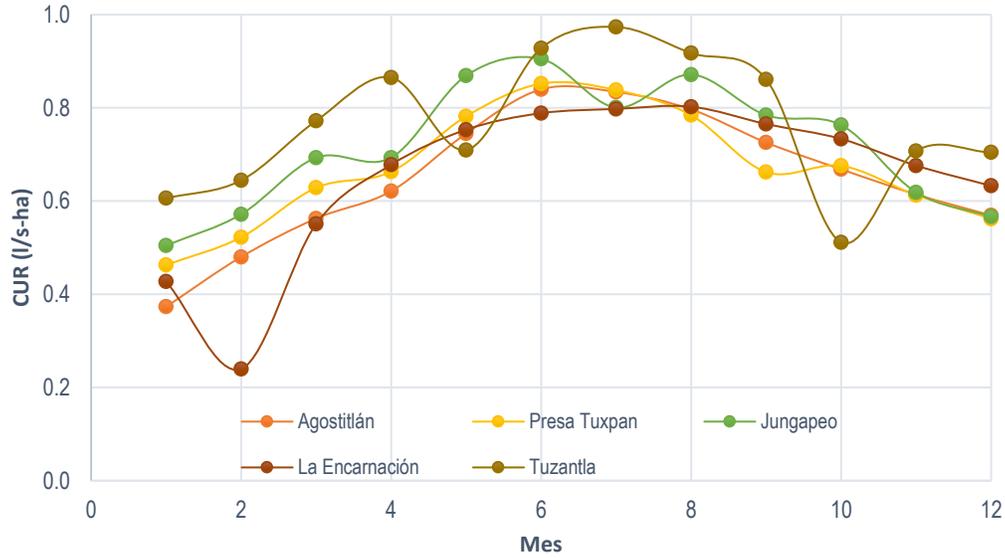


Gráfico XIII. CUR para la guayaba por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Jungapeo, escenario 1.

### CUR GUAYABA

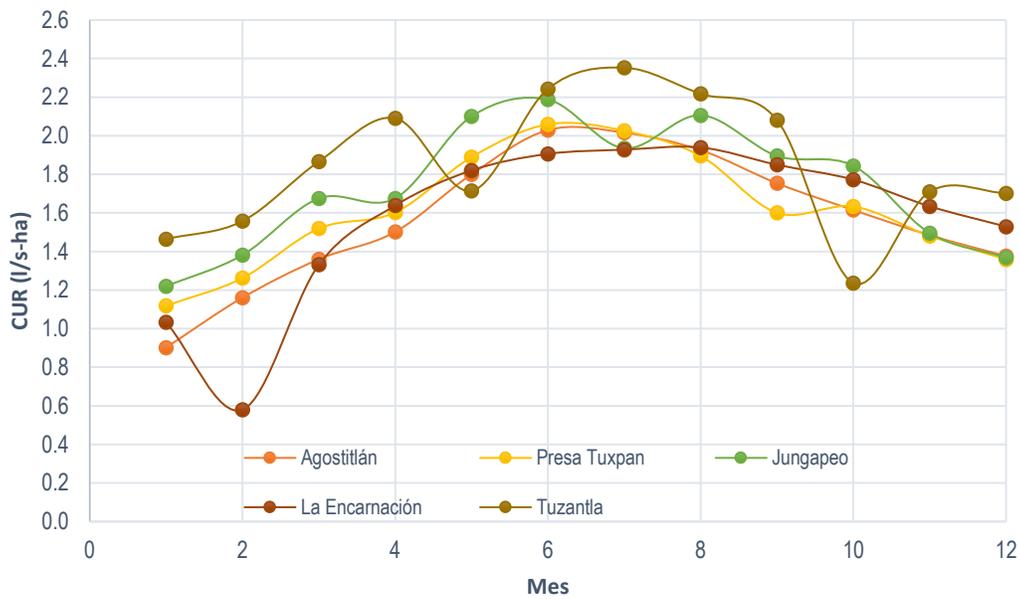


Gráfico XIV. CUR para la guayaba por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Jungapeo, escenario 2.



Gráfico XV. CUR para el limón por área de influencia de estación climatológica en el municipio Buenavista, escenario 1.

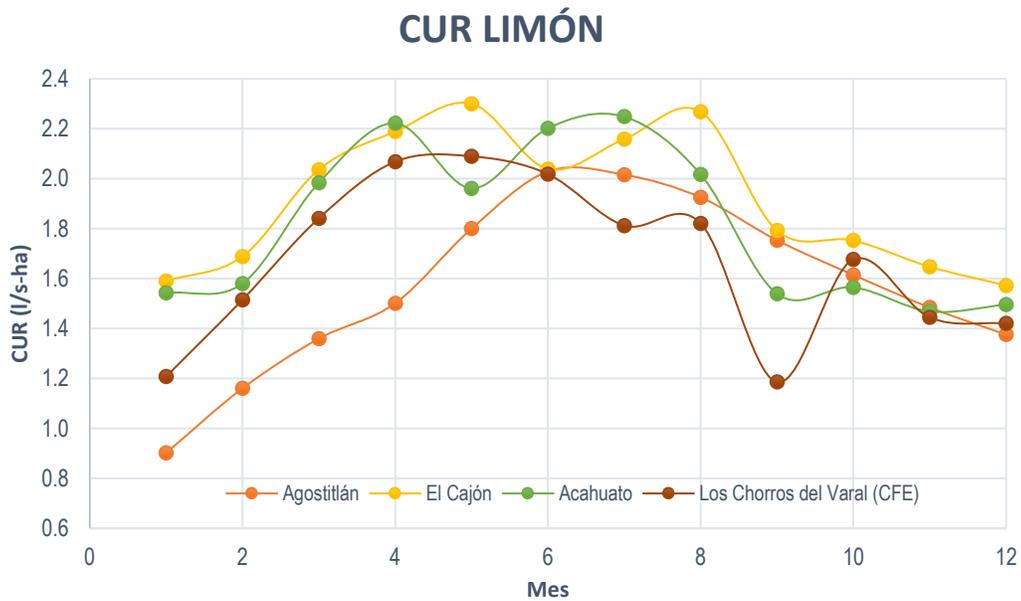


Gráfico XVI. CUR para el limón por área de influencia de estación climatológica en el municipio Buenavista, escenario 2.

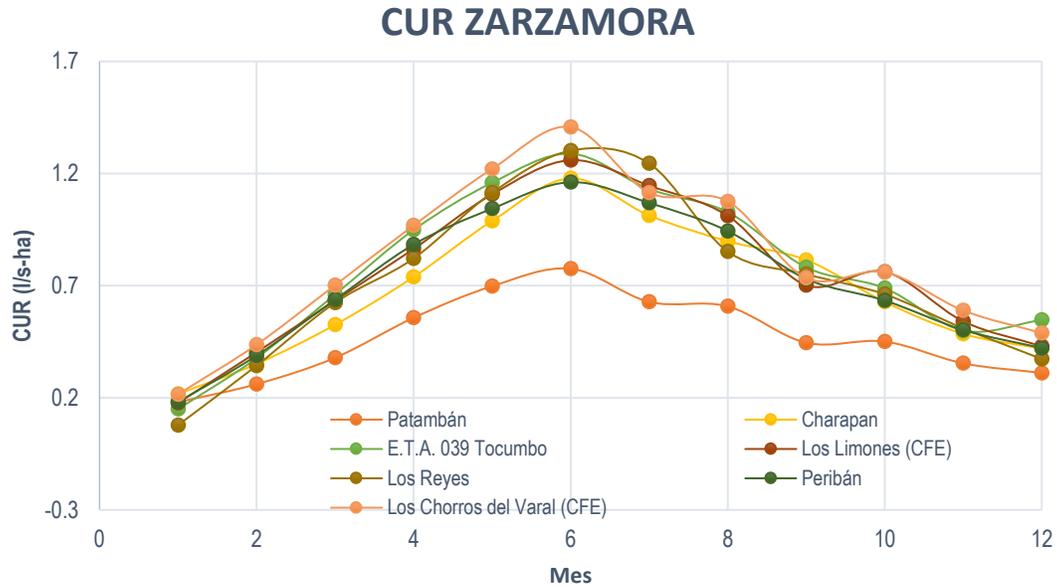


Gráfico XVII. CUR para la zarzamora por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Los Reyes, escenario 1.

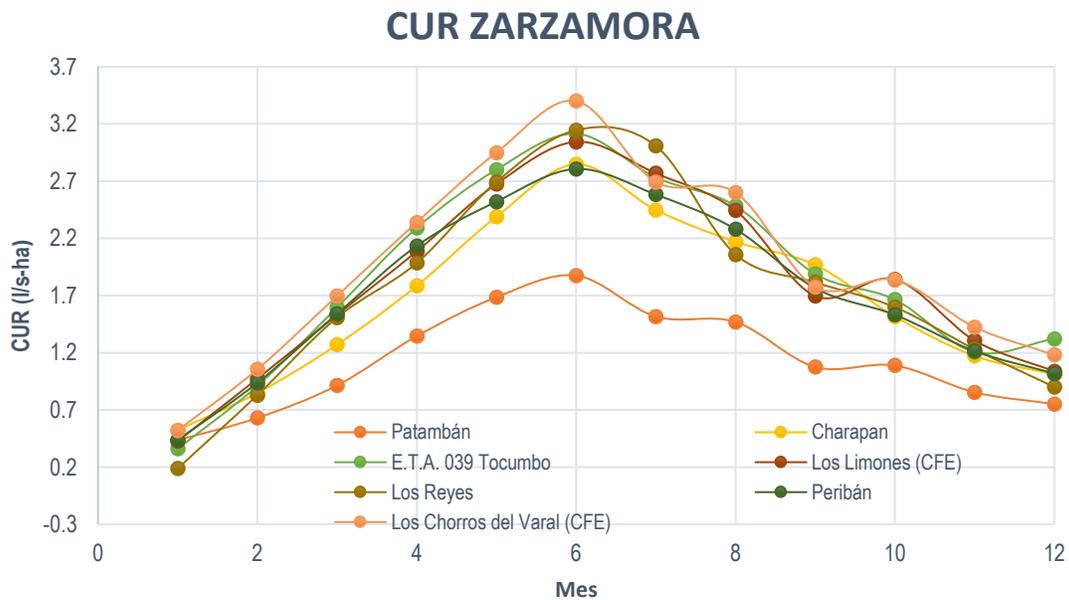


Gráfico XVIII. CUR para la zarzamora por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Los Reyes, escenario 2.

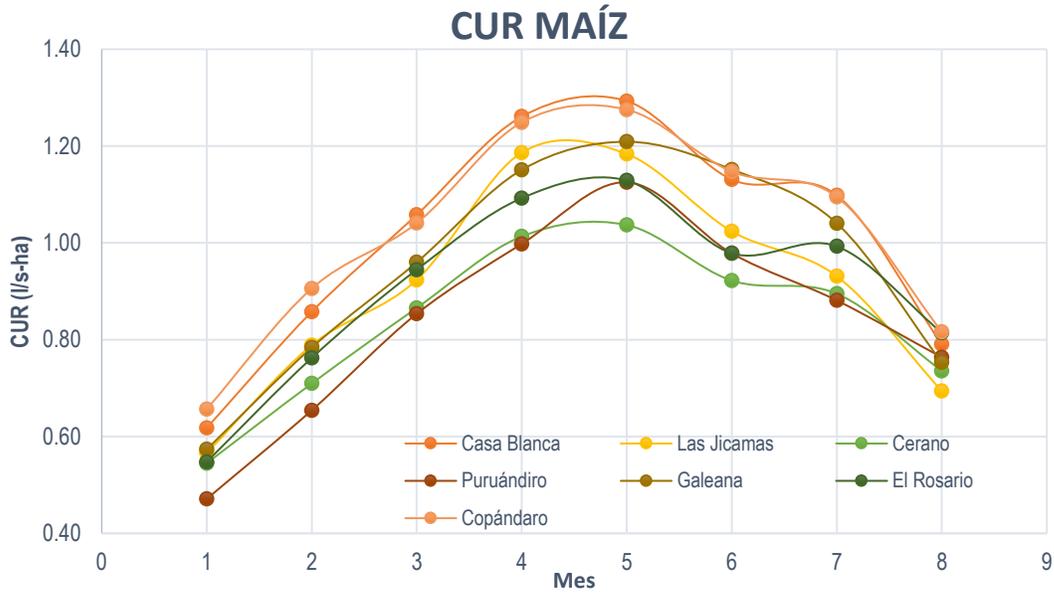


Gráfico XIX. CUR para el maíz por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Puruándiro, escenario 1.

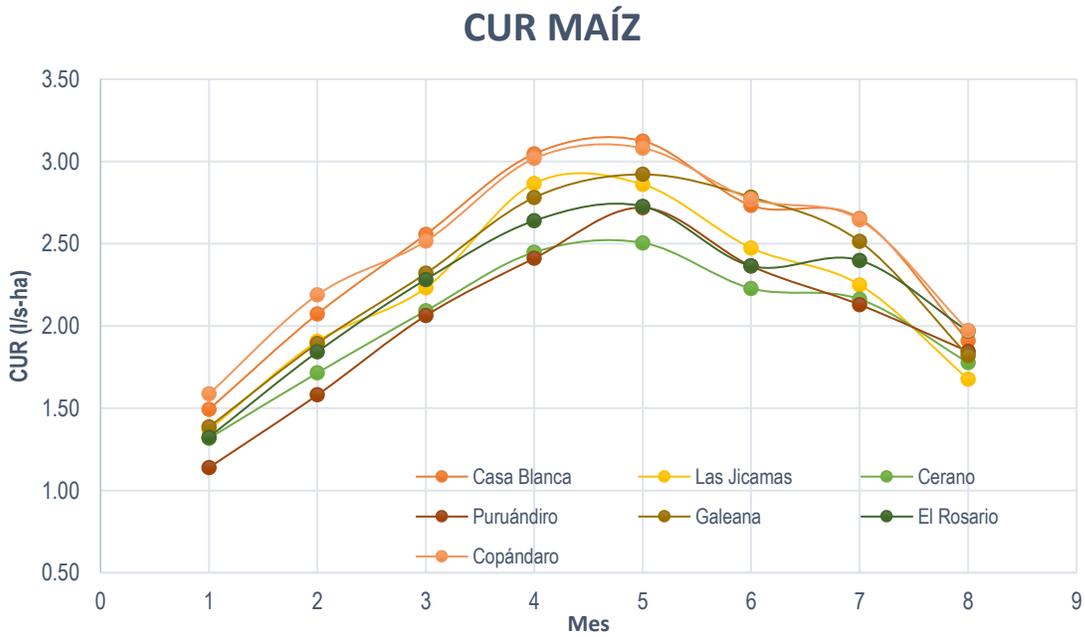


Gráfico XX. CUR para el maíz por área de influencia de estación climatológica en el municipio de Puruándiro, escenario 2



*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

---

María Isabel Maldonado Mercado

Los gráficos mostrados tanto para la ETP y el CUR fueron el resultado del desarrollo de una herramienta de cálculo para el estudio de cada uno de los cultivos analizados, donde el programa empleado fue Excel, por medio del cual en un libro con varias hojas de cálculo se concentró la información necesaria para llegar a la obtención del valor de la evapotranspiración de los cinco cultivos en análisis. Haciendo uso de las algunas fórmulas precargadas del programa y de la vinculación de celdas entre hojas del libro de cálculo, se obtuvieron resultados exactos en cuanto al valor de los cálculos realizados, así como una excelente optimización del tiempo empleado, sin embargo, la herramienta de cálculo desarrollada puede llegar a optimizar más el tiempo que se emplea agregando macros al libro de Excel, donde por motivos de alcances de los objetivos planteados no se desarrolló dicho procedimiento.



## CAPITULO V. DISCUSIÓN

### 5.1 CONCLUSIONES

El coeficiente global de desarrollo es uno de los parámetros necesarios para la investigación presentada en relación con las características fisiológicas de las plantas ya que participa en la determinación de la evapotranspiración de los cultivos que posteriormente conduce a la obtención del CUR. El CUR, permite calcular el volumen de agua necesario para cada uno de los cultivos de estudio donde también es indispensable el coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular de las plantas por la relación que existe entre el agua, la planta y el suelo siendo que dicho coeficiente proporciona el porcentaje de agua a la que la planta puede acceder sin llegar al punto de estrés hídrico del cultivo.

Con la obtención de los resultados del CUR y la distribución espacial de los cultivos de estudio en los municipios seleccionados fue posible la elaboración de gráficos de apoyo por área unitaria, se recomienda emplear dichos gráficos como apoyo para conocer el CUR de los cultivos en la zona de estudio correspondiente a cada uno de ellos, no obstante se recomienda realizar el análisis aquí presentado para las zonas específicas donde se desee conocer la necesidad hídrica del cultivo para la obtención de resultados exactos por la variación espacio-temporal que influye en los parámetros empleados que tienen relación con la edafología y climatología del sitio.

Derivado de los cálculos y procesamiento de la información necesaria reunida para los cultivos de aguacate, guayaba, limón, zarzamora y maíz en los municipios de Tancítaro, Jungapeo, Buenavista, Los Reyes y Puruándiro respectivamente, pertenecientes al estado de Michoacán, la ubicación espacial de los cultivos en la zonificación por las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas dentro de la extensión del municipio modifica las demandas de agua para la adecuada producción de éstos.

En conjunto con el párrafo anterior y en consecuencia del empleo de dos escenarios límites con el fin de conocer el grado de optimización de los volúmenes de agua demandados por el CUR para cada uno de los 5 cultivos de estudio en los municipios de mayor producción se obtuvo que, empleando el escenario de un *método de riego poco eficiente y manejo pobre de la eficiencia del riego* que considera los porcentajes promedio más bajos de los valores de eficiencia del manejo del agua y del sistema de riego por un método de surcos y corrugaciones y un sistema de riego en surcos o melgas el CUR aumenta aproximadamente 246% en comparación con un *método de riego eficiente y un buen manejo de la eficiencia del riego* donde se consideran los porcentajes promedio más altos de los valores de eficiencia del manejo del agua y del sistema de riego correspondientes a los métodos de riego en melgas rectas en pendiente y un sistema de riego por goteo o aspersión.



Con base a las conclusiones anteriores y acorde a la metodología realizada se logró la evaluación de la necesidad hídrica por el método de Blaney-Criddle para los cultivos de aguacate, guayaba, limón, maíz, y zarzamora en los cinco municipios de mayor producción para el estado de Michoacán, verificándose lo señalado en la hipótesis de este trabajo.

## 5.2 RECOMENDACIONES

1. Implementación de bases de datos que concentren la información de la ubicación aproximada de los cultivos en Michoacán.
2. Realización de estudios de suelo para el correcto empleo de los coeficientes que intervienen en el cálculo del CUR
3. Creación de un registro de las técnicas de aplicación de riego, las condiciones de la infraestructura de conducción del agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los sitios de aplicación empleados en cada municipio del estado de Michoacán.
4. Estudios de factibilidad para la tecnificación del riego en los municipios de mayor producción para los cultivos más representativos en el estado de Michoacán, con base en el resultado obtenido en esta tesis, el cual permite conocer que los *métodos de riego poco eficientes y manejos pobres de la eficiencia del riego* incrementan hasta un 246% el CUR en comparación con los valores resultantes de los *métodos de riego eficiente y un buen manejo de la eficiencia del riego*.
5. Acercamiento con los agricultores y usuarios del agua del lugar para contrastar la información pública que otorgan los diferentes institutos, que se emplea para la determinación de la evapotranspiración y el CUR.
6. Ampliar la incorporación de la medición de la evapotranspiración en las estaciones climatológicas en el territorio mexicano.
7. Desarrollar investigaciones para fortalecer el valor del coeficiente de aprovechamiento del agua en la zona radicular de los cultivos.
8. Realizar investigaciones de mediano y largo plazo respecto al comportamiento ante nuevas condiciones climáticas para la determinación del CUR para los municipios y cultivos de estudio.



*Determinación del Coeficiente Unitario de Riego mediante el análisis espacio temporal en los municipios de mayor producción de los cinco cultivos de alto valor en el estado de Michoacán*

---

María Isabel Maldonado Mercado

9. Elaboración de investigaciones en distintos municipios considerando el criterio de que en una misma temporada se tienen distintos cultivos con la finalidad de evaluar la demanda de recurso hídrico dentro de la zona de estudio.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., y Pereira, L.S. (1994) | *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin. (pp. 1-34).
- Aloni, R. & Griffith, M. (1991) | *Xylem in the root:shoot junction of cereals*, (pp. 123-129).
- Aparicio Mijares, F. (2010) | *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa, México D.F. (pp. 47-67,140,141,177-179).
- Ávila Fonseca, F. (2011) | *El cultivo de la zarzamora*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Recuperado el 13 de enero de 2021, de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5082/T18890%20%20%20AVILA%20FONSECA,%20FIDEL%20%20MEMORIA.pdf?sequence=1>
- Bruna Lavilla, P., & Ortega Salinas, M. (2021) | *Introducción a la evapotranspiración del agua en las plantas cultivadas*. Gobierno de Aragón. Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad. Aragón, España (pp. 2-4).
- Campo Mexicano (2020) | *Glosario de términos*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) Recuperado el 02 de diciembre de 2020 de [http://www.campomexicano.gob.mx/portal\\_siap/Integracion/EstadisticaBasica/Agricola/Normatividad/anexo3N.htm#:~:text=A%C3%B1o%20Agr%C3%ADcola%3A%20Es%20el%20periodo,las%20cosechas%20de%20productos%20perennes](http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaBasica/Agricola/Normatividad/anexo3N.htm#:~:text=A%C3%B1o%20Agr%C3%ADcola%3A%20Es%20el%20periodo,las%20cosechas%20de%20productos%20perennes)
- Carangal, V.R. (1988) | *Maize in rice-based cropping systems*. In C. De Leon, G. Granados & R.N. Wedderburn, Eds. Proc. 3rd Asian Reg. Maize Workshop, Kunming, PR, China. México, DF, CIMMYT. (pp. 119-140)
- Cerna Bazán, L. (2007) | *Agrotecnia Sostenible*, Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú (pp. 111).
- Coll de Hurtado, A., & Godínez C, L. (2003) | *La agricultura en México*, UNAM, Instituto de Geografía, México, D.F.: (pp. 21,22,43).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016) | *¿Qué es un Integrador Digital de Datos Climatológicos (IDDC)?* Recuperado el 8 de febrero de 2021 de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/que-es-un-integrador-digital-de-datos-climatologicos-iddc?idiom=es>
- Consortio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador (2014) | *Hablemos de Riego*. El Telégrafo EP. Quito, Ecuador (pp. 26).
- Corba Piraquive, J. | *Determinación de la huella hídrica para un cultivo de guayaba pera (Psidium guajava)*. Recuperado el 1 de febrero de 2021, de



<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/2963/3017>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (CONABIO,2021) | *Documento sin título*. Recuperado el 11 de enero de 2021, de [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/52-myrta3m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/52-myrta3m.pdf)

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, 2021) | *Maíz*. Recuperado el 12 de enero de 2021, de <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/index.php/maiz>

Elías y Castellví (2001) | *Agrometeorología*. 2ª. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona, España. (pp. 517).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2014) | *Evapotranspiración de Cultivo, Manual 56* (pp. 1-181).

Funari, F. L. e Pereira, F. A. J. (2010) | *Análise comparativa de medições de variáveis meteorológicas realizadas por estações meteorológicas convencional e automática instaladas no parque estadual das fontes do Ipiranga-São Paulo-SP*. Rev. Bras. Climatol. (pp.159-168). Recuperado el 23 de enero de 2021 de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342017000601301&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342017000601301&script=sci_arttext)

George, P. (1991) | *Diccionario de geografía*, Akal. Torrejón de Ardoz, Madrid. (pp. 83,89)

Gutiérrez, N. (2014) | *Aguacate*, Secretaría De Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) Recuperado el 16 de diciembre de 2020 de <https://sader.jalisco.gob.mx/catalogo-plantas/aguacate>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2021). *El maíz en el estado de México* (pp. 12). Recuperado el 10 de enero de 2020, de <http://internet.contenidos.inegi.org.mx/>

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo (INAFED) | *Enciclopedia de los municipios* Recuperado el 14 de diciembre de 2020, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/index.html>

Lal, R & M Shukla. (2004) | *Principles of soil physics*. The Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A. Marcel dekker, Inc. (pp. 376)

Macías Hernández (2009) | Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. cv. El Cid) en invernadero. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional CIIDIR Michoacán, Jiquilpan, Michoacán.



- Miedema, P. (1982) | *The effects of low temperature on Zea mays*. Adv. Agron., (pp. 35, 93-129)
- Montiel González et. al. (2019) | Análisis climático para la agricultura de temporal en Michoacán, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios DOI: 10.1919136/era.a6n17.1972
- Pérez Morales et. al. (2018) | *Obras Hidráulicas*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. (pp. 8-12, 16-31).
- Ricárdez Luna, G. et al. (2016) | *Diagnóstico de la producción de zarzamora (Rubus sp.) en la zona centro de Veracruz* (pp. 34).
- Rivas, C. G. (2016) | *Manejo y Producción Forzada del Cultivo de Zarzamora*. Serie Frutillas. Núm. 07. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p. recuperado el 26 de enero de 2021, de <https://www.intagri.com/articulos/frutillas/manejo-y-produccion-forzada-del-cultivo-de-zarzamora>
- Romo, G. J. R. y Arteaga, R. R. (1989) | *Meteorología agrícola* Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Departamento de Irrigación (pp. 442).
- Rosales Arriaga (2011) | *Análisis de métodos alternativos para obtener información de temperatura del aire y estimar evapotranspiración usando imágenes satelitales*. México, D.F. Centro de Investigación en Geografía y Geomática.
- Sánchez, P.A. et al. (1977) | *Physical and chemical constraints to food production in the tropics*. eds. Chemistry and world food supplies: the new frontiers, CHEMRAWN II. Los Baños, Philippines, IRRI. (pp. 89-105).
- Segundo Vivanco (2018) | *Análisis del proceso de expansión de la superficie cultivada con aguacate y su impacto en los recursos naturales de Tacámbaro Michoacán, 1990-2016* Tijuana B.C., México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Segura Castruita, et. al. (2016) | *Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud*. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Torreón México. Tecnología y Ciencias del Agua. ISSN 0187-8336
- SFA (2018) *Indicadores Estatales Agroeconómicos*. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios de la SAGARPA. <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Estudios/Paginas/monitoreoestatal.aspx>. Fecha de consulta: 10 de agosto del 2018.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2021) | *Maíz, Situación Actual y Perspectivas 1996-2010* (p. 4). México, D.F. Recuperado el 16 de enero, de 2021.



Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2021) | *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, Aguacate Mexicano* (p. 1,2). México, D.F. Recuperado el 16 de enero, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257067/Potencial-Aguacate.pdf>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017a) | *Atlas Agroalimentario*. SAGARPA, México (pp. 232).

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017b) | *Infografía Agroalimentaria*. SAGARPA, México (pp. 52).

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018) | *Avance de Siembras y Cosechas, Resumen por Estado*. Recuperado el 3 de mayo de 2018 de [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do).

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2020) | *Resumen por estado*. Recuperado el 22 de diciembre de 2020 de [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do)

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2020) | *Fecha de Siembras y Cosechas en México*. (2021). Recuperado el 16 de enero de 2021, de <https://www.gob.mx/siap/articulos/fecha-de-siembras-y-cosechas-en-mexico?idiom=es>

Servicio Meteorológico Nacional | *Glosario Técnico*. Recuperado el 31 de enero de 2021, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>

Tapia Vargas et. al. (2016) | *Control del riego en línea y tiempo real del aguacatero y eficiencia del uso del agua*. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias. 2016, 3-6: 11-18.

Teixeira, A. et al. (2003) | *Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações agrometeorológicas automática e convencional*. Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal-SP. (pp. 457-460)

Universidad Autónoma de Chapingo | *Documento sin título* Recuperado el 21 de febrero de 2021, de [https://fitotecnia.chapingo.mx/wp-content/uploads/2018/07/41\\_7\\_EDAFOLOGIA.pdf](https://fitotecnia.chapingo.mx/wp-content/uploads/2018/07/41_7_EDAFOLOGIA.pdf)