

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.

Quantificación del Consumo Mínimo de Agua de Riego de  
la Citricultura en los Municipios de Hualahuis y Linares,  
Zona Citrícola de Nuevo León y Análisis de Alternativas  
para su Uso Eficiente

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

POR:

JORGE ALBERTO QUIÑONEZ ZEPEDA

MONTERREY, N. L.

MAYO DE 2009



**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

**Cuantificación del Consumo Mínimo de Agua de Riego de  
la Citricultura en los Municipios de Hualahuis y Linares,  
Zona Citrícola de Nuevo León y Análisis de Alternativas  
para su Uso Eficiente**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

**POR:**

**JORGE ALBERTO QUIÑONEZ ZEPEDA**

**MONTERREY, N. L.**

**MAYO DE 2009**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.®**

**Cuantificación del Consumo Mínimo de Agua de Riego de la Citricultura en  
los Municipios de Hualahuises y Linares, Zona Citrícola de Nuevo León y  
Análisis de Alternativas para su Uso Eficiente**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER GRADO  
ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

**POR:**

**JORGE ALBERTO QUIÑÓNEZ ZEPEDA**

**MONTERREY, N. L.**

**MAYO DE 2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos aquellos que han contribuido de manera directa e indirecta en la elaboración del presente estudio, así como en mi formación personal y profesional durante estos últimos años. Un profundo agradecimiento a las siguientes Instituciones y personas:

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y a la Secretaría de Relaciones Exteriores de México (SRE) por haberme proporcionado los medios financieros para cursar mis estudios de maestría.

A mi asesor, Dr. Juan Ignacio Valiente Banuet por su invaluable apoyo, confianza y amistad. Sus aportes, sugerencias y consejos fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo. Al Dr. Fabián Lozano y Dr. Jürgen Mahlkecht, por su disposición para integrar mi comité de tesis y atender dudas relacionadas con algunos de los temas desarrollados.

A mis compañeros de trabajo del Centro de Estudios del Agua (CEA) del ITESM, que de alguna manera u otra me apoyaron y aportaron su grano de arena en la elaboración del presente estudio: Anwar, Raquel, Denny y Adolfo.

A Alejandra por su compañía y sobre todo por su increíble paciencia.

A México mi segunda casa.

...A todos ellos muchas gracias.



## **DEDICATORIA**

A mis padres Jorge y Sonia por su ejemplo y entrega incondicional.

A mi abuela Enid, mis hermanos Elha Enid y Javier y mi sobrina Diana por su cariño y buenos deseos.

## RESUMEN

El sector agrícola constituye el mayor usuario del agua disponible en México, además de ser el sector que reporta los mayores desperdicios. La zona agroecológica centro de Nuevo León, conocida tradicionalmente como la “zona citrícola”, presenta los mayores consumos de agua de riego en el estado debido a la prevalencia de cítricos y métodos de riego por gravedad. Dado que en zonas áridas y semiáridas, el consumo de agua en las actividades agrícolas es bastante elevado, el ahorro de porcentajes pequeños de agua de riego resulta en incrementos significativos en su disponibilidad.

En el presente estudio, se estimó la superficie citrícola con riego y de temporal en producción de la zona agroecológica centro del estado de Nuevo León mediante la clasificación de imágenes satelitales Landsat 5-TM del 2006 y 2007, utilizando criterios de entrenamiento comúnmente empleados en la clasificación tradicional multiespectral “por-píxel”, en conjunto con criterios de asignación empleados por clasificadores orientados a objetos discretos, así como máscaras binarias e información auxiliar “verdad-terreno”, entre otros. Adicionalmente, se emplearon técnicas geoestadísticas para la generación de mapas de predicción de la variación espacial de la demanda transpirativa de la atmósfera, precipitación pluvial total y efectiva y contenidos de humedad de suelos en la zona de estudio.

El producto de las clasificaciones de imágenes satelitales y técnicas geoestadísticas empleadas, sirvieron como insumo para la cuantificación de los consumos netos y brutos mínimos totales de agua de riego de la superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares; asimismo para la modelación de escenarios hipotéticos en el uso de agua de riego “*Qué pasa sí...*”, utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Estos modelos permitieron el análisis de alternativas que logran un uso más eficiente de dicho recurso, considerando diversos niveles de tecnificación y reconversión productiva de cultivos.

Los resultados de los diferentes escenarios modelados demostraron que se desperdician anualmente cuando menos 8,480,683 m<sup>3</sup> y 11,479,549 m<sup>3</sup> de agua de riego en los municipios de Hualahuises y Linares, respectivamente. Se

determinó que el sub-escenario que logra el uso más eficiente de agua de riego en ambos municipios, es riego por microaspersión del 50% de las huertas de cítricos con riego en producción y riego por goteo las huertas restantes convertidas a melón. De considerarse un ciclo anual de melón, este sub-escenario logra ahorros potenciales equivalentes al 34% del consumo bruto mínimo total de agua de riego de la superficie cítrica con riego en producción, mientras que en Linares, lograría un ahorro equivalente al 35%. Sin embargo, dado que en la práctica, el ciclo de melón en la zona ocurre principalmente durante los meses de primavera, una modificación al sub-escenario anterior considerando solamente un ciclo de melón durante dicha temporada, logra ahorros potenciales anuales en Hualahuises equivalentes al 53% del consumo bruto mínimo total de agua de riego de la superficie cítrica con riego en producción y ahorros en Linares equivalentes al 54%.



# INDICE GENERAL

<b>CAPITULO I. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>DISPONIBILIDAD Y USO DEL AGUA EN MÉXICO.....</i>	1
1.2. <i>AGRICULTURA DE RIEGO EN MÉXICO .....</i>	3
1.2.1. <i>Agricultura de Riego en el Estado de Nuevo León.....</i>	3
1.2.1.1 <i>Agricultura de Riego en la Zona Citrícola.....</i>	4
<b>2. RELACIONES AGUA-SUELO-CULTIVO-ATMÓSFERA .....</b>	<b>5</b>
2.1. <i>BALANCE DE AGUA EN EL SUELO.....</i>	5
2.1.1. <i>Distribución y Disponibilidad de Agua en el Suelo.....</i>	6
2.1.1.1. <i>Agua Disponible Total .....</i>	7
2.1.1.2. <i>Agua Fácilmente Aprovechable .....</i>	8
2.1.1.3. <i>Extracción de Agua Disponible .....</i>	8
2.1.2. <i>Precipitación Pluvial .....</i>	9
2.1.2.1. <i>Precipitación Efectiva .....</i>	9
2.1.3. <i>Ascenso Capilar.....</i>	10
2.1.4. <i>Escorrimento Superficial.....</i>	10
2.1.5. <i>Percolación Profunda.....</i>	11
2.1.6. <i>Evapotranspiración.....</i>	11
2.2. <i>REQUERIMIENTO DE AGUA DE LOS CULTIVOS.....</i>	13
2.2.1. <i>Método FAO Penman-Monteith para Evapotranspiración.....</i>	13
2.2.1.1. <i>Evapotranspiración de Cultivo de Referencia.....</i>	15
2.2.1.2. <i>Evapotranspiración de Cultivo Bajo Condiciones Estándar.....</i>	16
2.2.1.3. <i>Evapotranspiración del Cultivo Bajo Condiciones No Estándar.....</i>	18
2.3.1. <i>Sistemas de Riego .....</i>	19
2.3.1.1. <i>Eficiencia de Aplicación de Sistemas de Riego.....</i>	20
<b>3. PERCEPCIÓN REMOTA .....</b>	<b>21</b>
3.1. <i>ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....</i>	21
3.2. <i>SENSORES REMOTOS .....</i>	23
3.2.1. <i>Adquisición de Imágenes .....</i>	23
3.2.2. <i>Sensores Remotos Espaciales.....</i>	24
3.2.2.1. <i>El Sensor Landsat 5-TM.....</i>	24
3.2.2.2. <i>El Sensor SPOT 5-HRG.....</i>	25
3.2.2.3. <i>El Sensor QuickBird BGIS 2000 .....</i>	26
3.3. <i>PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES .....</i>	27
3.3.1. <i>Corrección de Imágenes Digitales .....</i>	27
3.3.1.1. <i>Corrección Radiométrica.....</i>	27
3.3.1.2. <i>Corrección Geométrica.....</i>	27
3.3.1.2.1. <i>Rectificación.....</i>	28
3.3.2. <i>Realce de Imágenes .....</i>	29
3.3.3. <i>Clasificación de Imágenes .....</i>	30

3.3.3.1. Fase de Entrenamiento .....	30
3.3.3.1.1. Método Supervisado .....	30
3.3.3.1.2. Método No Supervisado .....	31
3.3.3.2. Fase de Asignación .....	31
3.3.3.3. Fase de Evaluación de los Resultados .....	33
3.4. APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA ESTUDIOS AGRÍCOLAS .....	33
3.4.1. Respuesta Espectral de Cobertura Vegetal .....	34
3.4.1.1. Índices de Vegetación .....	35
3.4.1.1.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada .....	36
<b>4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....</b>	<b>37</b>
4.1. DATOS GEOGRÁFICOS .....	37
4.1.1. Modelos de Datos Geográficos .....	37
4.1.2. Organización de Datos Geográficos en Sistemas de Información Geográfica .....	38
4.2. ANÁLISIS ESPACIAL .....	38
4.3. INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y PERCEPCIÓN REMOTA .....	39
<b>5. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TESIS .....</b>	<b>39</b>
5.1. OBJETIVO GENERAL .....	39
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	40
<b>CAPITULO II. METODOLOGÍA .....</b>	<b>41</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DE ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>41</b>
1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....	41
1.2. CLIMA .....	41
1.3. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL .....	43
1.4. HIDROGEOLOGÍA .....	43
1.5. EDAFOLOGÍA .....	43
1.6. VEGETACIÓN .....	44
<b>2. IMÁGENES SATELITALES .....</b>	<b>45</b>
2.1. SELECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES .....	45
2.2. CARACTERÍSTICAS DE IMÁGENES SATELITALES SELECCIONADAS .....	45
<b>3. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES .....</b>	<b>52</b>
3.1. CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA DE IMÁGENES SATELITALES .....	52
3.2. REALCE DE IMÁGENES SATELITALES .....	54
3.3. RECTIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES .....	54
3.3.1. Base Cartográfica .....	54
3.3.2. Subsets Regulares .....	55
3.3.3. Puntos de Control Terrestres .....	55
3.3.4. Interpolación Espacial o Cálculo de Función de Transformación .....	56
3.3.5. Interpolación Radiométrica o Remuestreo .....	57
3.4. SUBSETS IRREGULARES .....	57
3.5. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT 5-TM .....	57
3.5.1. Máscaras Binarias .....	57

3.5.2. Delimitación Digital de Parcelas con Huertas de Cítricos .....	58
3.5.3. Fase de Entrenamiento.....	59
3.5.3.1. Muestras de Entrenamiento.....	59
3.5.3.2. Análisis Estadístico de Muestras de Entrenamiento.....	60
3.5.4. Fase de Asignación.....	60
3.5.5. Evaluación de Resultados de Clasificación.....	62
3.5.6. Superficie Citrícola en Producción.....	64
<b>4. ESCENARIOS EN EL USO DE AGUA DE RIEGO .....</b>	<b>64</b>
4.1. SITUACIÓN ACTUAL .....	64
4.1.1. Demanda de Agua de Superficie Citrícola en Producción .....	65
4.1.2. Consumo Neto de Agua de Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción .....	72
4.1.3. Consumo Bruto Mínimo de Agua de Riego de Superficie Citrícola en Producción.....	86
4.2. ESCENARIO RIEGO DE SUPERFICIE CITRÍCOLA CON RIEGO EN PRODUCCIÓN MEDIANTE GRAVEDAD O PRESURIZADO.....	87
4.3. ESCENARIO RIEGO DE SUPERFICIE CITRÍCOLA CON RIEGO EN PRODUCCIÓN CON RECONVERSIÓN PRODUCTIVA DEL 50% DE LAS HUERTAS A HORTALIZAS .....	88
4.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EN EL USO DE AGUA DE RIEGO .....	91
<b>1. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT 5-TM .....</b>	<b>92</b>
1.1. EVALUACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN .....	99
1.2. SUPERFICIE CITRÍCOLA EN PRODUCCIÓN.....	101
<b>2. ESCENARIOS EN EL USO DE AGUA DE RIEGO .....</b>	<b>102</b>
2.1. SITUACIÓN ACTUAL .....	102
2.1.1. Evapotranspiración de Cultivo de Referencia.....	102
2.1.1.1. Datos Muestrales de Evapotranspiración de Referencia .....	102
2.1.1.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia.....	102
2.1.1.3. Análisis Estructural de Datos Muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia.....	105
2.1.1.4. Variación Espacial de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia.....	111
2.1.1.5. Demanda de Agua de Superficie Citrícola .....	114
2.1.2. Precipitación Pluvial.....	114
2.1.2.1. Datos Muestrales de Precipitación Pluvial .....	114
2.1.2.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Precipitación Pluvial.....	114
2.1.2.3. Análisis Estructural de Datos Muestrales de Precipitación Pluvial .....	117
2.1.2.4. Variación Espacial de Precipitación Pluvial.....	123
2.1.2.4.1. Variación Espacial de Precipitación Efectiva.....	126
2.1.3. Contenidos de Humedad de Suelos.....	129
2.1.3.1. Datos Muestrales de Contenidos de Humedad de Suelos .....	129
2.1.3.1.1. Clasificación Textural de Suelos .....	129
2.1.3.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Contenidos de Humedad de Suelos.....	129
2.1.3.3. Análisis Estructural de Datos Muestrales de Contenidos de Humedad de Suelos .....	131
2.1.3.4. Variación Espacial de Contenidos de Humedad de Suelos.....	135
2.1.4. Consumo Mínimo de Agua de Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción .....	137



2.2. ESCENARIO RIEGO DE SUPERFICIE CITRÍCOLA CON RIEGO EN PRODUCCIÓN BAJO DIFERENTES MODALIDADES.....	137
2.2.1. Sub-Escenarios Riego Por Gravedad o Presurizado de Superficie Citrícola con Riego en Producción .....	137
2.3. ESCENARIO RIEGO DE SUPERFICIE CITRÍCOLA CON RIEGO EN PRODUCCIÓN CON RECONVERSIÓN PRODUCTIVA DEL 50% DE LAS HUERTAS A HORTALIZAS .....	138
2.3.1. Sub-Escenarios Riego por Gravedad y/o Presurizado de Superficie Citrícola con Riego en Producción con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Hortalizas.....	139
<b>CAPITULO IV: DISCUSIÓN .....</b>	<b>144</b>
<b>1. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT 5-TM .....</b>	<b>144</b>
1.1. EVALUACIÓN DE CLASIFICACIÓN.....	147
<b>2. ANÁLISIS DE ESCENARIOS EN EL USO DE AGUA DE RIEGO .....</b>	<b>148</b>
2.1. ESCENARIO SITUACIÓN ACTUAL .....	148
2.2. ESCENARIO RIEGO DE TOTALIDAD DE SUPERFICIE CITRÍCOLA CON RIEGO EN PRODUCCIÓN BAJO DIFERENTES MODALIDADES .....	152
2.2.1. Sub-Escenarios Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción por Gravedad o Presurizado.....	152
2.3. ESCENARIO RIEGO DE SUPERFICIE CITRÍCOLA CON RIEGO EN PRODUCCIÓN BAJO DIFERENTES MODALIDADES CON RECONVERSIÓN PRODUCTIVA DEL 50% DE LAS HUERTAS A HORTALIZAS .....	153
2.3.1. Sub-Escenarios Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% a Tomate .....	153
2.3.2. Sub-Escenarios de Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Melón.....	155
2.3.3. Sub-Escenarios Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Sandía .....	156
2.4. ESCENARIOS ÓPTIMOS DE RIEGO DE SUPERFICIE CITRÍCOLA .....	158
<b>CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>169</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>172</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>189</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>191</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>193</b>
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>197</b>
<b>VITA.....</b>	<b>199</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ingresos y egresos que afectan el balance de agua en la zona radicular de los cultivos.....	6
<b>Figura 2.</b>	Espectro electromagnético.....	22
<b>Figura 3.</b>	Respuesta espectral característica de vegetación vigorosa.....	35
<b>Figura 4.</b>	Ubicación geográfica de zona agroecológica centro del estado de Nuevo León.....	42
<b>Figura 5.</b>	Imagen multibanda Landsat 5-TM del 16 de noviembre 2006. ....	46
<b>Figura 6.</b>	Imagen multibanda Landsat 5-TM del 20 de febrero 2007.....	47
<b>Figura 7.</b>	Imagen SPOT 5 del 19 de mayo 2006.....	48
<b>Figura 8.</b>	Imagen SPOT 5 del 08 de julio 2006.....	49
<b>Figura 9.</b>	Imagen SPOT 5 del 11 de abril 2006.....	50
<b>Figura 10.</b>	Diagrama metodológico para procesamiento de imágenes digitales.....	53
<b>Figura 11.</b>	Diagrama metodológico para determinar la demanda de agua de las huertas de cítricos con riego en producción. ....	66
<b>Figura 12.</b>	Ubicación puntual de estaciones agroclimatológicas Fundación Produce – INIFAP en el área de influencia de Hualahuises y Linares. ....	67
<b>Figura 13.</b>	Diagrama metodológico para determinar la Pe correspondiente a diferentes temporadas. ....	75
<b>Figura 14.</b>	Ubicación puntual de estaciones meteorológicas de la CONAGUA en el área de influencia de Hualahuises y Linares. ....	78
<b>Figura 15.</b>	Diagrama metodológico para determinar los contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares.....	80
<b>Figura 16.</b>	Ubicación de puntos de control de cartas edafológicas del INEGI escala 1:50,000 correspondientes a zona de influencia de Hualahuises y Linares.....	82
<b>Figura 17.</b>	Triangulo de clases texturales de suelos de la USDA.....	83
<b>Figura 18.</b>	Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Cadereyta Jiménez, Nuevo León.....	93
<b>Figura 19.</b>	Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de General Terán, Nuevo León.....	94
<b>Figura 20.</b>	Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Allende, Nuevo León.....	95
<b>Figura 21.</b>	Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Montemorelos, Nuevo León.....	96
<b>Figura 22.</b>	Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Linares, Nuevo León. ....	97
<b>Figura 23.</b>	Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Hualahuises, Nuevo León. ....	98
<b>Figura 24.</b>	Distribución porcentual de superficies de huertas de cítricos en producción en los municipios de la zona cítrica de Nuevo León. ....	102

<b>Figura 25.</b>	Histogramas de series de valores de $ET_o$ correspondientes a diferentes temporadas. .....	104
<b>Figura 26.</b>	Diagramas de dispersión tridimensionales de series de valores muestrales de $ET_o$ correspondientes a diferentes temporadas.....	105
<b>Figura 27.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $ET_o$ mensuales durante temporada de invierno.....	106
<b>Figura 28.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $ET_o$ mensuales durante temporada de primavera.. ..	107
<b>Figura 29.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $ET_o$ mensuales durante temporada de verano. ....	108
<b>Figura 30.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $ET_o$ mensuales durante temporada de otoño.. ..	108
<b>Figura 31.</b>	Modelos teóricos para semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de series de valores promedio de $ET_o$ mensuales por temporada. ....	109
<b>Figura 32.</b>	Variación espacial de valores de $ET_o$ durante las temporadas de invierno y primavera. .....	112
<b>Figura 33.</b>	Variación espacial de valores de $ET_o$ durante las temporadas de verano y otoño. ...	113
<b>Figura 34.</b>	Histogramas de frecuencia de series de valores promedio mensuales de $P_{tot}$ de diferentes temporadas. ....	116
<b>Figura 35.</b>	Diagramas de dispersión tridimensionales de series de valores muestrales de $P_{tot}$ correspondientes a diferentes temporadas.....	117
<b>Figura 36.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales durante temporada de invierno.....	118
<b>Figura 37.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales durante temporada de primavera. ....	119
<b>Figura 38.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales durante temporada de verano. ....	119
<b>Figura 39.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales durante temporada de otoño. ....	120
<b>Figura 40.</b>	Modelos teóricos para semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de series de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales por temporada. ....	121
<b>Figura 41.</b>	Variación espacial de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales correspondientes a temporada de invierno y primavera .....	124
<b>Figura 42.</b>	Variación espacial de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales correspondientes a temporada de verano y otoño. ....	125
<b>Figura 43.</b>	Variación espacial de valores promedio mensuales de $P_e$ correspondientes a temporada de invierno y primavera. ....	127
<b>Figura 44.</b>	Variación espacial de valores promedio mensuales de $P_e$ correspondientes a temporada de verano y otoño. ....	128
<b>Figura 45.</b>	Histogramas de series de valores muestrales de contenidos de humedad de suelos .....	130
<b>Figura 46.</b>	Diagramas de dispersión tridimensionales de series de valores de contenidos de humedad de suelos.....	131



<b>Figura 47.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores muestrales de $\Theta_{CC}$ .....	132
<b>Figura 48.</b>	Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores muestrales de $\Theta_{PMP}$ .....	132
<b>Figura 49.</b>	Modelos teóricos para semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de series de valores muestrales de contenido de humedad de suelos. ....	133
<b>Figura 50.</b>	Variación espacial de contenidos de humedad de suelos.....	136
<b>Figura 51.</b>	Demandas de agua de superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahusies y Linares y temperaturas promedio en su zona de influencia. ....	149
<b>Figura 52.</b>	Consumos netos totales y consumos brutos mínimos totales de agua de riego de la superficie citrícola con riego en producción en Hualahusies y Linares y promedios de precipitación pluvial en su zona de influencia.....	150
<b>Figura 53.</b>	Comparativo entre situación actual y sub-escenarios que consideran riego por gravedad o presurizado de la superficie citrícola con riego en producción compuesta en su totalidad por huertas de cítricos. ....	159
<b>Figura 54.</b>	Comparativo entre situación actual y sub-escenarios que consideran riego por gravedad y/o presurizado de la superficie citrícola con riego en producción con una reconversión del 50% de las huertas a hortalizas. ....	162
<b>Figura 55.</b>	Comparativo entre la situación actual y sub-escenarios que logran el uso más eficiente de agua de riego. ....	163
<b>Figura 56.</b>	Comparativo entre consumo mínimo de agua de riego de superficie citrícola con riego en producción y requerimientos brutos mínimos de sub-escenario “óptimo” y sub-escenario que considera un ciclo de melón durante temporada de primavera (Hualahusies). ....	167
<b>Figura 57.</b>	Comparativo entre consumo mínimo de agua de riego de superficie citrícola con riego en producción y requerimientos brutos mínimos de sub-escenario “óptimo” y sub-escenario que considera un ciclo de melón durante temporada de primavera (Linares). ....	168

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Datos requeridos para el cálculo de la ecuación FAO Penman-Monteith. ....	15
<b>Tabla 2.</b>	Bandas del Sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 .....	25
<b>Tabla 3.</b>	Bandas multispectrales de sensores HRG a bordo del satélite SPOT 5.....	25
<b>Tabla 4.</b>	Bandas multispectrales del sensor BGIS 2000 a bordo del satélite QuickBird. ....	26
<b>Tabla 5.</b>	Tipos de suelos según toposformas presentes en la subprovincia de llanuras y lomeríos.....	43
<b>Tabla 6.</b>	Vegetación según toposformas presentes en la subprovincia de llanuras y lomeríos...	44
<b>Tabla 7.</b>	Datos técnicos de imágenes satelitales Landsat 5-TM multibanda y SPOT 5 pancromáticas.....	51
<b>Tabla 8.</b>	Municipios, clave y sistema de coordenadas de cartas topográficas digitales georreferenciadas del INEGI escala 1:50,000 de la zona de estudio. ....	54
<b>Tabla 9.</b>	Valores del coeficiente único del cultivo $K_c$ correspondiente a cítricos sin cobertura del suelo (70% cubierta vegetativa).....	71
<b>Tabla 10.</b>	Valores promedio y rangos de $\theta_{CC}$ y $\theta_{CC}$ para suelos de diferentes texturas.....	83
<b>Tabla 11.</b>	Valores de eficiencia de aplicación de sistemas de riego por gravedad y sistemas presurizados.....	87
<b>Tabla 12.</b>	Valores de $K_c$ correspondiente a hortalizas. ....	89
<b>Tabla 13.</b>	Rangos de profundidad máxima efectiva de raíces para condiciones sin estrés hídrico, correspondientes a hortalizas. ....	90
<b>Tabla 14.</b>	Fracción de agotamiento de humedad en el suelo para condiciones sin estrés hídrico correspondiente a hortalizas .....	90
<b>Tabla 15.</b>	Matrices de error de clasificaciones.....	99
<b>Tabla 16.</b>	Reporte de medidas estadísticas de validación numérica de resultados de clasificaciones.....	100
<b>Tabla 17.</b>	Superficie de huertas de cítricos en producción identificada en la zona citrícola de Nuevo León.....	101
<b>Tabla 18.</b>	Estadística descriptiva de valores promedio mensuales estacionales de $ET_0$ en Hualahuises y Linares.....	103
<b>Tabla 19.</b>	Resultados prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a series de valores de $ET_0$ correspondientes a diferentes temporadas.....	104
<b>Tabla 20.</b>	Parámetros de modelos teóricos de predicción de valores de $ET_0$ y configuración de vecindades de búsqueda. ....	110
<b>Tabla 21.</b>	Errores de predicción de los conjuntos de modelos teóricos para semivariogramas experimentales de series de valores muestrales de $ET_0$ y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes. ....	110
<b>Tabla 22.</b>	Varianzas de valores de RMSS de modelos teóricos de predicción de valores de $ET_0$ correspondientes a diferentes temporadas.....	111
<b>Tabla 23.</b>	Demandas de agua de huertas de cítricos con riego en producción localizadas en Hualahuises y Linares.....	114
<b>Tabla 24.</b>	Estadística descriptiva de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales por temporada en Hualahuises y Linares.....	115

<b>Tabla 25.</b>	Resultados prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a series de valores estacionales de $P_{tot}$ .....	116
<b>Tabla 26.</b>	Parámetros de modelos teóricos de predicción de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales por temporada y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes. ...	121
<b>Tabla 27.</b>	Errores de predicción de los conjuntos de modelos teóricos para semivariogramas experimentales de series de valores de $P_{tot}$ mensuales por temporada y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes.....	122
<b>Tabla 28.</b>	Varianzas de valores de RMMS de modelos teóricos de predicción de valores promedio de $P_{tot}$ mensuales por temporada. ....	123
<b>Tabla 29.</b>	Estadística descriptiva de series de valores muestrales de $\Theta_{CC}$ y $\Theta_{PMP}$ de suelo en Hualahuises y Linares.....	129
<b>Tabla 30.</b>	Resultados prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a valores muestrales de contenido de humedad de suelos. ....	130
<b>Tabla 31.</b>	Parámetros de modelos teóricos de predicción de valores de contenidos de humedad de suelos y configuraciones de vecindades de búsqueda. ....	133
<b>Tabla 32.</b>	Errores de predicción de los conjuntos de modelos teóricos para semivariogramas experimentales de series de valores muestrales de contenidos de humedad de suelos y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes. ....	134
<b>Tabla 33.</b>	Varianzas de valores de RMMS de modelos teóricos de predicción de contenidos de humedad de suelos.....	135
<b>Tabla 34.</b>	Consumos netos y brutos totales de agua de riego de superficie citrícola con riego en producción.....	137
<b>Tabla 35.</b>	Requerimientos brutos mínimos totales de agua de riego de sub-escenarios de riego por gravedad o presurizado de superficie citrícola con riego en producción .....	138
<b>Tabla 36.</b>	Requerimientos de agua de riego de sub-escenarios de riego por gravedad y/o presurizado de superficie citrícola con riego en producción considerando reconversión productiva del 50% de las huertas a tomate.....	140
<b>Tabla 37.</b>	Requerimientos de agua de riego de sub-escenarios de riego por gravedad y/o presurizado de superficie citrícola con riego en producción considerando reconversión productiva del 50% de las huertas a melón.....	141
<b>Tabla 38.</b>	Requerimientos de agua de riego de sub-escenarios riego por gravedad y/o presurizado de superficie citrícola con riego en producción considerado reconversión productiva del 50% de las huertas a sandía.....	142
<b>Tabla 39.</b>	Excedentes de volúmenes de agua de riego aplicados a huertas de cítricos en producción.....	151
<b>Tabla 40.</b>	Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos en producción utilizando sistemas por gravedad y microaspersión. ....	152
<b>Tabla 41.</b>	Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos/ tomate utilizando sistemas por gravedad y microaspersión/goteo. ....	154
<b>Tabla 42.</b>	Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos/hortalizas de melón utilizando sistemas por gravedad y microaspersión/ goteo.....	156
<b>Tabla 43.</b>	Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos/ sandía utilizando sistemas por gravedad y microaspersión/goteo. ....	157

<b>Tabla 44.</b>	Ahorros de agua logrados por sub-escenarios identificados como los más eficientes dentro de los escenarios 2 y 3. ....	163
<b>Tabla 45.</b>	Ahorros de agua logrados por subescenario de riego “óptimo” y sub-escenario que considera un ciclo de melón durante temporada de primavera.....	166

## CAPITULO I. ANTECEDENTES

### 1. Introducción

El sector agrícola constituye el mayor usuario de agua dulce a nivel mundial, usando aproximadamente el 70% del total de extracciones procedentes de lagos, cursos de agua y acuíferos, seguido de la industria, que utiliza el 20% y del uso doméstico o municipal, que utiliza el 10% (FAO, 2007).

El crecimiento demográfico y el desarrollo económico ocurrido en el siglo pasado, ha incrementado la presión sobre los recursos hídricos mundiales, particularmente en las regiones áridas del planeta. Lo anterior, aunado al aumento en las tasas de migración del campo a la ciudad, implica una mayor demanda per cápita de agua para la producción de alimentos y para usos domésticos e industriales. Aunque el agua es un recurso de carácter renovable, su disponibilidad es finita. A medida que las poblaciones y las economías mundiales crecen, la competencia entre los usuarios tradicionales (agricultura, industria y ciudades) por este recurso escaso se intensifica, amenazando los futuros avances en materia de seguridad alimentaria, la reducción de la pobreza y la sustentabilidad del propio recurso (FAO, 1993, 2007).

La problemática derivada del uso del agua en las actividades agrícolas se agudiza debido a la baja eficiencia en su uso. Lo anterior se ve reflejado en la aplicación de volúmenes de agua de riego que generalmente exceden los requerimientos de los cultivos (FAO, 1993). Estos requerimientos, por lo tanto, deben ser estimados de manera precisa para contribuir al buen manejo del riego y a la adecuada planificación del uso de los recursos hídricos de cualquier región. Dado que en zonas áridas y semiáridas, el consumo de agua en las actividades agrícolas es bastante elevado, el ahorro de porcentajes pequeños de agua de riego resultará en un incremento significativo en la disponibilidad de agua (Berengena & Gavilán, 2005).

#### ***1.1. Disponibilidad y Uso del Agua en México***

Anualmente México recibe del orden de 1 488 miles de millones de m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y



regresa a la atmósfera, el 25.4% escurre por los ríos o arroyos y el 2.1% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que anualmente el país cuenta con 458 mil millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable, a lo que se le denomina disponibilidad natural media (CONAGUA, 2008). Conforme a los parámetros de evaluación mundial sobre la disponibilidad de agua, establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), México, con un promedio nacional de 4,312 m<sup>3</sup>/habitante/año, se encuentra entre los países del mundo cuya disponibilidad natural media de agua es clasificada como “baja” (1,000 a 5,000 m<sup>3</sup>/habitante/año).

En México existen grandes variaciones de la disponibilidad natural media del agua a lo largo del año. La mayor parte de la lluvia ocurre entre los meses de junio y septiembre, período en el que se precipita el 68% de la precipitación media anual (759.6 mm) (CONAGUA, 2008). En el país se destacan dos grandes zonas con fuertes disparidades de disponibilidad natural media de agua, afectadas por su geografía y clima: la región norte, centro y noroeste y la región sur y sureste. La región norte, centro y noroeste, presenta una precipitación promedio anual de 400 mm y una disponibilidad natural media per cápita de 1,724 m<sup>3</sup>/habitante por año. En la región sur y sureste, algunas zonas alcanzan rebasar precipitaciones promedio de 2000 mm por año y presenta una disponibilidad natural media de 13,097 m<sup>3</sup>/habitante/año (CONAGUA, 2008). Cabe señalar que en el país se utiliza aproximadamente el 16% del volumen de disponibilidad natural media de agua, sin embargo, en la porción norte se utiliza más del 40%, lo que representa una fuerte presión sobre el recurso hídrico de la región (CONAGUA, 2007).

El 63% del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37% restante proviene de acuíferos. De los volúmenes totales concesionados para usos consuntivos, el 77% se aprovecha principalmente en la agricultura de riego, 14% en abastecimiento público urbano, 4% en la industria autoabastecida y 5% en termoeléctricas (CONAGUA, 2008). El agua subterránea, constituye la principal fuente de abastecimiento de agua en las zonas áridas y semi-áridas del país. Del volumen total extraído, el 71% se aprovecha en la agricultura, el 20% en abastecimiento público urbano, el 6% se destina al uso industrial y el 3% restante en uso doméstico y abrevadero. El bombeo intensivo de agua subterránea para

uso en la agricultura de riego ha dado lugar a la sobreexplotación de 104 de los 653 acuíferos con que cuenta el país (CONAGUA, 2007).

## **1.2. Agricultura de Riego en México**

La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, que equivale aproximadamente al 10% del total nacional, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año. De esta superficie, aproximadamente 6.46 millones de hectáreas se cultiva bajo condiciones de riego, de las cuales, 3.50 corresponden a 85 Distritos de Riego y 2.96 a más de 39,000 Unidades de Riego (CONAGUA, 2008). Aproximadamente el 90% de la superficie de riego opera bajo condiciones de gravedad, mientras que el 10% restante se encuentra bajo sistemas presurizados y subsuperficiales (CONAGUA, 2007).

El sector agrícola, además de ser el principal usuario de agua en México, constituye el sector que reporta los mayores desperdicios de dicho recurso (CONAGUA, 2002a). Los niveles de desperdicio por lo general son producto de una operación ineficiente de los sistemas de riego, métodos obsoletos e ineficientes de riego, deficiente infraestructura de conducción, problemas institucionales, cultivos inapropiados, entre otros (Exebio-García et al., 2002; Garcés-Restrepo & Levine, 1999). Se sostiene que la eficiencia promedio en el uso del agua de riego en el país corresponde a un 46% (CONAGUA, 2002a).

### **1.2.1. Agricultura de Riego en el Estado de Nuevo León**

La agricultura predominante en el estado de Nuevo León se encuentra orientada hacia cultivos básicos de ciclo anual con rendimientos variables y generalmente inferiores a los que se obtienen en otras regiones del país y del extranjero. Actualmente se tienen identificadas tres zonas agroecológicas en el estado de Nuevo León: norte, centro y sur-este. Los cultivos principales de la zona agroecológica norte son cultivos extensivos, entre ellos el sorgo, cártamo, trigo, aguacate, nogal, pastos y forrajes. La zona agroecológica centro, se caracteriza principalmente por los cultivos intensivos tales como los cítricos y en menor grado, nogales y hortalizas, además de cultivos tradicionales como maíz, sorgo y forrajes.

La zona sur del estado se caracteriza por cultivos de maíz, frijol, trigo, alfalfa, papa y manzano (SAGARPA, 2005).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) afirma que la agricultura de riego constituye el mayor usuario del agua en el estado de Nuevo León, aprovechando el 87.5% de la disponibilidad natural media. El consumo de agua de la superficie agrícola con riego en el estado, se ve influenciada por la zona agroecológica en la que se desarrolla, presentando los mayores consumos en la zona agroecológica centro, seguida por las zonas agroecológicas norte y sur (SAGARPA, 2005).

En el estado de Nuevo León se utiliza principalmente métodos de riego por gravedad tales como el riego de superficie en surcos, melgas y riego por inundación. Estos métodos de riego son altamente consumidores de agua y presentan problemas de baja eficiencia, lo cual resulta en la aplicación de láminas excesivas de agua y niveles de desperdicio considerables. Los métodos presurizados como el riego por aspersión, microirrigación (microaspersión, goteo) y subirrigación entre otros, tienen poco nivel de uso debido principalmente al costo de inversión y falta de mano de obra capacitada en cuanto a su operación y mantenimiento (ITESM, 2002).

#### ***1.2.1.1 Agricultura de Riego en la Zona Citrícola***

Según datos del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), la planta productiva de la zona agroecológica centro del estado de Nuevo León, consta de 2,965 huertas con 31,891 hectáreas. Montemorelos y General Terán representan el 30% y 29% del total estatal, siendo estos junto con Cadereyta, los municipios más importantes, concentrando en suma el 77% de la superficie estatal de cítricos. Los otros tres municipios citrícolas importantes son Linares, Allende y Hualahuises que suman 7,028 ha, representando el 22% restante de la superficie sembrada (ITESM, 2002). Por otro lado, el Fideicomiso para el Desarrollo de la Zona Citrícola de Nuevo León (FIDECITRUS), establece que la actividad citrícola del estado de Nuevo León cuenta con una superficie plantada de 32,158 hectáreas (FIDECITRUS, s.f.). Los cambios en el uso de suelo en zonas productoras de cítricos en años recientes, consecuencia de los cambios a los precios de los cítricos a nivel mundial, hace

que sea conveniente la verificación periódica de la superficie citrícola de estas regiones (Fuente: Comunicación personal, Dr. Gene Albrigo, University of Florida, 2008).

La mayor parte de la superficie de cítricos es de riego con 25,201 hectáreas (79%), en tanto las 6,690 hectáreas restantes (21%) son producidas bajo condiciones de temporal. En el uso de riego, el sistema más común es por gravedad toma directa (44%), seguida por gravedad bombeo (28%), microaspersión (24%), aspersión (2.7%) y goteo (1.2%). La fuente de abastecimiento de agua proviene principalmente de pozos profundos con un 46% de la superficie total citrícola bajo riego (ITESM, 2002).

## **2. Relaciones Agua-Suelo-Cultivo-Atmósfera**

El agua es el principal componente de los cultivos agrícolas y constituye el principal medio para los procesos químicos y bioquímicos que soportan su metabolismo (Haman & Izuno, 2003a). Los cultivos requieren de agua para la formación de tejidos, movilización de nutrientes y sales provenientes del suelo, eliminación de azúcares y sales disueltas, soporte físico y regulación de temperatura interna, entre otros (Kramer, 1995; Palacios-Vélez, 2002). Existe una relación proporcional entre la cantidad de agua transpirada por los cultivos y la cantidad de materia viva fotosintetizada o generada (Feddes et al. 1978 citado en Palacios-Vélez, 2002; James, 1988), por lo que el desarrollo y rendimiento óptimo de los cultivos agrícolas depende principalmente de la cantidad de agua que reciben (Palacios-Vélez, 2002).

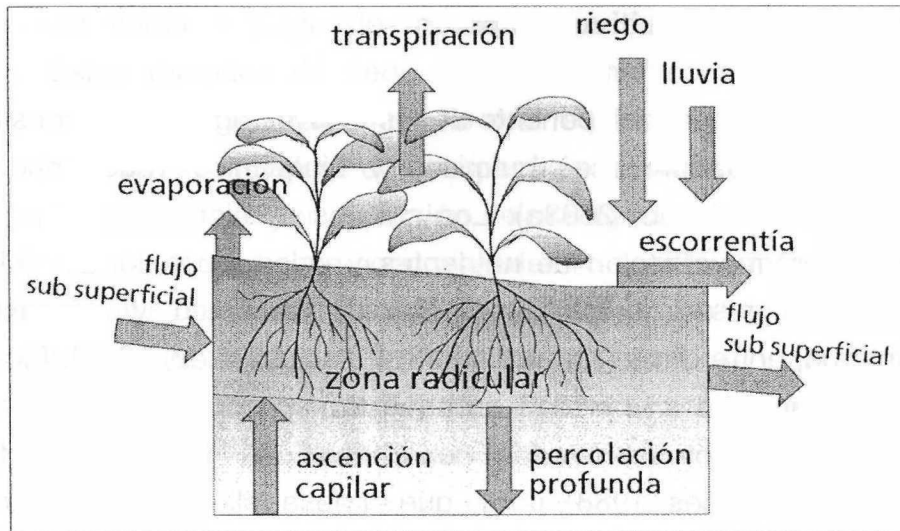
### **2.1. Balance de Agua en el Suelo**

Cualquier intento para controlar la cantidad y disponibilidad de agua para mejorar la productividad y sustentabilidad agrícola debe basarse en el entendimiento y conocimiento cuantitativo del balance dinámico de agua retenida por fuerzas matriciales en la zona radicular, donde los cultivos absorben la mayor cantidad de agua. Este balance dinámico, basado en la ley de conservación de materia, establece que en cualquier volumen dado de suelo, la diferencia entre la cantidad de agua que ingresa a la zona radicular ( $SW_{in}$ ) y la cantidad extraída ( $SW_{out}$ ) durante un intervalo determinado de tiempo, es igual al contenido de agua

en el suelo durante ese mismo intervalo ( $\Delta SW$ ) (Allen et al., 1998; Hillel, 1971, 1982; Palacios-Vélez, 2002):

$$\Delta SW = SW_{in} - SW_{out} \quad (1)$$

Allen et al. (1998), Bliesner et al. (1997), Hillel (1971, 1982), James (1988) y Kumar et al. (2002), entre otros, establecen que los principales ingresos y egresos hídricos que afectan los cambios o variaciones en el contenido de agua en la zona radicular experimentadas a lo largo de un intervalo determinado de tiempo, incluyen precipitación pluvial, riego, ascenso capilar, escurrimiento superficial, percolación profunda, evapotranspiración y flujos sub-superficiales (Figura 1).



**Figura 1.** Ingresos y egresos que afectan el balance de agua en la zona radicular de los cultivos (Allen et al., 1998).

### 2.1.1. Distribución y Disponibilidad de Agua en el Suelo

El suelo constituye una mezcla porosa de partículas inorgánicas, orgánicas, agregados y organismos vivos, en donde la mayoría de los cultivos obtienen los nutrientes, agua y oxígeno requeridos para sus procesos vitales (Palacios-Vélez, 2002). El agua que se infiltra en el terreno queda sometida a la matriz del suelo por varias fuerzas de retención, distribuyéndose de las siguientes formas (Custodio & Llamas, 2001):



1. *Agua gravitacional*. Agua que penetra el suelo y desciende a través de los macroporos, encontrándose sometida a la acción de la gravedad. Cuando alcanza un fondo impermeable o una zona saturada, satura a su vez la zona subyacente. Se encuentra contenida en el suelo, pero no retenida por él y circula libremente por efecto de los gradientes piezométricos constituyendo el agua subterránea propiamente dicha. Puede considerarse como perjudicial para los cultivos debido a que satura la zona radicular eliminando el oxígeno libre (Custodio & Llamas, 2001).
2. *Agua capilar*. Agua que queda retenida dentro de los microporos por fuerzas capilares luego que transcurrido un determinado tiempo, los poros de las capas superiores de un suelo saturado pierden su estado de saturación y el agua aportada por lluvia o riego desciende por gravedad. Constituye la única forma de agua del suelo disponible para aprovechamiento de la mayoría de los cultivos (exceptuando las plantas freatofitas), pues la fuerza de succión de las raíces es suficiente para extraerla (Custodio & Llamas, 2001).
3. *Agua higroscópica*. Agua que se encuentra retenida por atracción catiónica y que es absorbida directamente de la humedad atmosférica. Forma una fina película que recubre a las partículas del suelo. No es agua aprovechable o asimilable para los cultivos en virtud que la fuerza de succión de las raíces es inferior a la de retención del agua, impidiendo su extracción del suelo (Custodio & Llamas, 2001).

#### **2.1.1.1. Agua Disponible Total**

La Capacidad de Campo (CC) representa el contenido de agua de un suelo inicialmente saturado, que queda retenido en contra de las fuerzas de gravedad luego de que el agua gravitacional ha drenado. Superado este límite, el suelo se encuentra en su punto de saturación y el agua excedente escurre por la superficie o percola hacia el subsuelo (Allen et al., 1998; Brouwer et al., 1985; Haman & Izuno, 2003a; Palacios-Vélez, 2002; Raghunath, 1987).

El Punto de Marchitez Permanente (PMP) se define como el límite inferior de contenido de agua disponible para el cultivo en donde el agua se encuentra

retenida por fuerzas superiores a las fuerzas de absorción que puede ejercer la raíz. Debajo del PMP ocurre estrés hídrico severo y/o marchitez irreversible debido a que la extracción de agua del suelo resulta insuficiente para balancear la demanda transpirativa de la atmósfera (Allen et al., 1998; Boman et al., 2002; Custodio & Llamas, 2001; Haman & Izuno, 2003a; Hillel, 1971, 1982).

El Agua Disponible Total (ADT) constituye el volumen de agua que los cultivos pueden extraer de su zona radicular, contenido entre el CC y el PMP. (Allen et al. 1998; Brouwer et al., 1985; Custodio & Llamas, 2001; Haman & Izuno, 2003a; Hillel, 1971; James, 1988; Palacios-Vélez, 2002; Smajstrla, 2006; USDA-SCS, 1991).

#### ***2.1.1.2. Agua Fácilmente Aprovechable***

A pesar de que teóricamente los cultivos pueden extraer agua del suelo hasta alcanzar el PMP, existe un umbral de humedad a partir del cual las raíces empiezan a presentar dificultades para extraer el agua, produciéndose estrés hídrico. A este umbral se le denomina Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) y normalmente se representa como una fracción del intervalo del agua disponible, que varía según el cultivo que se considere (Allen et al., 1998; James, 1988). Generalmente, en la planificación de riego, el AFA es utilizado como criterio para indicar el momento de riego, dado que constituye el contenido de agua mínimo en la zona radicular al final de un intervalo de tiempo definido antes de ser necesaria la aplicación de riego para evitar el estrés hídrico de los cultivos (James, 1988).

#### ***2.1.1.3. Extracción de Agua Disponible***

La fuerza mínima requerida para superar las fuerzas matriciales y lograr la extracción del agua disponible para el cultivo varía en función de la cantidad de agua que se encuentre presente en el suelo. A medida que los espacios entre las partículas individuales se llenan de agua y el suelo se aproxima a su punto de saturación, las fuerzas matriciales que retienen el agua se aproximan a cero y la energía potencial del agua incrementa. De manera inversa, a medida que el contenido de agua se aproxima a cero, las fuerzas matriciales aproximan negativo infinito y el agua adquiere una energía potencial baja. Por lo anterior, los cultivos

pueden extraer más agua cuando el suelo se encuentra húmedo que cuando se encuentra seco (Allen et al., 1998; James, 1998; Raghunath, 1987).

La tasa de extracción de agua disponible en la zona radicular por parte de los cultivos, depende de sus propiedades intrínsecas (densidad y profundidad de enraizamiento, extensión radicular y las habilidades fisiológicas que poseen para continuar extrayendo agua del suelo a una tasa que permita evitar el marchitamiento y lograr mantener a la vez sus procesos vitales aun cuando su potencial hídrico disminuye), propiedades del suelo (conductividad hidráulica, difusividad, succión matricial, relaciones de humedad), así como las condiciones micro-meteorológicas que impone la tasa de transpiración de los cultivos y por consiguiente la tasa de extracción del agua del suelo que le permita mantenerse hidratado (Hillel, 1971, 1982).

### ***2.1.2. Precipitación Pluvial***

La precipitación pluvial es producto de la condensación de vapor de agua contenida en masas de aire en la atmósfera cuando se elevan y enfrían y su caída posterior a la superficie terrestre por acción de la gravedad. La unidad de medida empleada para cuantificar la precipitación pluvial es el milímetro (mm), que equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría a causa de la precipitación sobre una superficie plana e impermeable. Su medición se efectúa por medio de instrumentos especiales estandarizados que registran valores en horarios preestablecidos (mm/unidad de tiempo). Los instrumentos más frecuentemente utilizados para la medición de la lluvia son los pluviómetros y pluviógrafos, instalados en sitios donde no se presentan interferencias de edificaciones, árboles o elementos orográficos como rocas elevadas, entre otros (Fuentes, 1989).

#### ***2.1.2.1. Precipitación Efectiva***

La precipitación pluvial que cae sobre un terreno agrícola solo es parcialmente aprovechada por los cultivos. Mientras que una parte de esta precipitación total es interceptada por el follaje, otra escurre y se deposita sobre la superficie donde una fracción se evapora directamente a la atmósfera y el resto se infiltra al interior del suelo (Dastante, 1978; Hillel, 1971). Del total del agua que se

infiltra, parte percola por debajo de la zona radicular, mientras que el resto permanece almacenada dentro de esta. La Precipitación Efectiva (Pe) se define como la fracción de la precipitación total que no se pierde por escurrimiento y/o infiltración y en menor grado por evaporación y percolación profunda, que se encuentra disponible en la zona radicular para satisfacer al menos parte de los requerimientos de agua de los cultivos para su desarrollo (Brouwer et al., 1985).

Los factores que afectan la Pe incluyen: intensidad, frecuencia, cantidad, distribución y duración de la lluvia, factores meteorológicos (temperatura, radiación, humedad relativa, velocidad de viento), textura y estructura del suelo, topografía e inclinación del terreno, profundidad de la zona radicular, grado de cobertura y etapa de desarrollo del cultivo, entre otros. (Brouwer et al., 1985; Brouwer & Heibloem, 1986; Dastante, 1978; Hillel, 1971; Palacios-Vélez, 2002).

### **2.1.3. Ascenso Capilar**

El Ascenso Capilar (Cr) se refiere al movimiento vertical del agua retenida por fuerzas capilares en el suelo, desde zonas de mayor a menor humedad. Como consecuencia de la evapotranspiración (ET), las capas superiores del suelo pierden humedad hacia a la atmósfera en forma de vapor de agua. De esta manera se produce una diferencia de potencial entre las capas superiores y las inferiores del suelo, provocando a la vez un movimiento capilar ascendente del agua a través de conductos irregulares interconectados desde la capa freática hacia la zona radicular, que tiende a igualar los contenidos de humedad. El ascenso capilar depende del tipo de suelo, la profundidad del nivel freático y el contenido de humedad en la zona radicular, entre otros factores (Allen et al. 1998; Chow et al. 1988; Hillel, 1971). Normalmente se asume un valor de Cr igual a cero cuando el nivel freático se encuentra a más de 1 m por debajo de la zona radicular (Allen et al., 1998).

### **2.1.4. Escurrimiento Superficial**

Escurrimiento superficial (Es) se refiere a la porción de la precipitación pluvial que no se infiltra en el suelo ni se acumula en la superficie, sino que fluye sobre ésta por acción de gravedad. Este proceso ocurre cuando la intensidad de precipitación excede la capacidad de infiltración de agua del suelo. El Es puede

verse afectado por diversos factores como las características del relieve (pendiente, superficie, entre otros), características del suelo (profundidad, textura y estructura), factores climáticos (intensidad, duración, frecuencias, distribución espacial de precipitaciones, temperatura, viento, humedad relativa, entre otros), cobertura vegetal (porcentaje de cobertura, altura), entre otros (Barnes et al., 1990; Bouma et al., 2003; Chow et al., 1988). Dado que la mayoría de los eventos de precipitación con intensidades o láminas lo suficientemente grandes para causar Es, también llevan el contenido de humedad de la capa superior del suelo a CC, se puede ignorar su impacto (Allen et al., 1998).

### **2.1.5. Percolación Profunda**

La Percolación Profunda (Dp) se refiere a la infiltración de agua por debajo de la zona radicular fuera del alcance del cultivo, que ocurre cuando el contenido de humedad en la zona radicular excede la CC. La Dp se asocia principalmente con el uso de superficies de riego extensas y tiempos de riego prolongados (Allen et al., 1998; Palacios-Vélez, 2002). Factores que afectan la Dp incluyen la conductividad hidráulica, textura y estructura del suelo, contenido de humedad en el suelo, entre otros (Acosta et al., 1988). Sistemas de riego diseñados y operados de manera adecuada e instalados en sitios apropiados presentan escasa o ninguna pérdida de agua debido a Dp (USDA-SCS, 1991). Allen et al. (1998) establecen que la Dp puede descartarse para periodos cortos de tiempo.

### **2.1.6. Evapotranspiración**

La Evapotranspiración (ET) se define como la pérdida de agua a la atmósfera en forma de vapor mediante los procesos combinados de evaporación y transpiración, en virtud que estos procesos ocurren de manera simultáneamente y no existen métodos sencillos para separarlos (Allen et al., 1998; Barnes et al., 1990; Haman & Irmak, 2003; Haman & Izuno, 2003a; Hillel, 1982). La evaporación es el proceso mediante el cual agua de una superficie evaporante (suelo, superficies húmedas de los cultivos) se reintegra a la atmósfera por efecto de la vaporización al entrar en contacto con la radiación solar y en respuesta a la demanda atmosférica. Por otro lado, la transpiración consiste en la vaporización del agua dentro de los espacios intercelulares de los tejidos de los cultivos y su posterior pérdida hacia la atmósfera principalmente a través de los estomas en las

hojas y en menor grado a través de la cutícula (Allen et al., 1998; James, 1988; Kramer, 1995).

Del volumen total del agua absorbida por los cultivos en zonas áridas, cerca del 99% se pierde a la atmósfera por el proceso de transpiración (Hillel, 1987). Aunque esta pérdida de agua puede llegar a ocasionarle problemas serios a los cultivos, particularmente cuando incurre en déficits hídricos, la transpiración resulta imprescindible para su desarrollo debido al gradiente de potencial hídrico entre el suelo y la atmósfera que genera. Este gradiente hace posible la absorción de agua a través de las raíces y su movimiento vertical hasta alcanzar las hojas, suministrando la presión de turgencia necesaria para la apertura de los estomas y el ingreso de CO<sub>2</sub> para la realización de los procesos fotosintéticos (Gurovich, 1999; Haman & Izuno, 2003a; James, 1988; Kramer, 1995).

Entre los principales factores que afectan la ET figuran los que se detallan a continuación:

1. *El estado del tiempo*. La radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento.
2. *Características del cultivo*. El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo, resistencia a la transpiración (cantidad de estomas, edad y condición de la hoja, grado de control estomático), altura del cultivo, el reflejo de la superficie del cultivo, la cobertura del suelo y las características radiculares, entre otros.
3. *Manejo y condiciones del medio de desarrollo*. Prácticas del cultivo y el método de riego, contenido de agua del suelo, la salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos, cubierta del suelo, densidad del cultivo, entre otros.

(Allen et al., 1998; Belmonte & Romero, 2006; Brouwer et al., 1985; Chamblis & Witty, 2002; Chuvieco & Sánchez, 2000; Clarke et al., 1989; Crespo et al., 2001; Gurovich, 1999; Haman & Irmak, 2003a; Palacios-Vélez, 2002).

## **2.2. Requerimiento de Agua de los Cultivos**

El requerimiento de agua del cultivo se define como la cantidad de agua que necesita el cultivo para reponer las pérdidas derivadas del proceso de ET. Por lo anterior, estos requerimientos pueden determinarse a partir del cálculo de la ET de los cultivos (Allen et al., 1998).

En la actualidad existe una gran variedad de métodos que permiten estimar la ET a partir de variables meteorológicas, los cuales se clasifican en métodos directos e indirectos: los métodos directos proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos, utilizando para ello instrumentos especiales que registran valores muy apegados a la ET que se produce realmente en base a las condiciones atmosféricas y disponibilidades de agua existentes y sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos o indirectos. Algunos de los métodos directos incluyen el método gravimétrico, disimétrico, el evapotranspirómetro de Thornthwaite, Atmómetro de Livingstone, lisímetros, entre otros. Los métodos indirectos proporcionan una estimación del requerimiento de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas que requieren de información climatológica de fácil obtención. Estos últimos se clasifican en métodos climatológicos y micrometeorológicos (Aguilera & Martínez, 1996, citado en Crespo et al., 2001)

### **2.2.1. Método FAO Penman-Monteith para Evapotranspiración**

De todos los métodos desarrollados para determinar el requerimiento de agua de los cultivos, el método FAO Penman-Monteith es el más aceptado por su versatilidad y exactitud en un amplio rango de localidades y tipos de clima durante períodos cortos de tiempo; asimismo, constituye el único método estandarizado recomendado por la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID, por sus siglas en inglés) y por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) para el cálculo y definición de la Evapotranspiración de Cultivo de Referencia ( $ET_o$ ) (Allen et al., 2003; Allen et al., 1998; Haman & Irmak, 2003; Hargreaves, 1994).

El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado por la FAO en colaboración con la ICID y la Organización Mundial de Meteorología (WMO, por



sus siglas en inglés), como resultado de la consulta de un panel de expertos e investigadores en riego para revisar las metodologías sobre los requerimientos de agua de los cultivos y hacer sugerencias sobre la revisión y actualización de los procedimientos existentes. Este panel recomendó la adopción de la combinación del método Penman-Monteith con un nuevo estándar para la  $ET_0$  y sugirió los procedimientos para el cálculo de varios de sus parámetros (Allen et al., 1998; Haman & Irmak, 2003).

El método FAO Penman-Monteith estima el volumen evapotranspirado de agua por unidad de superficie con base en el análisis del balance de energía que ocurre durante el proceso de ET. La evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de energía radiante o calor sensible, por lo que el proceso de ET es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la ET de los cultivos aplicando el principio de conservación de energía que establece que la energía que alcanza a la superficie debe ser igual a la energía que sale de ella en el mismo período de tiempo. La ecuación de balance de energía para una superficie de evaporación se puede escribir de la manera siguiente (Allen et al., 1998; Rosenberg, 1974):

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (2)$$

Donde:

- $R_n$ : radiación neta (equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre),
- $G$ : flujo de calor del suelo (energía que se utiliza para calentar el suelo),
- $\lambda ET$ : flujo de calor latente (calor necesario para la evaporación),
- $H$ : calor sensible (calor emitido desde las superficies al aire por conducción o por convección).

Para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, el método FAO Penman-Monteith, considera tres diferentes conceptos de ET: 1) Evapotranspiración del Cultivo de Referencia ( $ET_0$ ), 2) Evapotranspiración del

Cultivo bajo Condiciones Estándar ( $ET_c$ ), y 3) Evapotranspiración del Cultivo bajo Condiciones No-Estándar ( $ET_{c_{aj}}$ ) (Allen et al., 1998).

### 2.2.1.1. Evapotranspiración de Cultivo de Referencia

Debido a que el requerimiento de agua de los cultivos cambia según la especie y etapa de desarrollo, se introdujo el concepto de cultivo de referencia para evitar ambigüedades en relación a la evapotranspiración potencial, así como la necesidad de calibrar una ecuación de evapotranspiración para cada cultivo y etapa de desarrollo (Allen et al., 1994, 1999; Doorenbos & Pruitt, 1977; Haman & Irmak, 2003).

La Evapotranspiración de Cultivo de Referencia ( $ET_o$ ) es un parámetro que incorpora la mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos, por lo que representa un indicador de la demanda transpirativa de la atmósfera en una localidad y un tiempo del año específico, independientemente de las características del cultivo, etapa de desarrollo o tipo de suelo (Allen et al., 1998; O'Connell & Snyder, 2007). La  $ET_o$  estima la ET de una superficie sembrada con un pasto hipotético con características específicas estándar equivalentes a la de una superficie extensa con pasto verde bien regado de altura uniforme en crecimiento activo y una cobertura total de la superficie. Este pasto hipotético posee una altura de 12 cm, una resistencia de superficie corregida de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0.23, sin limitaciones de agua u otro factor que no fuera meramente climático (Allen et al., 1998; Haman & Irmak, 2003). Las variables que conforman la ecuación para estimar  $ET_o$  son el resultado de distintos cálculos realizados con base en los datos presentados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Datos requeridos para el cálculo de la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Ubicación	Climatológicos
Latitud	Temperatura máxima a 2 m de altura
	Temperatura mínima a 2 m de altura
	Velocidad promedio del viento a 2 m de altura
Altitud	Humedad relativa máxima
	Humedad relativa mínima

Ubicación	Climatológicos
Horas de radiación solar directa (sin nubes)	

### 2.2.1.2. Evapotranspiración de Cultivo Bajo Condiciones Estándar

La Evapotranspiración de un Cultivo bajo Condiciones Estándar ( $ET_c$ ) consiste en la ET de un cultivo libre de enfermedades y bien fertilizado, que crece en grandes extensiones de terreno, bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y que alcanza una producción completa en las condiciones climáticas donde se encuentra. El método FAO Penman-Monteith calcula la  $ET_c$ , basándose en la correlación entre ésta y la  $ET_o$ , relación determinada por un Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ ) (Allen et al., 1998).

El coeficiente de cultivo  $K_c$  se refiere a la fracción de la  $ET_o$  que evapotranspira el cultivo. Su valor se calcula y valida por experimentación, con rangos de  $ET_c/ET_o$ . Los principales factores que hacen variar los valores de  $K_c$  a lo largo del desarrollo del cultivo son las diferencias en anatomía de la planta, características de los estomas, propiedades aerodinámicas y el albedo. Mientras  $ET_o$  representa un indicador de la demanda climática, el valor de  $K_c$  varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando sólo en una pequeña proporción en función del clima. Lo anterior permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas (Allen et al., 1998; Allen et al., 2003).

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar cambian progresivamente. Debido a las diferencias en ET que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de  $K_c$  correspondiente a un cultivo determinado, también presentará variaciones a lo largo de su período de crecimiento (Allen et al., 1998). Este período de crecimiento puede ser dividido en las siguientes etapas:

1. *Etapas Inicial.* La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo cubre aproximadamente el 10% de la superficie del suelo. Para cultivos perennes deciduos, la fecha de siembra es reemplazada por el momento en que aparecen las primeras hojas. La

duración de esta etapa depende en gran medida del tipo y variedad de cultivo, la fecha de siembra y del estado del tiempo. Durante esta etapa inicial, el área foliar es pequeña y la ET ocurre principalmente como evaporación en el suelo. El valor de  $K_c$  durante el periodo inicial ( $K_{c\ ini}$ ) es elevado cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca.

2. *Etapa de desarrollo del cultivo.* La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se ve cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convierte en el proceso más importante de pérdida de agua.
3. *Etapa de mediados de temporada.* Esta etapa comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez (generalmente señalada por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas o la aparición del color café en el fruto de ciertas especies, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la  $ET_o$ ). Durante esta etapa, el valor de  $K_c$  ( $K_{c\ med}$ ) alcanza su valor máximo y es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales.
4. *Etapa de final de temporada.* La etapa final de temporada o de crecimiento tardío, comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de  $K_c$  y  $ET_c$  finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. El valor de  $K_c$  en esta etapa ( $K_{c\ fin}$ ) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de  $K_{c\ fin}$  será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de  $K_{c\ fin}$  será bajo. Para algunos tipos de vegetación perenne en climas libres de heladas, los cultivos pueden desarrollarse durante todo el año, por lo que podría tomarse la fecha de término de la etapa final como la misma fecha de “siembra”.

(Allen et al., 1998; Brouwer & Heibloem, 1986; Chamblis & Witty, 2002; Palacios-Vélez, 2002).

### ***2.2.1.3. Evapotranspiración del Cultivo Bajo Condiciones No Estándar***

La Evapotranspiración de Cultivo bajo Condiciones No Estándar ( $ET_{c_{aj}}$ ) se refiere a la ET de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la ET real del cultivo puede desviarse de los valores de  $ET_c$  debido a condiciones no óptimas tales como la presencia de plagas y enfermedades, salinidad, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento y menor densidad de las plantas y por consiguiente, una reducción en la tasa de ET por debajo de los valores de  $ET_c$  (Allen et al., 1998; Dastante, 1978). La  $ET_{c_{aj}}$  se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico  $K_s$  o ajustando  $K_c$  a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la ET del cultivo (Allen et al., 1998).

### ***2.3. Requerimiento de Agua de Riego de Los Cultivos***

Para crecer satisfactoriamente, los cultivos deben alcanzar una economía de agua en que la demanda establecida por los factores climáticos se encuentre balanceada con la oferta disponible. A medida que decrece la cantidad de agua en la zona radicular del suelo y las pérdidas por transpiración superan los ingresos a través de la raíz, los cultivos comienzan a sufrir los efectos del estrés hídrico. Lo anterior se manifiesta de diferentes maneras, particularmente en la pérdida de presión de turgencia que repercute en el cierre parcial o total de los estomas durante las horas de luz solar en el día. Este cierre provoca, entre otros efectos adversos, una reducción en la tasa de fotosíntesis, resultando en una disminución en la producción de biomasa y consecuentemente en el rendimiento del cultivo (Allen et al., 2005; Haman & Izuno, 2003a; Hillel, 1982 y 1987; James, 1988; Kramer, 1995; Palacios-Vélez, 2002). A medida que los cultivos padecen mayores déficits de agua, menores serán sus rendimientos, particularmente si estos déficits se presentan en etapas críticas de su desarrollo, tales como en la etapa de floración (Boman et al., 2003; Brouwer & Heibloem, 1986; Brouwer et al., 1989; Chamblis & Witty, 2002; Hillel, 1982; Palacios-Vélez, 2002; Srinivasa et al., 2006).

En virtud que la demanda transpirativa de la atmósfera es casi continua, mientras que la precipitación pluvial ocurre ocasionalmente de forma irregular, la cantidad de agua que ésta aporta a los cultivos generalmente resulta insuficiente para lograr su desarrollo óptimo (Gurovich, 1999; Hillel, 1982; Palacios-Vélez, 2002). El requerimiento de agua de riego constituye la cantidad de agua adicional a la precipitación pluvial, que debe ser aplicada a un cultivo para satisfacer sus requerimientos de agua y favorecer su desarrollo óptimo (Brouwer & Heibloem, 1986; Smajstrla & Zazueta, 2002). Cuando el agua requerida por los cultivos es suministrada en su totalidad por precipitación pluvial, el riego resulta innecesario, por lo que el requerimiento de agua de riego es igual a cero. Cuando el suministro proviene completamente del riego, el requerimiento de agua de riego es equivalente a la  $ET_c$ . En la mayoría de los casos, parte del requerimiento de agua de los cultivos es siempre proveído por precipitación pluvial y el resto mediante riego a través de sus diferentes modalidades (Brouwer & Heibloem, 1986).

### **2.3.1. Sistemas de Riego**

Los métodos de riego se diferencian principalmente por la forma de aplicar el agua en el suelo. En la actualidad existen tres métodos básicos:

1. *Riego superficial (Gravedad)*. El agua se aplica sobre la superficie del terreno en los puntos de cota más altos para que ésta se mueva hacia los puntos de cota más bajos por acción de la gravedad. Este método se divide en 2 grupos: inundación total (melgas, cajetes) e inundación parcial (surcos y corrugaciones) (Enciso et al., 1998).
2. *Riego presurizado*. El agua es impulsada y conducida a través de tuberías hasta llegar a emisores localizados en los puntos de aplicación, que distribuyen el agua de manera localizada o sobre toda la superficie. Los sistemas presurizados requieren de una fuente de energía para lograr una adecuada circulación del agua dentro de la red hidráulica, que proviene generalmente de una motobomba eléctrica (aunque en algunos casos la diferencia de cota entre la fuente de agua y la superficie regada es suficiente para proporcionarle al agua una presión hidrostática acorde con el diseño de la red y con las características de descarga de los emisores de riego). Este método incluye los sistemas de aspersion (fijos, semifijos,

móviles) y sistemas de micro-irrigación (microaspersión, goteo) (Boman et al., 2002; Haman & Izuno, 2003b; Enciso et al., 1998).

3. *Riego subsuperficial*. Consiste en suministrar el agua al suelo a una profundidad tal que pueda distribuirse en la zona radicular por capilaridad. Este método tiene las variantes siguientes: con manto freático y cinta regante (Enciso et al., 1998).

En la selección del sistema de riego intervienen diversos factores tales como el cultivo, la pendiente, el relieve del terreno, las características del suelo, la calidad del agua, el clima, el gasto disponible, el valor del agua y los costos de los sistemas, entre otros (Brouwer et al., 1985, 1988; Enciso et al., 1998; Walker, 1989).

#### **2.3.1.1. Eficiencia de Aplicación de Sistemas de Riego**

El uso eficiente del agua durante el riego es de suma importancia para lograr ahorros de volúmenes de agua y aumentar la productividad de los cultivos, especialmente en zonas áridas y semi-áridas donde el agua constituye un recurso escaso. La Eficiencia de Aplicación ( $E_a$ ) se refiere a la relación que existe entre el agua suministrada por un sistema de riego y la cantidad que efectivamente queda retenida en la zona radicular del cultivo (Brouwer et al., 1989; Gurovich, 1985, 1999; Hillel, 1982; Palacios-Vélez, 2002; Walker, 1989). Este parámetro ( $E_a$ ) indica la proporción de la lámina o volumen de agua total aplicada por unidad de superficie, que se utiliza efectivamente para reponer el agua evapotranspirada en la zona radicular desde el evento de riego anterior (Gurovich, 1999).

Generalmente los sistemas superficiales de gravedad se caracterizan por ser los sistemas de riego menos eficientes en cuanto al aprovechamiento del agua debido a pérdidas excesivas ocasionadas por escurrimiento y percolación profunda (Brouwer et al., 1989). Su eficiencia puede mejorarse mediante su correcta operación, adecuando su diseño a las características de infiltración del suelo, la pendiente del terreno, caudal de agua disponible, entre otros factores. Pese a lo anterior, las eficiencias logradas con estas mejoras siguen estando por debajo de las eficiencias de los sistemas de riego presurizados (Gurovich, 1985; Palacios-Vélez, 2002). Estos últimos no solamente permiten una mayor eficiencia



en la aplicación del agua, sino que también permiten obtener mayores rendimientos al mantener el suelo a bajas tensiones de humedad al aplicarse el agua con mayor frecuencia y menores láminas (Palacios-Vélez, 2002).

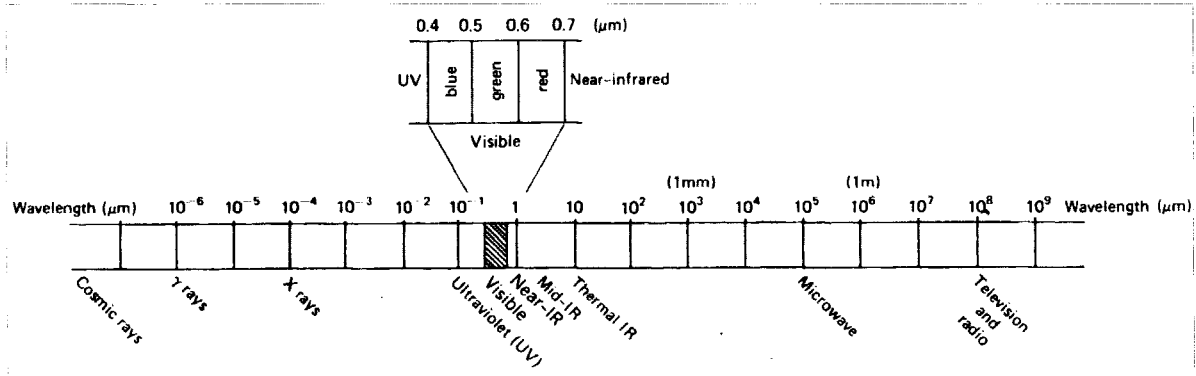
La Ea de los sistemas de riego se ve afectada principalmente por las decisiones de manejo de agua de riego de los operadores de los sistemas (USDA-SCS, 1991). Otros factores que influyen son la tasa o velocidad de infiltración del agua en el suelo, la tasa de aplicación de agua, la topografía y pendiente del terreno que se riega, la velocidad y dirección del viento, prácticas culturales que afectan el almacenamiento de agua en la zona radicular, tipo de cultivo, entre otros (Boman et al., 2002; Bos & Nutgeren, 1990; Brouwer et al., 1989; Palacios-Vélez, 2002).

### **3. Percepción Remota**

La percepción remota se define como la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos a través de un dispositivo que no tiene contacto físico con el objeto, área o fenómeno observado. Sensores óptico-electrónicos instalados a bordo de plataformas terrestres, aéreas y espaciales hacen posible la obtención de información acerca de las condiciones y características de objetos, áreas o fenómenos mediante la detección y medición de las variaciones en la distribución de la energía electromagnética que estos emiten, reflejan o dispersan (Lillesand et al., 2004).

#### **3.1. Espectro Electromagnético**

Por razones prácticas, la radiación electromagnética se organiza en un continuo denominado espectro electromagnético, en función de su longitud de onda. Este continuo suele dividirse en una serie de regiones o bandas (Figura 2) donde la radiación manifiesta un comportamiento similar (Campbell, 2002; Chuvieco, 2002; Jensen, 1996; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999).



**Figura 2.** Espectro electromagnético (Lillesand et al., 2004).

Como consecuencia de los efectos de absorción y dispersión que ocurren cuando la radiación electromagnética interactúa con la atmósfera, la observación espacial se reduce o limita a determinadas longitudes de onda capaces de atravesar esta barrera con mayor facilidad, conocidas como ventanas atmosféricas. Por lo anterior, las bandas del espectro de mayor interés para la percepción remota incluyen a las siguientes:

1. *Espectro visible (0.4 – 0.7 μm).* Es la única región que puede ser percibida por el ojo humano y donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales que se denominan azul (0.4 – 0.5 μm), verde (0.5 – 0.6 μm) y rojo (0.6 – 0.7 μm) debido a los colores primarios que son percibidos a esas longitudes de onda.
2. *Infrarrojo cercano (IRC, 0.7 – 1.3 μm).* También denominado infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad, así como diversas especies de plantas.
3. *Infrarrojo medio (1.3 – 8 μm).* En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de superficie terrestre. Suelen distinguirse dos bandas: la primera se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm y se denomina infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que resulta idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda comprendida principalmente en torno a 3.7 μm, se conoce

propiamente como infrarrojo medio (IRm), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura.

4. *Infrarrojo lejano o térmico (IRT, 8 – 14  $\mu\text{m}$ )*. Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
5. *Micro-ondas (M, por encima de 1 mm)*. Única región del espectro electromagnético que posee energía capaz de penetrar la atmósfera en cualquier condición. Dependiendo de las longitudes de onda involucradas, las micro-ondas pueden atravesar bruma, lluvias ligeras, nieve, nubes y humo.

(Campbell, 2002; Chuvieco, 2002; Jensen, 1996; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999).

## **3.2. Sensores Remotos**

### **3.2.1. Adquisición de Imágenes**

Los sensores remotos óptico-electrónicos instalados a bordo de las plataformas terrestres, aéreas y espaciales detectan en diferentes rangos del espectro electromagnético, la radiación promedio reflejada y/o emitida de los objetos y cubiertas presentes en una porción del terreno equivalente al tamaño de la unidad de información más pequeña observada por el sensor, denominada píxel. Estos valores son traducidos por un convertidor de señal análogo-digital a un valor numérico entero positivo, denominado Número Digital (ND) (Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999).

Los ND se transmiten a la Tierra y son ordenados en un arreglo matricial de píxeles denominado raster. Cada píxel, además de representar un área de superficie, posee un par de coordenadas (x,y) que corresponden a su ubicación en la matriz del raster que integra la imagen, así como un tono o nivel de gris específico con el que se representa cada ND en pantalla. Los niveles de gris se utilizan para realizar operaciones de realce e interpretación visual de la imagen,

mientras que los ND forman la base para las operaciones de interpretación digital (Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999).

### **3.2.2. Sensores Remotos Espaciales**

Los sensores remotos a bordo de las plataformas espaciales giran alrededor de la Tierra a altitudes de varios cientos de kilómetros, siguiendo orbitas polares o geoestacionarias. Los sensores remotos espaciales pueden clasificarse como sensores de baja, alta y mediana resolución. La resolución de un sensor se refiere a su habilidad para registrar información a detalle, en función del efecto combinado de las características de sus diferentes componentes, por lo que se distinguen cuatro tipos de resolución:

1. *Resolución espacial.* Se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen. Este término también es utilizado para designar el área de superficie mínima que abarca cada píxel de un raster, así como el tamaño del mismo píxel.
2. *Resolución espectral.* Indica los intervalos de longitud de onda específicos del espectro electromagnético que un sensor puede discriminar.
3. *Resolución radiométrica o dinámica.* Se refiere a la sensibilidad del sensor o a su capacidad para divisar variaciones en la radianza espectral que recibe. Representa el número de valores posibles que pueden adoptar los píxeles de una banda del espectro detectada y depende del número de bits que sea capaz de almacenar el sensor.
4. *Resolución temporal.* Se refiere a la periodicidad o frecuencia con la cual los sensores adquieren imágenes de la misma porción de la superficie terrestre.

(Campbell, 2002; Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004).

#### **3.2.2.1. El Sensor Landsat 5-TM**

El sensor denominado “Mapeador Temático” (TM por sus siglas en inglés) a bordo de la plataforma espacial Landsat 5, lanzada en 1984, es un sensor de resolución media que provee siete bandas de datos multiespectrales correspondientes a las regiones del espectro electromagnético presentadas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Bandas del Sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 (Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004).

<b>Banda multiespectral</b>	<b>Región del espectro</b>	<b>Longitud de onda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
TM1	Azul	0.45 – 0.52
TM2	Verde	0.52 – 0.60
TM3	Rojo	0.63 – 0.69
TM4	IRC	0.76 – 0.90
TM5	SWIR <sub>1</sub>	1.55 – 1.75
TM6	IRT	10.4 – 12.5
TM7	SWIR <sub>2</sub>	2.08 – 2.35

Las bandas multiespectrales del sensor TM cuentan con una resolución radiométrica de 8 bit ( $2^8 = 256$  ND) y una resolución espacial de 28.5 m x 28.5 m (exceptuando la banda del infrarrojo térmico con resolución de 120 m x 120 m). El satélite Landsat 5 Posee una órbita circular de 16 días por ciclo, polar y heliosíncrona a 705 Km de altitud. Cada imagen cubre un área aproximada de 185 por 170 Km (Campbell, 2002; Lillesand et al., 2004).

### **3.2.2.2. El Sensor SPOT 5-HRG**

El satélite SPOT 5, lanzado el 4 de mayo 2002, cuenta con dos sensores HRG (High Resolution Geometric) con 3 bandas multiespectrales con resolución espacial de 10 m y una banda correspondiente al infrarrojo medio con resolución espacial de 20 m.

**Tabla 3.** Bandas multiespectrales de sensores HRG a bordo del satélite SPOT 5 (SPOT Image, 2005).

Banda multiespectral	Región del espectro	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
B1	Verde	0.50 – 0.59
B2	Rojo	0.61 – 0.68
B3	IRC	0.78 – 0.89
B4	SWIR	1.58 – 1.75

Los sensores HRG cuentan además con dos bandas pancromáticas que abarcan la región del espectro entre los 0.49 y 0.69  $\mu\text{m}$ , con resolución espacial de 5 m que permiten generar un producto con resolución espacial de 2.5 m. Ambos sensores cuentan con una resolución radiométrica de 8 bits ( $2^8 = 256$  ND) (SPOT Image, 2005).

El Satélite SPOT 5 posee una órbita polar heliosíncrona a 822 Km de altitud y una resolución temporal de 26 días. Cada imagen cubre un área aproximada de 60 Km x 60 a 80 Km (Spot Image, 2005).

### 3.2.2.3. El Sensor QuickBird BGIS 2000

El sensor de alta resolución BGIS 2000 (Ball Aerospace Global Imaging System 2000) a bordo del satélite QuickBird, lanzado el 18 de octubre de 2001, cuenta con cuatro bandas multiespectrales con una resolución radiométrica de 11 bits ( $2^{11} = 2048$  ND) y una resolución espacial de 2.44 a 2.88 m (Satellite Imaging Corporation, 2008).

**Tabla 4.** Bandas multiespectrales del sensor BGIS 2000 a bordo del satélite QuickBird (Satellite Imaging Corporation, 2008).

Banda multiespectral	Región del espectro	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
B1	Azul	0.45 – 0.52
B2	Verde	0.52 – 0.60
B3	Rojo	0.63 – 0.69
B4	IRC	0.76 – 0.90

Este sensor cuenta además con una banda pancromática que abarca la región del espectro entre los 0.45 y 0.90  $\mu\text{m}$ , con una resolución radiométrica de 11 bits y una resolución espacial de 0.61 a 0.72 m. El satélite Quickbird posee una órbita polar heliosíncrona a 450 Km de altitud y una resolución temporal de 1 a 3.5 días. Cada imagen cubre un área aproximada de 16.5 Km x 16.5 Km (Satellite Imaging Corporation, 2008).

### ***3.3. Procesamiento de Imágenes Digitales***

El procesamiento de imágenes digitales involucra la manipulación de los ND de los píxeles presentes en las imágenes mediante operaciones matemáticas, empleando software especializado y apoyándose en equipos computarizados, con el objetivo de extraer información útil para aplicaciones específicas. Por lo general el procesamiento de imágenes digitales involucra operaciones de corrección, procesos de realce y técnicas de clasificación, entre otros (Jensen, 1986; Lillesand et al., 2004;).

#### ***3.3.1. Corrección de Imágenes Digitales***

La corrección se refiere a los procesos que tienden a eliminar distorsiones detectadas en las imágenes digitales, ya sea en la radiometría o en la localización de los píxeles que las componen, derivadas del proceso de adquisición. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a la adquisición idónea. Las operaciones de corrección incluyen las correcciones radiométricas y correcciones geométricas (Chuvienco, 2002).

##### ***3.3.1.1. Corrección Radiométrica***

La corrección radiométrica designa aquellas técnicas que modifican los ND originales de los píxeles de cada banda de las imágenes, con el objetivo de eliminar las degradaciones (ruidos) y distorsiones en los ND ocasionados por condiciones atmosféricas e iluminación, así como problemas derivados del mal funcionamiento del sensor tales como fallas, desajustes, entre otros (Lillesand et al., 2004).

##### ***3.3.1.2. Corrección Geométrica***

La corrección geométrica involucra cualquier cambio en la posición, coordenadas y escala de los píxeles de las imágenes para compensar distorsiones ocasionadas por errores geométricos tales como variación del tamaño de píxel, paralaje, desplazamientos en las direcciones fila-columna, entre otros, ocurridos durante el proceso de captura, de manera que las imágenes corregidas cuenten con la integridad geométrica de un mapa plano (Bartolucci et al., 1983; Chuvieco, 2002; Mather, 1999). Fuentes de errores geométricos comunes incluyen errores de los instrumentos, distorsiones panorámicas, curvatura de la tierra, rotación terrestre e inestabilidad de la plataforma que sustenta al sensor (variaciones en la altitud, posición y velocidad), entre otros (Lillesand et al., 2004). La corrección geométrica de imágenes satelitales generalmente se lleva a cabo por medio de la rectificación, mientras que para el caso de fotografías aéreas digitales, usualmente se recurre a la ortorrectificación.

#### **3.3.1.2.1. Rectificación**

La rectificación es el proceso mediante el cual la geometría de una imagen se convierte a planimétrica, conforme un determinado sistema de coordenadas cartográficas. Generalmente se realiza con la finalidad de que los resultados de los análisis derivados de las imágenes satelitales tengan validez cartográfica, así como para facilitar su integración o superposición directa con otros datos cartográficos e imágenes dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Chuvieco, 2002; Haralick, 1973, citado en Jensen, 1996; Mather, 1999).

Generalmente la rectificación de las imágenes satelitales se realiza en las siguientes fases:

1. *Establecimiento de puntos de control terrestres.* El establecimiento de puntos de control terrestres (GCPs, por sus siglas en inglés) consiste en seleccionar puntos claramente visibles sobre la imagen original, a los cuales se les asocian las coordenadas planas (X,Y) de la proyección cartográfica a la cual se pretende ajustar (Atkinson & Smith, 2001; Chuvieco, 2002). Los GCPs generalmente representan rasgos humanos de paisaje en posiciones conocidas del terreno, no sujetos a dinamismo temporal tales como cruces de caminos, límites de propiedad, vías de ferrocarril y otros tipos de infraestructura fácilmente identificables, comunes



a la imagen y a la cartografía de referencia. La calidad del ajuste dependerá del rigor con que se localicen los GCPs y de cómo se definan realmente los errores geométricos de la imagen (Chuvieco, 2002).

2. *Interpolación espacial o cálculo de funciones de transformación.* La corrección geométrica de la imagen, propiamente dicha, se efectúa relacionando las coordenadas de la base cartográfica de referencia (X,Y) con las coordenadas de ubicación matricial de los píxeles que integran imagen distorsionada (x,y). Esto mediante funciones polinómicas de transformación o ajuste de diferente orden, cuyos coeficientes se calculan a partir de los GCPs seleccionados. El método más habitual para obtener estos coeficientes es aplicando un ajuste por mínimos cuadrados, con operaciones de cálculo idénticas a las que requiere una regresión múltiple convencional. De esta manera, a partir de las coordenadas del mapa de referencia, puede estimarse en un nuevo arreglo matricial con la geometría correcta, la columna y línea de los píxeles de la imagen distorsionada que corresponden a esas localizaciones cartográficas. La bondad del grado de ajuste obtenido se mide por la importancia de los residuales (Campbell, 2002; Chuvieco, 2002; Jensen, 1996; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999).
3. *Interpolación radiométrica o remuestreo.* Involucra la extracción de ND de los píxeles de la imagen distorsionada original y transferencia a sus posiciones correspondientes en el nuevo arreglo matricial con la geometría correcta (Chuvieco, 2002; Mather, 1999). La transferencia de ND suelen abordarse por tres métodos: 1) vecino más cercano, que sitúa en cada celda de la imagen corregida el ND del pixel más cercano en la imagen original, 2) interpolación bilinear, que calcula un valor para cada celda en la nueva imagen basado en el promedio ponderado de los cuatro píxeles más cercanos en la imagen original, y 3) convolución cúbica, mediante cual el valor asignado a cada celda se realiza por medio del análisis de los 16 píxeles que rodean cada píxel de la imagen original (Campbell, 2002; Chuvieco, 2002; Jensen, 1996; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999).

### **3.3.2. Realce de Imágenes**

El realce de imágenes involucra métodos orientados a mejorar la definición de los rasgos de terreno presentes en ellas. Este proceso tiene como objetivo crear nuevas imágenes a partir de las originales para aumentar la cantidad de información que puede ser utilizada en la interpretación. Las técnicas más comunes incluyen la manipulación del contraste, filtros espaciales, convoluciones, realce de bordes, análisis de Fourier, índices de vegetación, componentes principales y canónicos y transformación del sistema de formación de color (Lillesand et al., 2004).

### **3.3.3. Clasificación de Imágenes**

La clasificación es el proceso mediante el cual los píxeles de una imagen digital se identifican y se asignan a un determinado número de clases a fin de lograr su representación temática. Esta clasificación puede llevarse a cabo en base a criterios relacionados estrictamente con los valores espectrales de los píxeles, el contexto espacial en el que estos aparecen en las imágenes, arreglos o distribuciones espaciales, texturas, formas, criterios temporales, e información auxiliar, entre otros (Campbell, 2002; Chae et al., 2004; Chuvieco, 2002; Rhyerd & Woodcock, 1996; Lillesand et al., 2004; Mather, 1999). El proceso de clasificación de imágenes digitales generalmente involucra tres fases: 1) fase de entrenamiento, 2) fase de asignación, y 3) fase de verificación de resultados (Chuvieco, 2002).

#### **3.3.3.1. Fase de Entrenamiento**

En la fase de entrenamiento se busca llevar a cabo la caracterización de los patrones que definen en la imagen las distintas clases temáticas de interés. Los métodos tradicionales para la selección de muestras de entrenamiento incluyen el método supervisado y el método no supervisado (Bartolucci et al., 1983; Chuvieco, 2002).

##### **3.3.3.1.1. Método Supervisado**

El método supervisado generalmente parte de un conocimiento previo de la zona a partir del cual se seleccionan o delimitan muestras de píxeles que corresponden a áreas representativas de cada una de las clases de interés

definidas con anterioridad, conocidas como clases informacionales. Estas muestras de entrenamiento sirven para estimar ciertos parámetros de los algoritmos de reconocimiento de patrones y de esta manera “entrenar” a la computadora a reconocer los píxeles correspondientes a las clases informacionales (Bartolucci et. al., 1983; Campbell, 2002; Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004).

#### **3.3.3.1.2. Método No Supervisado**

El método no supervisado se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen mediante la búsqueda automática de un conjunto sistemático o aleatorio de los agrupamientos naturales o grupos de píxeles homogéneos similares espectralmente. Usualmente la definición de estos agrupamientos se basa en la selección de tres parámetros: variables que intervienen en el análisis, criterio para medir la similitud entre píxeles, y criterios del proceso de agrupamiento (Bartolucci et al. 1983; Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004).

#### **3.3.3.2. Fase de Asignación**

Una vez finalizada la selección y análisis de las categorías que intervendrán en la clasificación, se inicia la asignación o agrupación de los píxeles de la imagen a una de las clases informacionales seleccionadas previamente. El producto final de esta fase lo constituye una nueva imagen cuyos ND expresan la clase temática a la que se ha asignado cada uno de los píxeles de la imagen original (Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004). Algunos criterios de asignación tradicionales y alternos empleados en la clasificación de imágenes digitales incluyen:

1. *Distancia mínima.* El píxel se asigna a la clase más cercana, en función de la distancia espectral entre el píxel y la media aritmética o centroide de la clase. La distancia calculada es lineal y no considera la dispersión de cada clase o la correlación que exista entre las bandas. Tiende a delimitar grupos circulares de radio proporcional a la situación de cada clase (Chuvieco, 2002).

2. *Paralelepípedos*. El usuario fija un área de dominio para cada clase teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Posteriormente, un píxel es asignado a dicha clase si sus ND se encuentran dentro de esa área de dominio en todas las bandas consideradas. Este criterio tiende a delimitar polígonos multidimensionales de lados paralelos en torno al centro de la clase (Chuvieco, 2002).
3. *Máxima verosimilitud*. Se calcula la probabilidad de que un píxel con un determinado ND pertenezca a cada una de las clases que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad. Este método puede usarse de forma automática o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Adicionalmente permite definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación (Chuvieco, 2002).
4. *Árbol de decisiones*. Cada una de las clases se discriminan secuencialmente en base a variables espectrales, texturales o información auxiliar. Para cada clase se establecen reglas dicotómicas de interpretación que permiten concentrar su discriminación a partir de las variables en que mejor se discrimina en lugar de utilizar todas indistintamente (Chuvieco, 2002).
5. *Lógica difusa (Fuzzy Logic)*. Cada píxel se etiqueta en varias clases con diferentes grados de membrecía o pertenencia en función de su similitud espectral. La función de pertenencia puede corresponder a una distribución binaria (0 no pertenece, 1 pertenece) o puede concebirse una función de pertenencia comprendida entre 0 y 1 (Mather, 1999; Shank & Warner, 1997; Wang, 1990, citado en Chuvieco, 2002).
6. *Redes neuronales artificiales*. Buscan predecir un cierto comportamiento complejo, simulando el comportamiento del cerebro humano, a partir de muestras de entrada y salida observadas. Con base en este criterio la red “aprende” a reconocer el resultado a partir de los valores de entrada, clasificando el resto de las observaciones de acuerdo a esas reglas

(Chuvienco, 2002; Civco, 1993, citado en Mas, 2005; Mather, 1999; Shank & Warner, 1997).

7. *Algoritmos genéticos*. Son algoritmos de búsqueda inspirados en los mecanismos de selección natural de las especies y la combinación genética que se presenta en la reproducción de los individuos, tales como cruzamiento y mutación (Mather, 1999).

### **3.3.3.3. Fase de Evaluación de los Resultados**

Luego de realizar la clasificación digital, resulta necesaria la evaluación de los resultados a fin de comprobar la validez del método y el producto generado. Este proceso involucra la comparación de la clasificación obtenida, con una fuente externa que se considere fiel representante de la realidad presente en el terreno en el momento de la adquisición de la imagen (verdad-terreno). La estimación del grado de exactitud o precisión de la clasificación se puede lograr por medio de diversos métodos tales como la valoración cualitativa, la comparación con fuentes estadísticas convencionales y la selección al azar de muestras espaciales independientes y representativas de las condiciones del terreno (Chuvienco, 2002; Foody, 2004; Jensen, 1996).

### **3.4. Aplicación de Técnicas de Percepción Remota Para Estudios Agrícolas**

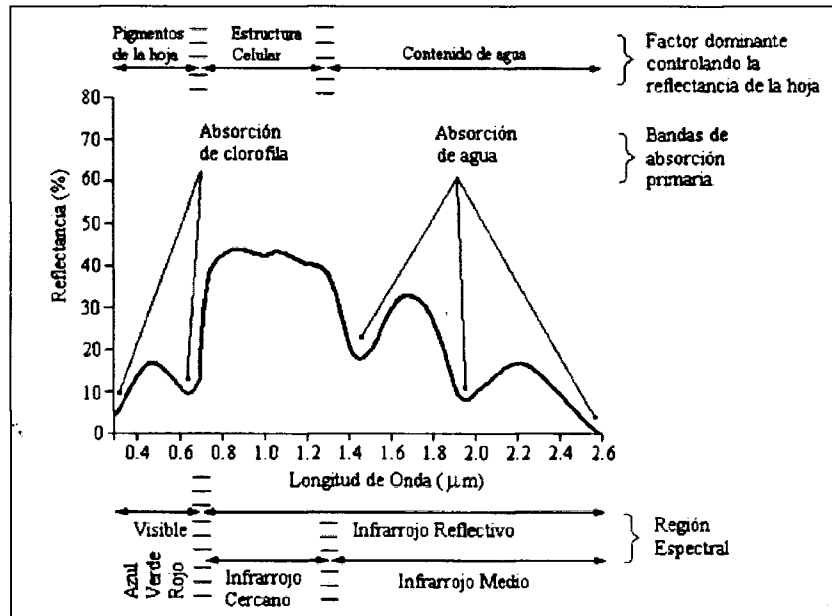
El uso de técnicas de percepción remota en los estudios agrícolas cuenta con una larga historial, existiendo numerosos antecedentes de aplicaciones y métodos (Carfagna & Gallego, 2005; Lillesand et al., 2004). Algunas aplicaciones agrícolas de dichas tecnologías incluyen: la discriminación entre tipos y especies de cultivos (Aplin et al., 2003; Hoffer et al., 2004; Manjarrez-Domínguez et al., 2007), determinaciones de ET y requerimientos de agua de riego de cultivos (Ben Asher et al., 1986; Bolaños-González et al., 2001; Fuentes et al., 2002), detección de estrés hídrico de cultivos (Aguado et al., 2001; Idso et al., 1981), cartografía y monitoreo de plagas (Hughes et al., 2001; Laba et al., 2005), predicciones de cosechas (Akhmedov et al., 2004; Baez-González et al., 2005; Cook, 2003), agricultura de precisión (Al-Rajehy et al., 2002; Barnes et al., 1997, 2003; Casady et al., 2003), identificación, zonificación y estimación de superficies agrícolas,

(Berterretche, 2000; Calera & Martínez, 2001; Camargo et al., 2005; Li & Gar-On Yeh, 2001), entre otros.

La proliferación del uso de técnicas de percepción remota para aplicaciones agrícolas, particularmente lo concerniente a la recopilación de información sobre superficies agrícolas sembradas y en producción, se debe en gran medida al consenso predominante de que la información proveniente de los sensores remotos es obtenida de manera objetiva y precisa, de forma más eficiente y a menores costos, comparativamente con los métodos tradicionales tales como encuestas, entrevistas, censos, estimaciones de expertos o datos administrativos, entre otros (Camargo et al. 2005; Campbell, 2002). Otro factor que ha contribuido a su uso en años recientes han sido las rebajas en los costos de las imágenes satelitales, así como en el software comercial requerido para su procesamiento (Martínez et al., 2005).

#### ***3.4.1. Respuesta Espectral de Cobertura Vegetal***

La mayoría de los estudios agrícolas que involucran técnicas de percepción remota, se apoyan en las respuestas espectrales de las coberturas vegetales (Kumar, 2002; Barnes et al., 2003). Las diferentes regiones del espectro electromagnético reflejadas, absorbidas y emitidas por estas cubiertas son modificadas principalmente por las variaciones en su composición y estructura (Figura 3). La banda del rojo (R) se caracteriza por su alta absorción de energía azul y roja (70 – 90%) debido a los pigmentos fotosintéticos presentes en las hojas, mientras que la banda del infrarrojo cercano (IRC) es una región de alta reflectancia y baja absorción de radiación, afectada por la estructura interna de las mismas. La banda del infrarrojo medio (SWIR) se ve particularmente afectada por la concentración de agua en los tejidos de las plantas (Chuvienco, 2002; Lillesand et al., 2004; Mather, 1996; Swain & Davis, 1978).



**Figura 3.** Respuesta espectral característica de vegetación vigorosa (Swain & Davis, 1978).

Asimismo, bajas concentraciones de agua lleva a un incremento en la reflectancia del visible y el SWIR y a una disminución en el IRC. De lo anterior es posible afirmar que cuanto mayor sea el contraste entre las bandas visibles, especialmente el R y el IRC, mayor será el vigor de la vegetación (Chuvienco, 2002; Barret & Curtis, 1992, citado en Vela, 2000). El alto contraste entre la energía absorbida por la vegetación en el R y la reflejada por ella en el IRC, facilita su discriminación o diferenciación de otros tipos de cubiertas.

### 3.4.1.1. Índices de Vegetación

Los índices de vegetación tienen su base en el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa y son el resultado de combinaciones matemáticas de los valores de reflectividad de dos o más bandas en las cuales la vegetación presenta una respuesta distintiva respecto a otras cubiertas (generalmente las bandas del R e IRC). Mediante estos índices se pretende extraer información relacionada con las propiedades de cubiertas vegetales, aumentando la señal de la vegetación y minimizando la influencia de perturbaciones atribuidas al suelo, condiciones atmosféricas, entre otros (García-Haro et al., 1997; Goward & Huemmrich, 1992; Lillesand et al., 2004).

### **3.4.1.1.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada**

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) constituye uno de los índices de vegetación más utilizados en las aplicaciones agrícolas de percepción remota, en virtud que reúne dos características muy importantes: sencillez matemática y poder de normalización de la respuesta espectral de cubiertas vegetales, alcanzando un alto grado de relación con diversos parámetros de interés agrícola, tales como la biomasa, el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), entre otros (Baez-González, et al., 2005; Baret & Guyot, 1991; Granados, 1998). El NDVI se determina como la diferencia normalizada entre las bandas del R e IRC, mediante la siguiente ecuación (García-Haro et al., 1997):

$$\text{NDVI} = (\text{IRC} - \text{R}) / (\text{IRC} + \text{R}) \quad (3)$$

Donde:

- NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada,
- IRC: banda del infrarrojo cercano,
- R: banda del rojo.

El NDVI además de compensar condiciones por cambios de iluminación, pendientes, orientación y otros factores extremos en la caracterización de distintas cubiertas, ayuda a mejorar la discriminación entre diferentes tipos de vegetación, así como superficies con presencia y ausencia de ella (Bolaños-González et al. 2001; Calera & Martínez, 2001; Campbell, 2002; Ehlers et al., 2004; Gianetti et al. 2001, citado en De la Vega et al., 2005; Lillesand et al., 2004; Richards, 1998, citado en Salinas & Velasco, 2007). El uso de NDVI también facilita la interpretación de los datos debido a que permite obtener valores de reflectividad en un rango de variación fijo (entre  $\pm 1$ ). Las superficies con vegetación generalmente producen valores altos de NDVI debido a su alta reflectancia en el IRC y su baja reflectancia en el R, presentando un umbral crítico en torno al valor 0.2. En contraste, las nubes, agua, hielo y nieve, por tener una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, producen valores negativos. El suelo desnudo, rocas y acciones antrópicas cuentan con reflectancias similares en ambas bandas,



por lo que producen valores cercanos a cero (Chuvieco, 2002; García-Haro et al., 1997; Lillesand et al., 2004).

#### **4. Sistemas de Información Geográfica**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como un conjunto de métodos y tecnologías basado en sistemas computarizados, para la recopilación, manejo, análisis, modelación y presentación de datos geográficos para una amplia gama de aplicaciones (Davis, 2001). La utilidad principal de un SIG radica en su capacidad para construir modelos o representaciones simplificadas del mundo real a partir de bases de datos digitales georreferenciadas y su uso en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una actividad antrópica produce sobre un determinado escenario en una época específica. La construcción de modelos constituye un instrumento muy eficaz para el análisis de tendencias y determinación de los factores que influyen en ellas, así como para evaluar las posibles consecuencias de las decisiones de planificación sobre los recursos existentes en un espacio geográfico determinado, entre otros (FAO, 1999).

##### **4.1. Datos Geográficos**

Los datos se consideran geográficos si poseen una localización y si son medibles. Estos datos se clasifican en datos espaciales y no espaciales. Los datos espaciales son las representaciones de objetos geográficos, asociados con ubicaciones específicas en el mundo real. La representación de estos objetos en un SIG se hace por medio de puntos, líneas y polígonos. Por otro lado, los datos no espaciales o atributos, constituyen las descripciones numéricas o alfanuméricas de los objetos geográficos. Estos datos se encuentran almacenados en tablas de atributos que contienen varios campos, normalmente referidos a las columnas de las tablas, mientras que las filas corresponden a los registros de los objetos del mundo real representados (Aronoff, 1989; Bernhardsen, 1999; Burrough, 1986; Davis, 2001).

##### **4.1.1. Modelos de Datos Geográficos**

Los datos geográficos en un SIG cuentan con dos tipos de formatos o estructuras de datos:

1. *Modelo vectorial.* En el modelo de datos vectorial, se utilizan vectores definidos por pares de coordenadas (X,Y) relativas a algún sistema cartográfico, para representar los objetos geográficos. Este modelo se emplea en el manejo de información discreta, donde los objetos cuentan con límites e identidades claramente definidas. La captura de la información en el formato vectorial se hace por medio de mesas digitalizadoras, convertidores de formato raster a formato vectorial, sistemas de geoposicionamiento global (GPS), entrada de datos alfanumérica, entre otros.
2. *Modelo raster.* En el modelo de datos raster, se divide el espacio geográfico en una matriz de celdas usualmente rectangulares, organizada por filas y columnas. Cada celda es de tamaño constante y cuenta con una ubicación y valor. Los valores asignados a cada celda corresponden a un atributo asociado, representativo de toda la superficie abarcada por la celda. Este modelo de datos se emplea para determinar fenómenos continuos que carecen de límites e identidades definitivas. La captura de la información en este formato se hace mediante scanners, imágenes de satélite, fotografía aérea, entre otros.

(Aronoff, 2005; Bernhardsen, 1999; Burrough, 1993; Davis, 2001).

#### **4.1.2. Organización de Datos Geográficos en Sistemas de Información Geográfica**

Los datos geográficos se agrupan de acuerdo con características comunes, formando categorías o coberturas. Los SIG almacenan los datos correspondientes a estas coberturas en diferentes capas temáticas independientes que comparten características geográficas comunes, incluyendo un mismo sistema de coordenadas. Esta organización lógica, además de hacer más eficiente y rápido el manejo de la información, facilita la integración de las capas temáticas para la identificación y análisis de las interrelaciones que existen entre los datos que contienen (Aronoff, 2005; Campbell, 2002; Ehlers, 1990).

#### **4.2. Análisis Espacial**

La principal fortaleza de los SIG, además de su capacidad de recolectar, almacenar e integrar grandes volúmenes de información provenientes de diversas fuentes, reside en el análisis espacial de datos geográficos (Burrough, 1986; Campbell, 2002). Este análisis se refiere al conjunto de herramientas que amplían las capacidades del análisis estadístico tradicional para abordar aquellos casos en donde la distribución o las relaciones espaciales de los datos tienen influencia sobre las variables medidas o consultadas. Las principales herramientas de análisis espacial en un SIG incluyen la superposición, determinación de áreas de influencia, análisis de vecindad, análisis de redes, modelos digitales del terreno o de elevación, entre otras (Aronoff, 2005; Bernharden, 1999; Davis, 2001).

### ***4.3. Integración de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota***

El objetivo último de los SIG, así como de las técnicas de percepción remota, involucra la recolección de datos para el análisis de información relacionada con objetos y rasgos geográficos naturales y antrópicos, por lo que ambas tecnologías cuentan con capacidades compatibles (Aronoff, 2005). Los SIG se ven beneficiados por las ventajas que ofrece la percepción remota como fuente de información, tales como cobertura espacial de áreas geográficas extensas, consistencia en la calidad y condiciones de recolección de datos, adquisición de datos en tiempo real, recolección de datos provenientes de zonas inaccesibles o de acceso difícil, entre otros (Davis, 2001). En igual medida los datos provenientes de la percepción remota se benefician enormemente de la información que los SIG son capaces de generar mediante el análisis espacial. Por lo anterior, se considera que el uso integrado de tecnologías SIG y de percepción remota permite obtener una visión más sintética de las características de un determinado territorio, mejorando el potencial de extracción de información geográfica, así como la calidad de la misma (Aronoff, 2005; Chuvieco, 2002; Gao, 2002).

## **5. Objetivos del Proyecto de Tesis**

### ***5.1. Objetivo General***

Cuantificar el consumo mínimo de agua de la citricultura con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares en la zona cítrica del

estado de Nuevo León y evaluar alternativas que logren un uso más eficiente de dicho recurso.

### **5.2. Objetivos Específicos**

1. Evaluar el consumo bruto mínimo total de agua utilizada por la citricultura con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares.
2. Desarrollar un modelo para el cálculo de la demanda de agua de la citricultura con riego en producción en Hualahuises y Linares, con base en el método FAO Penman-Monteith, adaptado a las condiciones climatológicas de la zona citrícola de Nuevo León.
3. Desarrollar modelos basados en el balance hídrico del suelo que permitan cuantificar los ahorros potenciales de volúmenes de agua destinada para la citricultura con riego en Hualahuises y Linares, a través del análisis de diferentes escenarios y sub-escenarios de tecnificación de sistemas de riego y reconversión productiva de cultivos.

## **CAPITULO II. METODOLOGÍA**

### **1. Descripción de Zona de Estudio**

#### **1.1. Ubicación Geográfica**

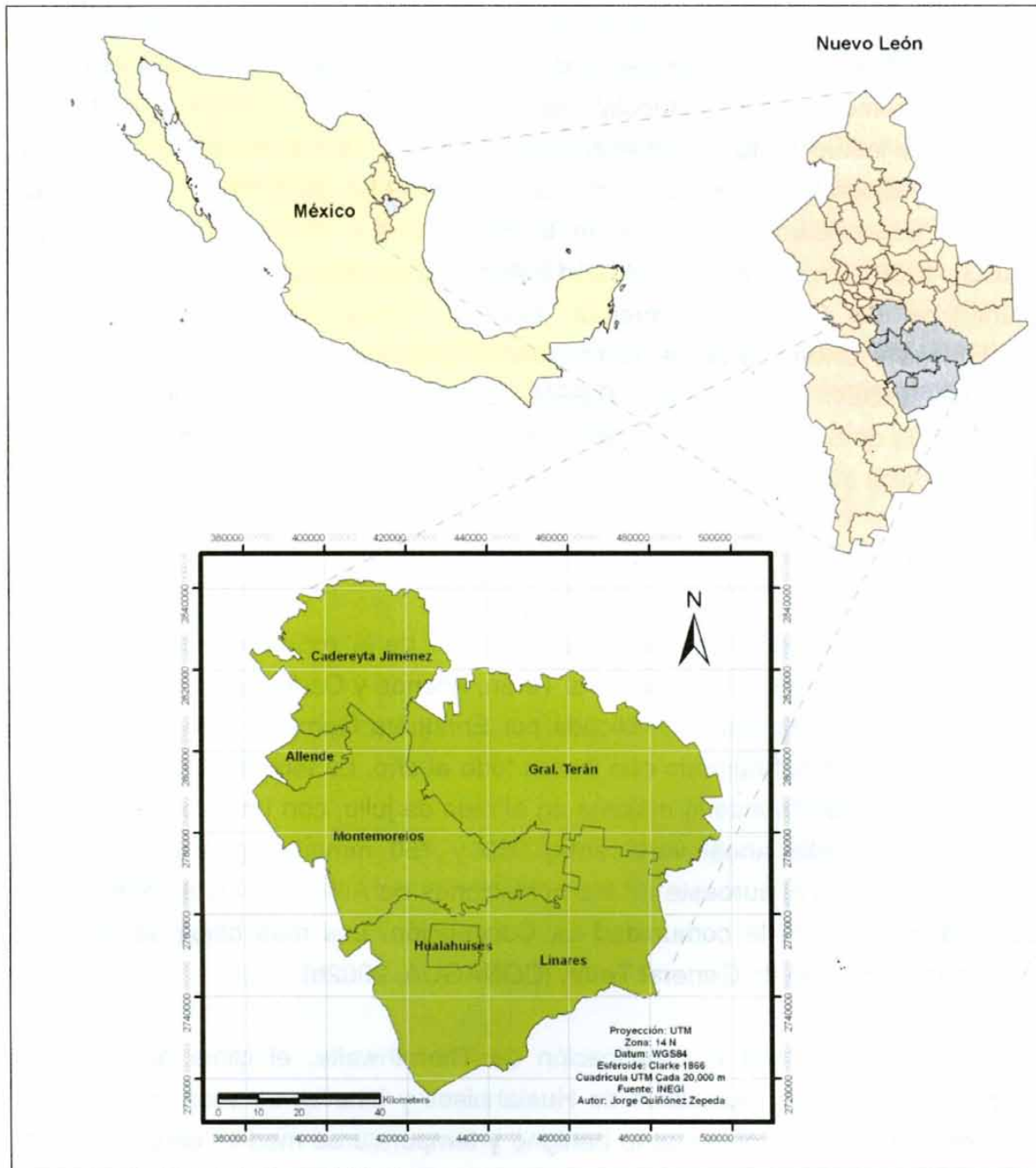
La zona agroecológica centro del estado de Nuevo León, tradicionalmente conocida como la “zona citrícola”, se localiza entre los paralelos 25°42’0” y 24°33’0” de latitud Norte y los meridianos 100°11’0” y 99°1’0” de longitud Oeste en la región fisiográfica conocida como la Provincia Llanura Costera del Golfo de México, específicamente dentro de la Subprovincia de Llanuras y Lomeríos (INEGI, 1986). En cuanto a su división política, se concentra principalmente en los municipios de Cadereyta Jiménez, General Terán, Allende, Montemorelos, Hualahuises y Linares (Fuente: Comunicación personal, Ing. Juan Livas, Director General, FIDECITRUS, 2007; ITESM, 2002), con una extensión territorial aproximada de 8,230 Km<sup>2</sup>. La Figura 4 presenta la ubicación geográfica de la zona agroecológica centro del estado de Nuevo León.

#### **1.2. Clima**

El clima que prevalece en la mayor parte de la zona comprendida por los municipios de Montemorelos, General Terán, Allende y Cadereyta Jiménez, según la clasificación de Koppen, modificada por Enriqueta García (1964), corresponde al tipo semicálido-subhúmedo con lluvias todo el año. La temperatura oscila entre 15° y 23°C, detectándose la máxima en el mes de julio, con un valor de 30°C. La precipitación media anual varía entre 350 y 750 mm/año, presentándose los valores más altos al suroeste de las poblaciones de Allende y Montemorelos, así como al noreste de la comunidad La Concepción. Los más bajos se registran próximos al poblado de General Terán (CONAGUA, 2002b).

De acuerdo con la clasificación de Thomthwaite, el clima en la región comprendida por los municipios de Hualahuises y Linares es seco, sin estación bien definida, cálido con invierno benigno y temperaturas medias anuales de 21° C, siendo los meses de diciembre, enero y febrero los que experimentan las mínimas temperaturas que en ocasiones descienden a 10° C bajo cero. Por otra parte, las temperaturas máximas se presentan en los meses de junio, julio y

agosto y alcanzan hasta 45° C. La temporada de lluvia comprende los meses de mayo a octubre, siendo los meses de agosto, septiembre y octubre en que se registran las máximas precipitaciones. El régimen pluvial medio anual es de 770 mm (CONAGUA, 2002c).



**Figura 4.** Ubicación geográfica de zona agroecológica centro del estado de Nuevo León.

### 1.3. Hidrología Superficial

Los principales ríos que atraviesan los Municipios de Hualahuises y Linares son: El Salado, Sabinas, Álamo, Pesquería, San Juan, Pílon, Ramos, Pablillo y Conchos (ITESM, 2002).

### 1.4. Hidrogeología

Datos sobre los niveles piezométricos del acuífero Citrícola Norte y Citrícola Sur, que abarcan la mayor parte de la zona agroecológica centro, indican que los niveles freáticos se ubican a profundidades mayores de 1 m (CONAGUA, 2002b, 2002c).

### 1.5. Edafología

Los suelos que predominan en la subprovincia son los vertisoles profundos y de color oscuro. Algunas asociaciones presentes en los diversos sistemas de topofomas incluyen las de regosoles que se encuentran en el pequeño lomerío cercano al límite con la Sierra Madre Oriental; y en los lomeríos suaves con llanuras que forman la mayor parte de la subprovincia. En este último sistema de topofomas existen también asociaciones de suelos dominados por rendzinas y por xerosoles háplicos, cálcicos y lúvicos profundos y de color claro (INEGI, 1986). La Tabla 5 presenta los tipos de suelos según las topofomas presentes en la zona de estudio.

**Tabla 5.** Tipos de suelos según topofomas presentes en la subprovincia de llanuras y lomeríos (INEGI, 1986).

Sistemas de topofomas	Suelos
Sierra baja	Rendzina con litosol sobre fase petrocálcica.
Lomerío suave	Asociación dominante: vertisol crómico con regosoles y feozems profundos o sobre fase lítica profunda. Otros suelos presentes: litosol y luvisol crómico.
Lomerío suave con bajadas	Asociaciones dominantes: regosoles éutricos con litosol y vertisol crómico sobre fase lítica. Vertisol

Sistemas de topoformas	Suelos
Lomerío suave con llanuras	crómico con regosol y luvisol crómico. Otros suelos presentes: rendzina, vertisol, pélico y cambisol cálcico. Asociación dominante en los lomeríos: rendzina con litosol y foezm lúvico sobre la fase petrocálcica. Regosol calcárico con foezm calcárico y litosol sobre fases diversas. En las llanuras: castañozem lúvico y háplico asociados con vertisoles y foezms. Otros suelos presentes: xersosoles (cálcico, lúvico y háplico); foezm lúvico, vertisoles (crómico y pélico), luvisol crómico, chernozem, fluvisol y castañozem.

### 1.6. Vegetación

El tipo de vegetación que domina la subprovincia de llanuras y lomeríos es el matorral submontano, conformado por elementos inermes y espinosos con alturas entre 2 y 4 m. Otro tipo de vegetación común presente es el matorral espinoso tamaulipeco, conformado por arbustos altos de tallo claro que frecuentemente presentan índices elevados de densidad en su distribución, encontrándosele en los sistemas de topoformas llamados lomerío suave con llanos y lomería suave. Por lo demás existen algunos bosques de encino, encino-pino y pino en los sitios más altos de la subprovincia; pastizales cultivados e inducidos en el lomerío suave con llanuras; algunos mezquiales y manchones de selva baja caducifolia (Delgado et al., 2004; INEGI, 1986).

**Tabla 6.** Vegetación según topoformas presentes en la subprovincia de llanuras y lomeríos (INEGI, 1986).

Sistemas de topoformas	Vegetación
Sierra baja	Matorral submontano.
Lomerío suave	Matorral espinoso tamaulipeco.
Lomerío suave con bajadas	Bosque de encino, encino-pino, bosque de pino, matorral submontano y chaparral.
Lomerío suave con llanuras	Selva baja caducifolia, selva baja caducifolia espinosa, matorral submontano, matorral espinoso tamaulipeco, bosque de encino, mezquital, pastizal



Sistemas de topoformas	Vegetación
inducido y pastizal cultivado.	

## **2. Imágenes Satelitales**

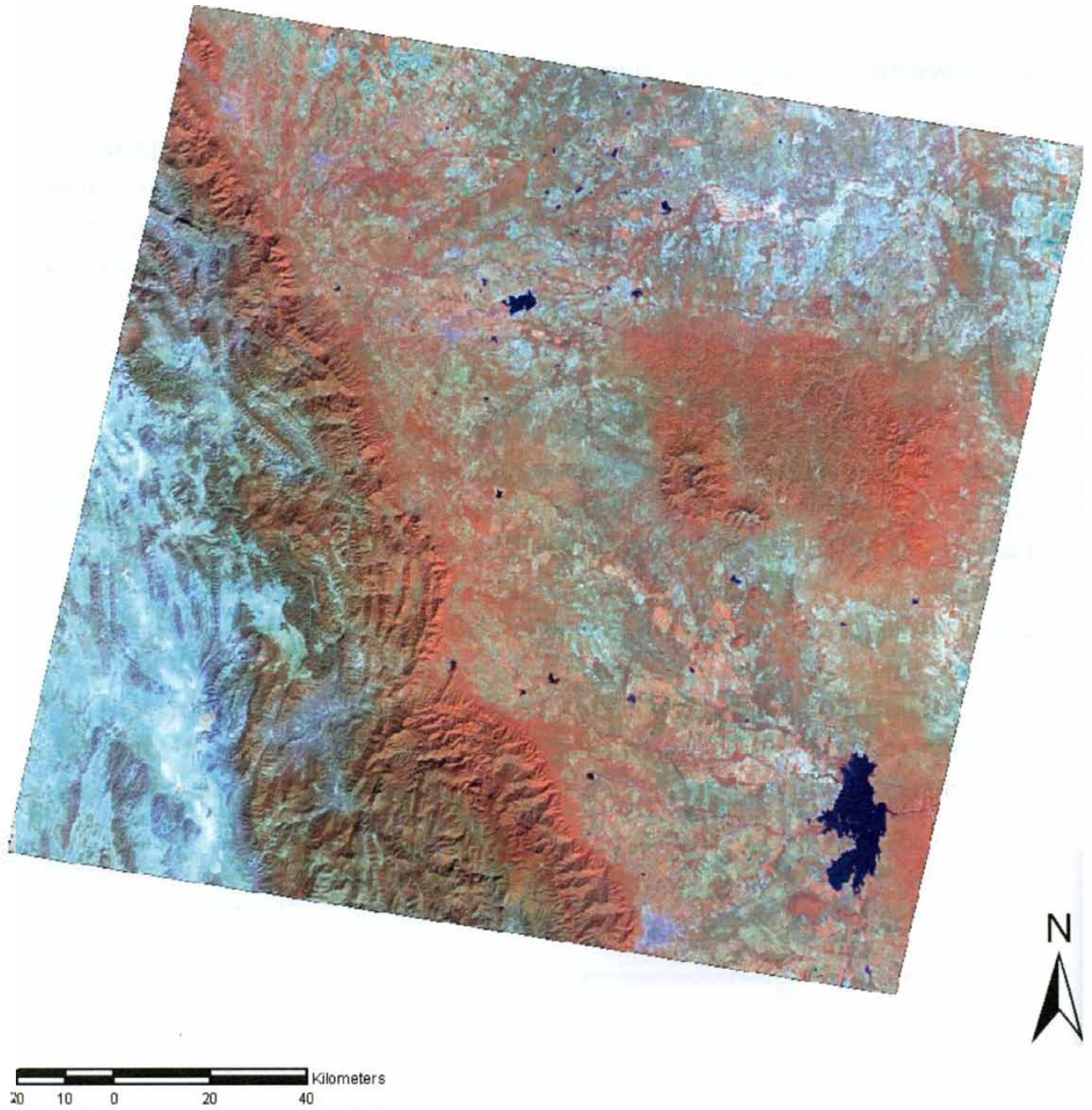
### **2.1. Selección de Imágenes Satelitales**

Para la estimación de las superficies de las huertas de cítricos en producción en la zona citrícola de Nuevo León, se seleccionaron dos imágenes Landsat 5-TM con fechas 16 de noviembre 2006 (Figura 5) y 20 de febrero 2007 (Figura 6). Adicionalmente, como apoyo para la interpretación visual, se adquirieron tres imágenes pancromáticas SPOT 5 de fecha 19 de mayo 2006 (Figura 7), 8 de julio 2006 (Figura 8) y 11 de abril 2007 (Figura 9).

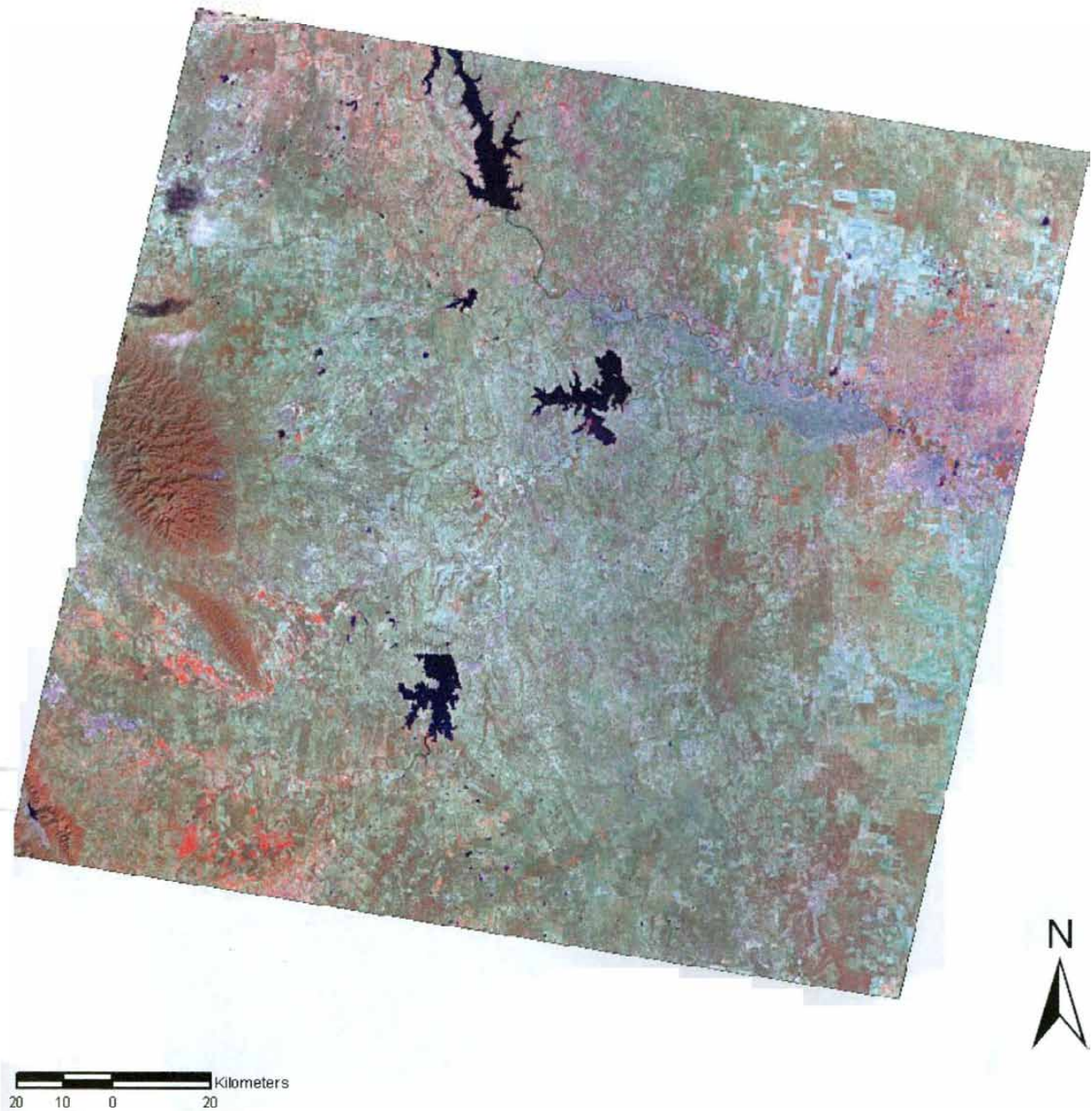
Los principales criterios utilizados para la selección de las imágenes fueron grado o porcentaje de nubosidad inferior al 9%, ciclos de desarrollo de los principales cultivos de la zona y fechas de adquisición que coincidieran lo más cercano posible con temporadas de escasa lluvia en el área de estudio.

### **2.2. Características de Imágenes Satelitales Seleccionadas**

Los datos técnicos correspondientes a las imágenes multibanda Landsat 5-TM y las imágenes SPOT 5 pancromáticas utilizadas en el presente estudio se presentan en las Tabla 7.

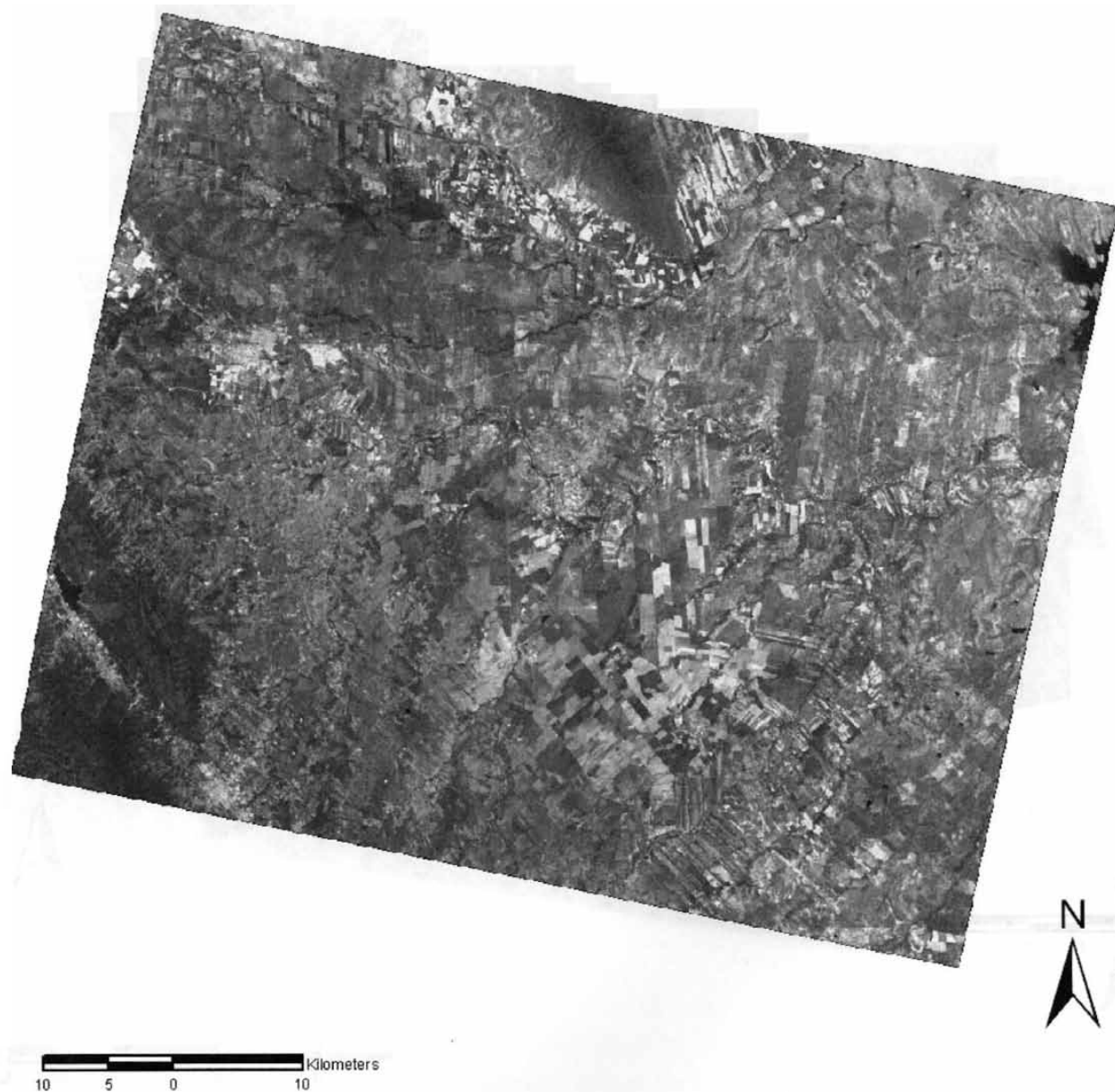


**Figura 5.** Imagen multibanda Landsat 5-TM del 16 de noviembre 2006 (composición en falso color RGB=4,5,3).

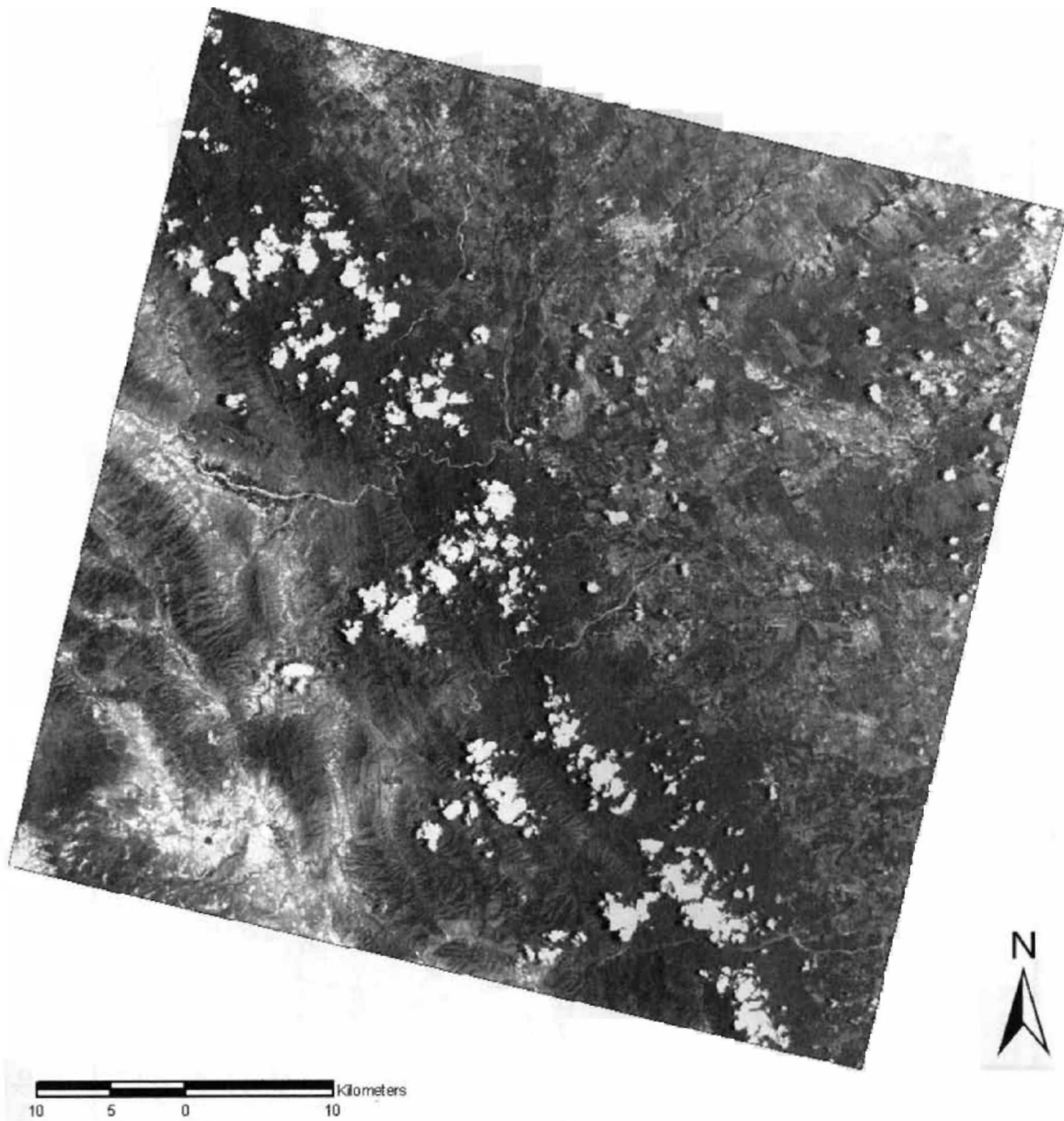


**Figura 6.** Imagen multibanda Landsat 5-TM del 20 de febrero 2007 (composición en falso color RGB=4,5,3).

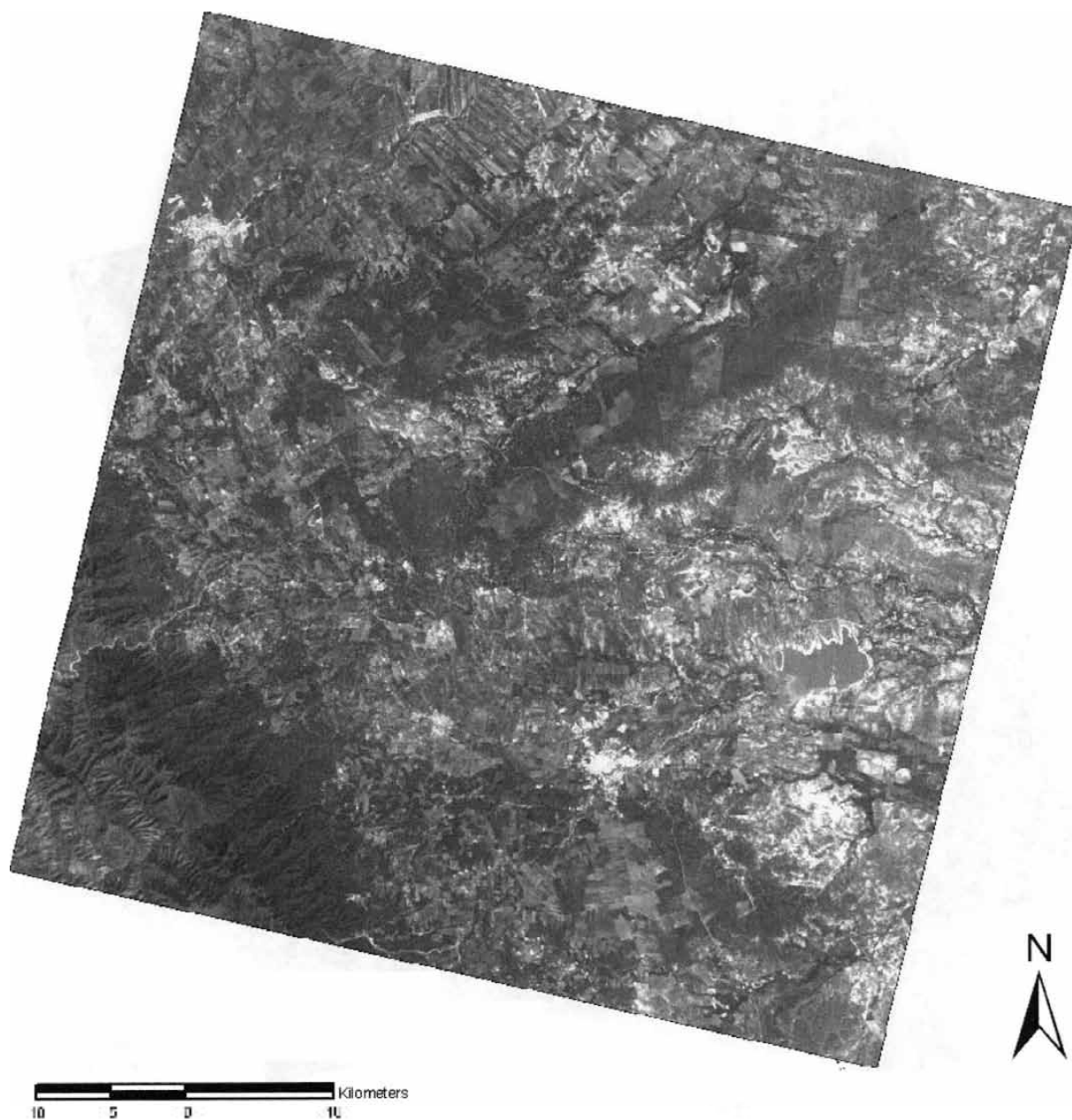




**Figura 7.** Imagen SPOT 5 del 19 de mayo 2006 (pancromática).



**Figura 8.** Imagen SPOT 5 del 08 de julio 2006 (pancromática).



**Figura 9.** Imagen SPOT 5 del 11 de abril 2006 (pancromática).

**Tabla 7.** Datos técnicos de imágenes satelitales Landsat 5-TM multibanda y SPOT 5 pancromáticas.

<b>Datos técnicos</b>	<b>Imágenes Landsat 5-TM</b>		<b>Imágenes SPOT 5</b>		
<b>Fecha toma imagen</b>	16 de noviembre 2006	20 de febrero 2007	19 de mayo 2006	8 de julio 2006	11 de abril 2006
<b>Satélite</b>	Landsat 5	Landsat 5	SPOT 5	SPOT 5	SPOT 5
<b>Senda (Path)</b>	27	27	583	584	584
<b>Columna (Row)</b>	43	42	299	300	300
<b>Instrumento</b>	Mapeador Temático (TM)	Mapeador Temático (TM)	High Resolution Visible (HRV)	High Resolution Visible (HRV)	High Resolution Visible (HRV)
<b>Nivel de procesamiento</b>	1G	1G	1A	1A	1A
<b>Tipo de procesamiento geodésico</b>	Remuestreo sistemático (Convolución cúbica)	Remuestreo sistemático (Convolución cúbica)	Remuestreo sistemático (vecino más cercano)	Remuestreo sistemático (vecino más cercano)	Remuestreo sistemático (vecino más cercano)
<b>Proyección</b>	UTM	UTM	UTM	UTM	UTM
<b>Zona</b>	14	14	14	14	14
<b>Elipsoide</b>	Clarke 1866	Clarke 1866	Clarke 1866	Clarke 1866	Clarke 1866
<b>Tamaño de píxel</b>	28.5 x 28.5 m	28.5 x 28.5 m	2.5 x 2.5 m	2.5 x 2.5 m	2.5 x 2.5 m
<b>Bandas presentes</b>	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Pancromática	Pancromática	Pancromática
<b>Coordenadas esquinas</b>					
<i>Superior Izquierda</i>	348284.150 E 3819804.250 N	376613.250 E 281000.250 N	381118.527 E 2856841.910 N	373592.855 E 2801204.037 N	402863.399 E 2800874.820 N
<i>Inferior Derecha</i>	578535.750 E 2610899.250 N	607377.750 E 2772160.750 N	465971.027 E 2783199.410 N	455715.355 E 2728719.037 N	474753.399 E 2728754.820 N

### **3. Procesamiento de Imágenes Digitales**

El procesamiento de las imágenes satelitales Landsat 5-TM, SPOT 5, fotografías aéreas escaneadas y ortofotos utilizadas en el presente estudio, se llevó a cabo siguiendo los pasos descritos en el diagrama de flujo metodológico presentado en la Figura 10, utilizando los siguientes programas: ERDAS Imagine® v9.0, extensión Feature Analyst® v4.2 para ERDAS Imagine®, ER Mapper Professional® v7.1 y ArcGIS™ v9.2, en un ambiente Windows XP®.

#### ***3.1. Corrección Radiométrica de Imágenes Satelitales***

Las imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio contaban con corrección radiométrica, por lo que no fue necesaria su realización. Lo anterior debido a que las imágenes Landsat 5-TM eran un producto nivel 1G (USGS, 2008) y las imágenes SPOT 5 eran un producto nivel 1A (SPOT Image, 2008).



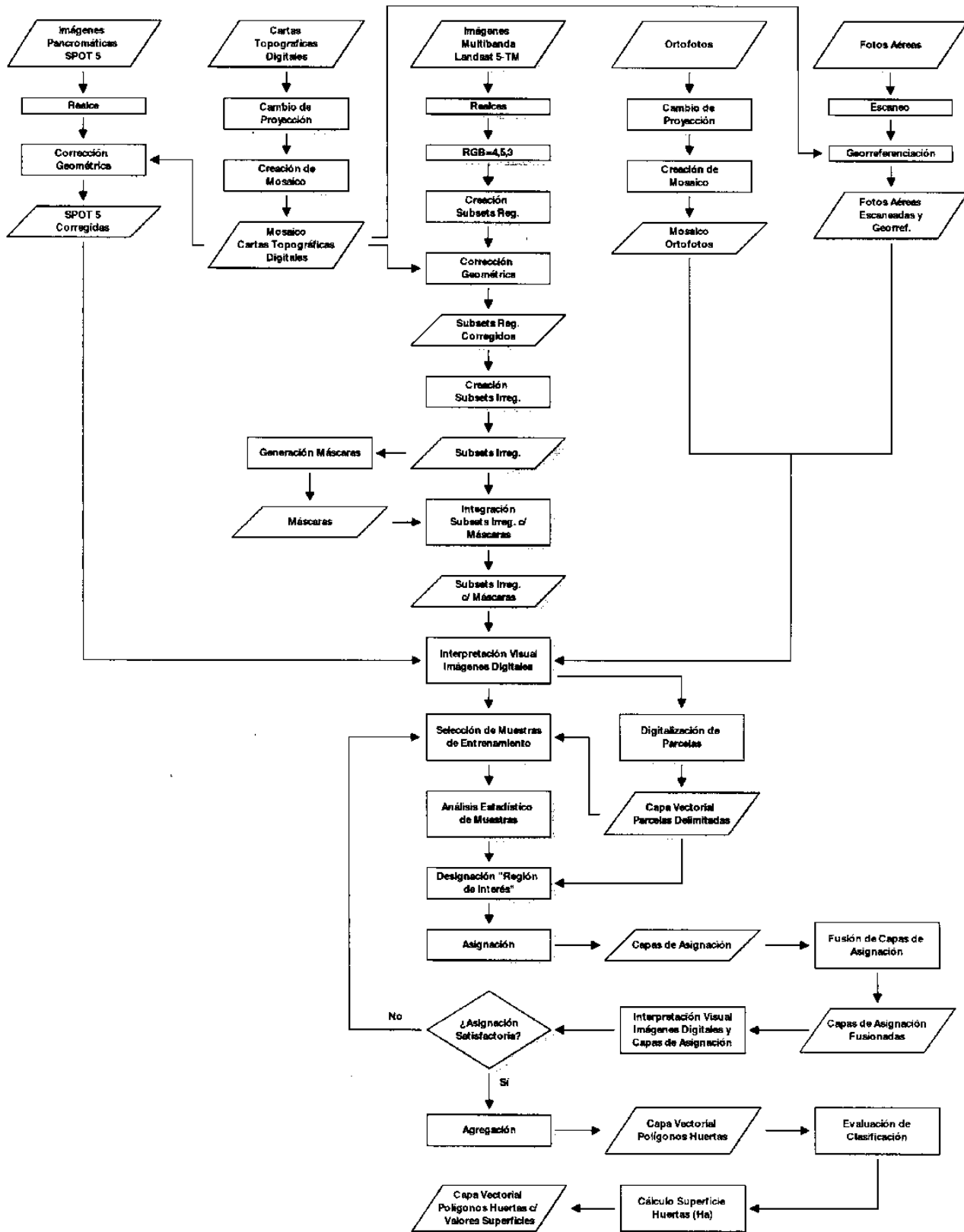


Figura 10. Diagrama metodológico para procesamiento de imágenes digitales.

### 3.2. Realce de Imágenes Satelitales

La mejora visual de las imágenes multibanda Landsat 5-TM y SPOT 5 pancromáticas se realizó utilizando la técnica del realce del contraste mediante expansión lineal de sus respectivos histogramas. Para el caso de las imágenes Landsat 5-TM, adicionalmente se recurrió a la combinación de bandas para la creación de composiciones en falso color RGB=4,5,3.

### 3.3. Rectificación de Imágenes Satelitales

#### 3.3.1. Base Cartográfica

La rectificación de las imágenes satelitales Landsat 5-TM y SPOT 5, así como la georreferenciación de las fotografías aéreas escaneadas, se realizó utilizando como base cartográfica el conjunto de cartas topográficas digitales georreferenciadas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) escala 1:50,000, que abarcaban la zona de estudio. Estas cartas además de presentar datos relacionados con la topografía, contenían aspectos toponímicos tales como límites estatales, términos municipales, comunicaciones, red hidrográfica y núcleos de población, entre otros, los cuales sirvieron de referencia para la localización de los Puntos de Control Terrestres (GPCs por sus siglas en inglés). Los datos de las cartas topográficas digitales georreferenciadas se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Municipios, clave y sistema de coordenadas de cartas topográficas digitales georreferenciadas del INEGI escala 1:50,000 de la zona de estudio.

Municipio	Clave	Proyección	Datum	Zona
Monterrey	G14C26	UTM	NAD27	14 N
San Juan	G14C27	UTM	ITRF92	14 N
Los Ramones	G14C28	UTM	ITRF92	14 N
Allende	G14C36	UTM	NAD27	14 N
General Terán	G14C37	UTM	ITRF92	14 N
La Unión	G14C38	UTM	ITRF92	14 N
Guadalupe La Joya	G14C49	UTM	ITRF92	14 N
San José de Las Flores	G14C48	UTM	ITRF92	14 N

<b>Municipio</b>	<b>Clave</b>	<b>Proyección</b>	<b>Datum</b>	<b>Zona</b>
Montemorelos	G14C47	UTM	ITRF92	14 N
Hualahuises	G14C57	UTM	ITRF92	14 N
Linares	G14C58	UTM	ITRF92	14 N
El Porvenir	G14C59	UTM	ITRF92	14 N
Iturbide	G14C67	UTM	ITRF92	14 N
Garza Valdéz	G14C68	UTM	ITRF92	14 N

Las cartas topográficas digitales fueron re proyectadas al Datum WGS84. Posteriormente se creó un mosaico o imagen compuesta de dichas cartas con el objetivo de facilitar su manipulación al momento de establecer GCPs durante el proceso de rectificación de las imágenes satelitales y georreferenciación de fotografías aéreas escaneadas, así como al momento de realizar superposiciones o traslapes con otros datos geográficos e imágenes digitales de la zona de estudio.

### **3.3.2. Subsets Regulares**

En virtud que las imágenes Landsat 5-TM abarcaban superficies significativamente mayores a la ocupada por la zona de estudio y se carecía de la base cartográfica necesaria para rectificar la totalidad de la superficie contenida dentro de ellas, se procedió a la creación de subsets o recortes regulares, a fin de facilitar su rectificación. Para su creación, se realizó en una primera instancia, la superposición de una capa vectorial georreferenciada escala 1:50000 de la delimitación geográfica general de los municipios que integran la zona citrícola y las imágenes Landsat 5-TM. Luego con base en esta superposición, se crearon dos subsets regulares rectangulares de las imágenes, que contenían de manera general la delimitación vectorial de la zona de estudio. Para el caso de las imágenes SPOT 5, no fue necesario la creación de subsets regulares, ya que las imágenes utilizadas no abarcaban superficie significativamente mayor que la correspondiente a la zona de estudio.

### **3.3.3. Puntos de Control Terrestres**

Se establecieron Puntos de Control Terrestres (GCPs) homólogos entre los subsets regulares de las imágenes Landsat 5-TM, las imágenes SPOT 5 y el

mosaico de las cartas topográficas digitales georreferenciadas del INEGI. Los GCPs fueron distribuidos de manera uniforme a fin de evitar errores debido a una ponderación excesiva de algún sector de la imagen a expensas de otros sectores; asimismo los GCPs fueron localizados principalmente sobre intersecciones de redes carreteras y vías de ferrocarril y en algunos casos límites de propiedad (Chuvienco, 2002).

Se establecieron aproximadamente 100 GCPs para el caso del subset regular correspondiente a la imagen Landsat 5-TM de fecha 16 de noviembre 2006 y 45 GCPs para el subset regular correspondiente a la imagen de fecha 20 de febrero 2007. Para el caso de las imágenes SPOT 5, se establecieron aproximadamente 25 GCPs por cada subset. Con el objetivo de lograr una rectificación con el mayor ajuste posible, se buscó que el error medio cuadrático (RMS por sus siglas en inglés) de cada GCP fuera inferior a 1 píxel (Jensen, 1986).

### **3.3.4. Interpolación Espacial o Cálculo de Función de Transformación**

Se procedió con la relación de las coordenadas de ubicación matricial (x,y) de los píxeles que integraban los rasters correspondientes a los subsets regulares distorsionados de las imágenes multibanda Landsat 5-TM, con las coordenadas cartográficas de referencia (X,Y) mediante la aplicación de un polinomio de primer grado de transformación similar a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}x_o &= b_1 + b_2x_i + b_3y_i \\y_o &= a_1 + a_2x_i + a_3y_i\end{aligned}\tag{4}$$

Donde:

- $x_i, y_i$ : Coordenadas de entrada,
- $x_o, y_o$ : Coordenadas de salida.

Se optó por utilizar un polinomio de esta naturaleza en virtud que la zona de estudio no presentaba contrastes topográficos significativos (Chuvienco, 2002), a excepción de una porción de la Sierra Madre Oriental que ocupaba

aproximadamente una cuarta parte de la superficie contenida en los subsets regulares.

### ***3.3.5. Interpolación Radiométrica o Remuestreo***

La transferencia de los números digitales (ND) de los píxeles de los subsets regulares distorsionados hacia su posición correspondiente en la matriz de los subsets regulares rectificadas, se realizó utilizando el método de remuestreo del vecino más cercano, que supone la menor transformación de los ND originales (Chuvieco, 2002; Lillesand et al., 2004).

### ***3.4. Subsets Irregulares***

Con el objetivo de aislar la superficie ocupada únicamente por la zona de estudio, se procedió con la creación de subsets irregulares a partir de cada uno de los subsets regulares rectificadas. En virtud que existía un traslape de superficies entre los subsets regulares recién creados, el subset correspondiente a la imagen de fecha 16 de julio 2006, primero fue recortado en función de la capa vectorial de la delimitación geográfica general de la zona cítrica y luego convertido a formato vectorial. Seguidamente, la delimitación vectorial del subset irregular producto de esta operación, fue unificada con la delimitación vectorial general de la zona cítrica. Luego, se eliminó la porción correspondiente a la delimitación vectorial de la imagen del 16 de julio 2006. La porción vectorial remanente fue utilizada para crear el subset irregular de la imagen de fecha 20 de febrero 2007.

Al igual que para el caso de los subsets regulares, no hubo necesidad de recurrir a la creación de subsets irregulares de las imágenes SPOT 5, en virtud que estas no abarcaban una superficie significativamente mayor que la correspondiente a la zona de estudio.

### ***3.5. Clasificación de Imágenes Landsat 5-TM***

#### ***3.5.1. Máscaras Binarias***

Con base en los valores de NDVI de las cubiertas terrestres presentes en los subsets irregulares de las imágenes multibanda Landsat 5-TM (extraídos

mediante operaciones de álgebra de mapas fundamentadas en la ecuación (2) y utilizando las bandas TM del R e IRC), se generaron máscaras binarias en torno a un umbral de valor NDVI de 0.21, designando como nulo los píxeles de las cubiertas con valores menores a éste y asignando valores de uno (1) a los que eran mayores. Lo anterior fue realizado con el objetivo de facilitar la discriminación de las cubiertas de interés (huertas de cítricos en producción) excluyendo de la clasificación (mediante anulación) los píxeles correspondientes a suelos desprovistos de vegetación, así como vegetación natural poco vigorosa, zonas urbanas/carreteras y cuerpos de agua, entre otros.

La anulación de los píxeles correspondientes a vegetación poco vigorosa mediante máscaras binarias, se fundamentó en el supuesto de que las huertas de cítricos en producción presentarían valores elevados de NDVI debido a su desarrollo denso, características fisionómicas y comportamientos fenológicos y en el caso de huertas con riego, un suministro constante de agua que permite satisfacer sus necesidades de ET. Por otro lado se asumió que las principales comunidades vegetales naturales que predominan en la zona tales como matorrales, presentarían valores de NDVI menores por influencia del suelo por causa de su desarrollo poco denso, características fisionómicas, así como condiciones desfavorables de temperatura y humedad debido su dependencia de la precipitación pluvial como fuente primordial de abastecimiento de agua y las escasas lluvias que comúnmente se registran durante la temporada de invierno en la región, entre otros factores.

La generación de las máscaras binarias, así como su integración a los respectivos subsets irregulares, se llevó a cabo por medio de operaciones de álgebra de mapas. Con el objetivo de facilitar la interpretación visual de las imágenes y la selección de muestras de entrenamiento al momento de llevar a cabo la clasificación, se modificó el contraste de los subsets irregulares con las máscaras binarias integradas, en función de los puntos de quiebre o "break points" de los histogramas de las bandas de los subsets regulares correspondientes, considerando composiciones en falso color RGB=4,5,3.

### ***3.5.2. Delimitación Digital de Parcelas con Huertas de Cítricos***

Empleando un SIG, se delimitaron por medio de polígonos, las parcelas que contenían huertas de cítricos en producción en la zona de estudio. Dicha delimitación se realizó con base en la interpretación visual utilizando criterios de colores, brillos, tonos, texturas, estructura y contexto y patrón espacial, entre otros (Chuvienco, 2002) de las siguientes imágenes digitales e información auxiliar verdad-terreno:

- Subsets irregulares de las imágenes Landsat 5-TM rectificadas con máscaras binarias integradas (composiciones en color verdadero RGB=3,2,1 y en falso color RGB=4,5,3 y RGB=4,3,2).
- Imágenes SPOT 5 pancromáticas rectificadas (en escala gris).
- Capturas de imágenes QuickBird y SPOT 5 multibanda de la zona de estudio disponibles en línea a través de Google Earth Pro v. 4.2.0180.1134 (beta).
- Fotografías aéreas en blanco y negro del INEGI, escala 1:40000, escaneadas y georreferenciadas teniendo como base cartográfica el mosaico de cartas topográficas digitales del INEGI escala 1:50,000.
- Ortofotos en blanco y negro del INEGI escala 1:40,000 con resolución espacial de 1 m.
- Capa temática vectorial georreferenciada correspondiente al censo de predios de cítricos elaborado por ASERCA/SAGARPA.
- Capa temática vectorial georreferenciada correspondiente a ubicaciones puntuales de trampas de moscas del Comité Estatal de Sanidad Vegetal.

De manera general, se evitó la digitalización de parcelas que presentaban señales de abandono, mismas que para fines del presente estudio no fueron consideradas como huertas en producción; asimismo se obvió la digitalización de parcelas con dimensiones menores a 0.40 hectáreas, por considerar que la resolución espacial de las imágenes Landsat 5-TM dificultaría la extracción de la superficie de las huertas localizadas en su interior. Esto último debido a las reducidas dimensiones de las huertas, aunado al fenómeno de píxel mixto asociado con imágenes de esta índole.

### **3.5.3. Fase de Entrenamiento**

#### **3.5.3.1. Muestras de Entrenamiento**

La selección de las muestras de entrenamiento correspondientes a las cubiertas de interés (huertas de cítricos en producción) se llevó a cabo por medio del método de entrenamiento no supervisado, utilizando ERDAS Imagine® v9.0. Se optó por utilizar este método considerando que se tenía un buen conocimiento de la zona de estudio y se contaba con información auxiliar confiable (verdad-terreno) que permitiría localizar de manera precisa áreas que contuvieran huertas de cítricos en producción.

Se designó una sola clase informacional denominada “Cítrico” para agrupar de manera general las clases espectrales correspondientes a las huertas de cítricos en producción por identificar. Las muestras de entrenamiento fueron seleccionadas únicamente dentro de los polígonos de parcelas que contenían huertas de cítricos en producción, que habían sido delimitados con anterioridad mediante uso de un SIG.

### ***3.5.3.2. Análisis Estadístico de Muestras de Entrenamiento***

A fin de asegurar que las muestras de entrenamiento seleccionadas contaran con el mayor grado de homogeneidad espectral posible, se realizó un análisis de las desviaciones estándar de cada una de ellas considerando un valor umbral de 3, eliminándose aquellas muestras que presentaron mayor dispersión (Bartolucci et al., 1983; Comunicación personal, Dr. Fabián Lozano, Coordinador, LabSIG-ITESM, 2008). Adicionalmente se analizaron las separabilidades estadísticas de las clases espectrales de las muestras de entrenamiento utilizando el criterio de la divergencia transformada en torno a un rango de valores comprendidos entre 0 y 2000. Esto con el objetivo de evitar la inclusión de píxeles correspondientes a otras cubiertas que no fueran las de interés, en las muestras de entrenamiento seleccionadas. Dado que un valor de divergencia transformada de 2000 sugiere una excelente separabilidad entre clases, un valor por encima de 1900 provee una buena separación y un valor por debajo de 1700 es considerada pobre (Chuvienco, 2000; Jensen, 1986), en el presente trabajo se consideró como nivel aceptable de separabilidad un umbral de 1800. Por lo anterior, las muestras con separabilidades menores a este valor fueron eliminadas.

### ***3.5.4. Fase de Asignación***



La asignación de los píxeles de las imágenes Landsat 5-TM a la clase informacional “Cítrico”, se llevó a cabo empleando la extensión Feature Analyst® v4.2 para ERDAS Imagine®. Se consideraron únicamente los ND de los píxeles correspondientes a las bandas comúnmente empleadas en la clasificación de imágenes Landsat 5-TM, siendo éstas las bandas TM 1, 2, 3, 4, 5 y 7. La banda TM 6, correspondiente al infrarrojo térmico, fue omitida por contar con una resolución espacial mucho mayor a las demás bandas (120 m x 120 m) y por carecer de propiedades reflectivas, al solo contener información de la temperatura de las cubiertas terrestres (Scott, 1996 citado en Bolaños-González et al., 2001).

Con base en las recomendaciones del manual de usuario de la extensión Feature Analyst® v4.2 para ERDAS Imagine®, así como los resultados obtenidos de ensayos preliminares, se definieron los siguientes parámetros requeridos por el software para modelar el proceso automatizado de asignación que brindó los mejores resultados: selector de atributos “Land Cover Feature”; designación de bandas TM 1, 2, 3, 4, 5 y 7 como bandas espectrales; representación de entrada “Manhattan” de 7”; algoritmo de aprendizaje de propósito general; agregación de 5 píxeles; inclusión de instancias giradas; clasificación “wall-to-wall” omitida (VLS, 2001 – 2008).

Las muestras de entrenamiento, junto con la capa temática vectorial correspondiente al conjunto de polígonos que delimitaban las parcelas que contenían huertas de cítricos en producción, fueron importadas dentro de la extensión Feature Analyst® v4.2 para ERDAS Imagine®. Esta capa fue designada como “región de interés” a fin de que la asignación se limitara únicamente a los píxeles localizados a su interior. Se realizó una asignación individual por cada muestra de entrenamiento correspondiente a las diferentes clases espectrales que fueron identificadas para la clase informacional “Cítrico”, generándose una capa temática vectorial de asignación por clase espectral.

Se procedió con la mejora de los resultados de asignación obtenidos, recurriendo al proceso de aprendizaje jerárquico iterativo del software, que consistió en el señalamiento de píxeles correctamente asignados a la clase informacional de interés y la selección de muestras de entrenamiento adicionales que contuvieran grupos de píxeles correspondientes a huertas que fueron omitidos durante las asignaciones realizadas. Una vez analizadas las estadísticas de estas

nuevas muestras, a fin de asegurar la mayor homogeneidad espectral posible, se volvieron a realizar las asignaciones respectivas. Este proceso se repitió hasta lograr un resultado de asignación de píxeles satisfactorio con base en la interpretación visual de superposiciones entre las capas vectoriales de asignación y las imágenes digitales disponibles.

Las capas vectoriales de asignación individuales fueron integradas, dando lugar a una capa vectorial única de polígonos, correspondiente a las huertas de cítricos en producción de la zona cítrica. Por último se recurrió a la función de post-clasificación "Aggregate Features" de la extensión Feature Analyst® v4.2 para ERDAS Imagine®, con el objetivo de eliminar y/o consolidar polígonos con un tamaño de aglomerado menor a 5 píxeles (aprox. 0.40 hectáreas). La capa vectorial de los polígonos de huertas de cítricos posteriormente fue importada dentro de ERDAS Imagine® v9.0 para proceder con la fase de evaluación de los resultados de la clasificación efectuada.

La asignación de los píxeles de los subsets irregulares de las imágenes Landsat 5-TM con las máscaras binarias integradas, a la clase informacional "Cítrico", se realizó de manera individual por separado, dado que las imágenes originales fueron adquiridas en fechas diferentes.

### ***3.5.5. Evaluación de Resultados de Clasificación***

La evaluación del grado de precisión de los resultados de clasificación de los subsets irregulares con las máscaras binarias integradas se llevó a cabo mediante el método de selección de muestras espaciales, utilizando ERDAS Imagine® v9.0. Este método es considerado como el más adecuado para la verificación o evaluación de los resultados de clasificación, en virtud que ofrece una imagen del patrón espacial de error y permite ajustar las estimaciones de superficie a partir del grado de exactitud estimada para la misma (Chuvienco, 2002).

Se seleccionaron al menos 50 muestras de píxeles al azar por cada clase informacional (Chuvienco, 2002; Congalton, 1991). A cada uno de estos píxeles se le asignó el tipo de cobertura o clase a la que pertenecía ("Cítrico", "No-Cítrico"), teniendo como referencia la información de apoyo (verdad-terreno) utilizada para

la selección de las muestras de entrenamiento y la digitalización de parcelas que contenían huertas de cítricos en producción. Con base en la comparación entre el tipo de clase asignada y la deducida por la clasificación, se creó una matriz de error o confusión mediante la cual se generaron las siguientes medidas estadísticas que permitieron validar numéricamente los resultados de la clasificación:

1. *Precisión del usuario*. Fue calculado dividiendo el número de píxeles clasificados correctamente de cada clase, entre el número total de píxeles clasificados para esa clase (totales en filas).
2. *Precisión del productor*. Fue calculado dividiendo el número de píxeles clasificados correctamente de cada clase, entre el número total de píxeles de referencia para esa clase (totales en columnas).
3. *Precisión global de la clasificación*. Fue calculado dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados en determinada clase, entre el número total de píxeles de referencia de esa clase.
4. *Coefficiente Kappa*. Fue calculado a partir de la matriz de error utilizando la siguiente ecuación:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (5)$$

Donde:

- $r$ : número de filas en la matriz,
- $x_{ii}$ : número de observaciones en la fila  $i$  y columna  $i$ ,
- $x_{i+}$ : totales marginales de la fila  $i$ ,
- $x_{+i}$ : totales marginales de la columna  $i$ ,
- $N$ : número total de píxeles de referencia.

(Ariza et al., 1996; Chuvieco, 2002; Congalton, 1991; Lillesand et al., 2004).

### **3.5.6. Superficie Citrícola en Producción**

La superficie de las huertas de cítricos en producción de la zona citrícola de Nuevo León, fue cuantificada aplicando operaciones geométricas mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), al conjunto de polígonos producto de la clasificación de los subsets irregulares de las imágenes multibanda Landsat 5-TM con las máscaras binarias integradas.

## **4. Escenarios en el Uso de Agua de Riego**

Se procedió con la modelación de una serie de escenarios y sub-escenarios en el uso de agua de riego "*Qué pasa sí...?*" haciendo uso de un sistema de información geográfica (SIG), en donde fueron consideradas diferentes alternativas de tecnificación de riego y reconversión productiva de cultivos en los municipios de Hualahuises y Linares. Lo anterior con el objetivo de cuantificar los mayores ahorros potenciales de volúmenes de agua de riego durante las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño.

Los municipios de Hualahuises y Linares fueron designados como zona piloto para la modelación de los escenarios y sub-escenarios referidos, dado que presentaron los mejores resultados de clasificación de los subsets irregulares de las imágenes multibanda Landsat 5-TM. Aunado a lo anterior, la mayor parte de la superficie citrícola en ambos municipios corresponde a superficie de riego (aproximadamente el 93% de la superficie citrícola total en Hualahuises y 97% en Linares) (SAGARPA, 2007).

Los escenarios modelados fueron: (1) Situación actual (consumo mínimo de agua de riego de superficie citrícola con riego en producción, extraída de la clasificación de las imágenes Landsat 5-TM), (2) Riego de superficie citrícola con riego en producción bajo diferentes modalidades de riego, (3) Riego de superficie citrícola con riego en producción bajo diferentes modalidades de riego, considerando además, la reconversión productiva del 50% de las huertas a hortalizas.

### **4.1. Situación Actual**

En este escenario se mantiene la superficie citrícola con riego en producción, así como la distribución porcentual de las diferentes modalidades de riego utilizados en la zona citrícola.

#### **4.1.1. Demanda de Agua de Superficie Citrícola en Producción**

El requerimiento o demanda de agua de los cultivos se determina mediante la ecuación correspondiente a la Evapotranspiración de Cultivo bajo Condiciones Estándar ( $ET_c$ ) (Allen et al., 1998):

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (6)$$

Donde:

- $ET_c$ : evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar (mm),
- $ET_o$ : evapotranspiración de cultivo de referencia (mm),
- $K_c$ : coeficiente de cultivo (adimensional).

La Figura 11 presenta el diagrama de flujo metodológico general empleado para la determinación de los valores de  $ET_c$  de las huertas de cítricos con riego en producción.

Como primer paso, se identificaron 14 estaciones agroclimatológicas pertenecientes a la red que la Fundación Produce, en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ha instalado en el área de influencia de Hualahuises y Linares, las cuales proporcionan mediciones en tiempo real de precipitación y  $ET_o$ , entre otros parámetros (INIFAP, 2008). Las coordenadas de las ubicaciones puntuales de las estaciones fueron convertidas a coordenadas con proyección UTM, Zona 14 N, Datum WGS84 e importadas dentro de un SIG como una capa temática vectorial que contenía la ubicación puntual de cada estación (Figura 12).

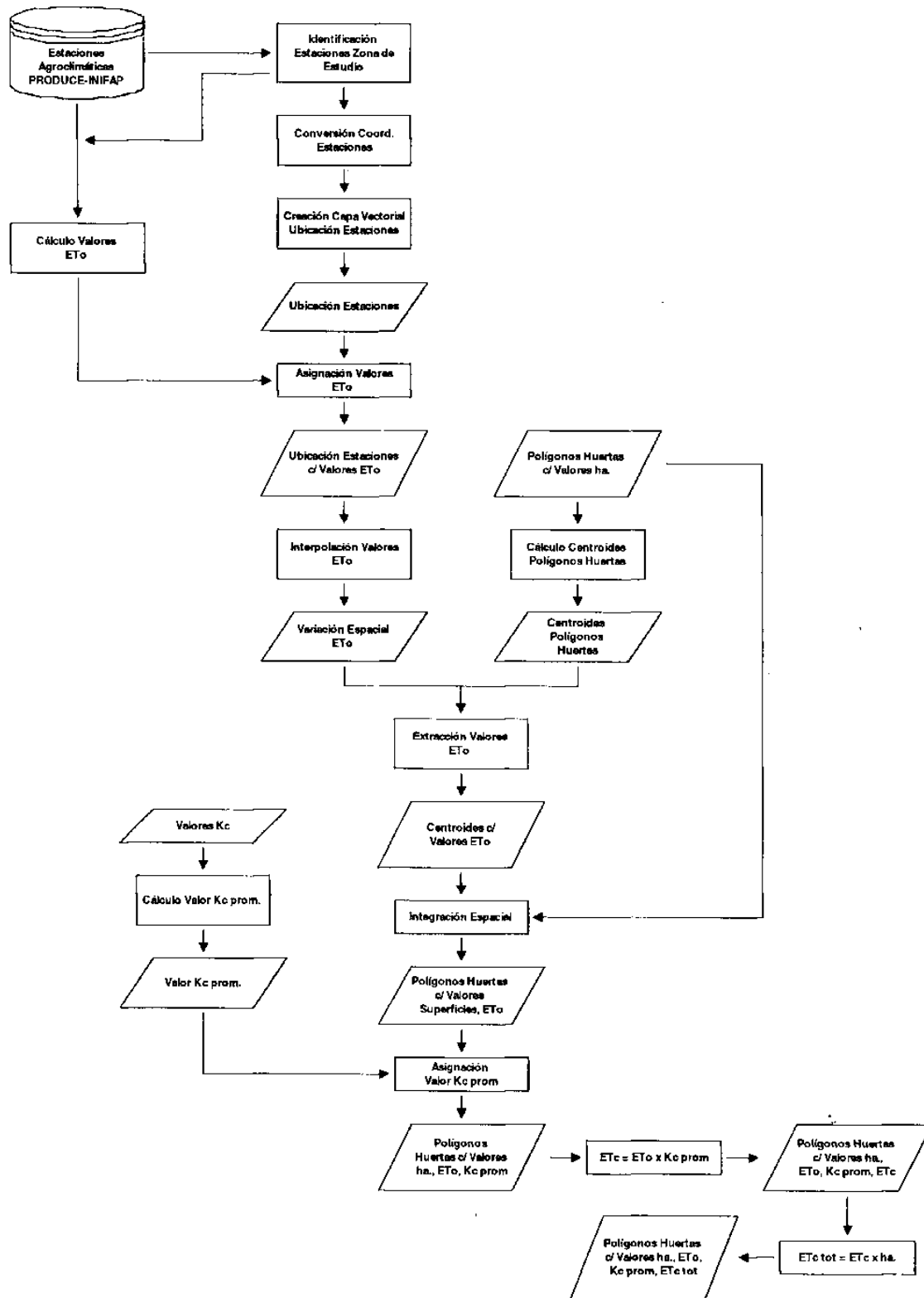


Figura 11. Diagrama metodológico para determinar la demanda de agua de las huertas de cítricos con riego en producción.



**Figura 12.** Ubicación puntual de estaciones agroclimatológicas Fundación Produce INIFAP en el área de influencia de Hualahuises y Linares.

Se calcularon los valores promedio de  $ET_0$  mensuales correspondientes a las temporadas de primavera (marzo a mayo), verano (junio a agosto), otoño (septiembre a noviembre) e invierno (diciembre a febrero), con base en los registros de  $ET_0$  mensuales de la estaciones agroclimatológicas, durante el período comprendido entre los meses de marzo 2006 y agosto 2008. Cabe señalar que aun cuando es conocido que largos períodos de observación (registros de al menos 20 años consecutivos) ofrecen una mayor garantía de obtener resultados

con un mayor grado de confiabilidad estadística (Fuente: Comunicación personal, Dr. Fabián Lozano, Coordinador, LabSIG-ITESM, 2008), fue necesario recurrir a la red de estaciones Produce – INIFAP en virtud que eran las únicas que contaban con registros de  $ET_0$  en la zona de estudio calculadas con base en el método FAO Penman-Monteith. Los valores muestrales provenientes de dichas estaciones fueron asignados como atributos de cada uno de los puntos de la capa temática vectorial correspondiente a la ubicación puntual de las estaciones agroclimatológicas.

Se procedió con el análisis exploratorio de datos muestrales a modo de identificar la técnica geoestadística más conveniente para la estimación de valores de  $ET_0$  en puntos no muestreados en la zona de influencia de Hualahuises y Linares, con base en la estructura básica de dichos datos. Cabe señalar que se consideró a la geoestadística como único método de interpolación, dado que su estimador, denominado Kriging, genera resultados superiores en comparación con otros métodos tradicionales no geoestadísticos tales como los polígonos de Thiessen, la triangulación, el inverso ponderado de distancia (IDW por sus siglas en inglés), entre otros (Goovaerts, 1997; Isaaks & Srivastava, 1989; Journel & Huijbregts, 1978; Webster & Oliver, 2000). Lo anterior en virtud que a diferencia de estos otros métodos, Kriging proporciona estimaciones probabilísticas de la calidad de la estimación realizada (errores de predicción), considera tanto la distancia euclidiana como la geometría de localización de las muestras (lo cual minimiza la varianza del error esperado) y los valores estimados no se limitan al intervalo definido por los datos muestrales, entre otras ventajas (Isaaks & Srivastava, 1989; Matherton, 1963, citado en Cressie, 1989).

El análisis exploratorio de datos muestrales se llevó a cabo en dos etapas:

1. Determinación de la normalidad de datos muestrales<sup>1</sup> mediante el cálculo y análisis de estadística descriptiva, histogramas de frecuencias y aplicación

---

<sup>1</sup> La importancia de determinar si los datos muestrales cuentan con una distribución normal o no, radica en el hecho de que la aplicación de algunos modelos de interpolación presuponen la normalidad de las distribuciones y puede tener un alto impacto en la estimación de valores extremos (Correa, 2003). Asimismo, datos con distribuciones normales generan superficies de interpolación más precisas (ESRI, 2001).



de pruebas de bondad de ajuste Anderson-Darling<sup>2</sup> con nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , utilizando el software estadístico Minitab<sup>®</sup>.

2. Determinación de la estacionariedad<sup>3</sup> de los datos muestrales mediante el cálculo y análisis de gráficos de dispersión tridimensionales utilizando la extensión Geostatistical Analyst para ArcGIS™ v9.2.

Posteriormente se realizó el análisis estructural de la continuidad o patrón de variabilidad espacial de las series de valores muestrales de  $ET_0$  utilizando la extensión Geostatistical Analyst para ArcGIS™ v9.2, mediante la cual se calcularon semivariogramas experimentales omnidireccionales y direccionales de las series de valores, con el objetivo de conocer su autocorrelación espacial e identificar condiciones de anisotropía (Isaaks & Srivastava, 1989). Los tamaños de los intervalos (lag size en inglés) y número de intervalos (lags en inglés) de los semivariogramas fueron definidos de tal manera que permitieran revelar autocorrelaciones espaciales, procurando que el producto de la multiplicación del lag size y número de lags, no excedieran la mitad de la mayor distancia entre pares de puntos muestrales, ya que a partir de ésta, la cantidad de pares comienza a disminuir y los valores del semivariograma dejan de ser significativos (ESRI, 2001; Isaaks & Srivastava, 1989). Los semivariogramas experimentales direccionales fueron calculados en direcciones de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ , considerando una tolerancia de ángulo del  $45^\circ$  y un lag de 3 m.

Se procedió con el ajuste de mínimos cuadrados ponderados de los semivariogramas experimentales omnidireccionales a funciones analíticas estacionarias conocidas (modelos básicos) para obtener los modelos teóricos y parámetros (rango, meseta y efecto pepita) que mejor describieran los patrones de variabilidad espacial de los datos muestrales y sirvieran como base para llevar a cabo las interpolaciones correspondientes (Isaaks & Srivastava, 1989). Los semivariogramas experimentales fueron ajustados a modelos básicos esféricos, exponenciales y j-bessel, siendo los primeros dos, los más comúnmente utilizados

---

<sup>2</sup> Prueba de bondad de ajuste que proporciona los mejores resultados para casos donde la media y varianza son desconocidas y son obtenidas a partir de los datos muestrales (Stephens, 1974).

<sup>3</sup> Supuesto fundamental de la geoestadística. Su cumplimiento es imprescindible para evitar que las estimaciones obtenidas mediante Kriging sean erróneas (Isaaks & Srivastava, 1989).

en la geoestadística y el último, el que presenta el mejor ajuste desde una perspectiva teórica (ESRI, 2008; Isaaks & Srivastava, 1989).

Al haberse comprobado mediante el análisis de los semivariogramas experimentales direccionales que las series de valores muestrales de  $ET_o$  presentaban condiciones de anisotropía, se hicieron los respectivos ajustes adicionales a los modelos teóricos de predicción, con base en las direcciones de máxima y mínima continuidad espacial (ESRI, 2001; Isaaks & Srivastava, 1989).

Se especificaron los parámetros de las vecindades de búsqueda (search neighborhoods en inglés) para restringir los puntos vecinos utilizados en la asignación de pesos durante el proceso de interpolación, eliminando de esta manera a todas aquellas locaciones que se encontraban a distancias que ejercían poca, nula o inclusive negativa influencia sobre los modelos teóricos de predicción analizados. Estos parámetros incluyeron los números máximos y mínimos de puntos vecinos, tamaño y forma de radios de búsqueda y número de sectores al interior de los radios de búsqueda (ESRI, 2001).

Se procedió con la validación de los conjuntos de modelos teóricos de predicción para los semivariogramas experimentales y configuraciones de vecindades de búsqueda analizados, según el procedimiento de la validación cruzada, donde cada dato muestral original observado es sucesivamente omitido de forma temporal y su valor reestimado a partir del resto y el modelo teórico escogido, por lo que se obtiene un error en cada localización dado por las diferencias entre valores observados y estimados (ESRI, 2001; Isaaks & Srivastava, 1989).

Las superficies continuas de valores promedio de  $ET_o$  mensuales por temporada en la zona de influencia de Hualahuises y Linares fueron generadas mediante Kriging Ordinario<sup>4</sup> con base en los modelos teóricos y configuraciones

---

<sup>4</sup> Se determinó la conveniencia de recurrir al Kriging Ordinario con base en los resultados del análisis exploratorio de los datos muestrales (ver Capítulo II, Sección 2.1.1.2), dado que este variante del Kriging supone estacionariedad “global” por lo que genera mapas de predicción confiables a partir de datos muestrales que presentan tendencias (ESRI, 2001; Gallardo, 2006). Otro factor que contribuyó a su elección fue el hecho de ser considerado el mejor estimador lineal insesgado y el variante del Kriging más generalizado en estudios geoestadísticos (Chilès & Delfiner, 1999; Isaaks & Srivastava, 1989; Journel & Huijbregts, 1978).

de vecindades de búsqueda que en conjunto generaron los valores del error cuadrático medio estandarizado<sup>5</sup> (RMSS por sus siglas en inglés) de menores dimensiones. El objetivo final de este estadístico consiste en encontrar un número que resuma el comportamiento de los residuales y permita valorar y/o comparar la calidad o eficacia de un modelo específico. Para ello se estandarizan los residuales de manera que permita que diversos modelos, ya sea con distintas variables o con las mismas variables pero medidas de manera distinta, puedan contrastarse y de esta manera elegir el que presente mejor ajuste, representado por el modelo que rinde el menor valor de RMSS, cuyo rango puede ir de cero (0) a infinito. Los valores menores de RMSS representan una menor variación de los residuales y un mayor ajuste de los datos predichos con los observados (Englund & Allen, s.f., citado en Correa, 2003).

Posteriormente se generó una capa temática vectorial de los centros geométricos o centroides de los polígonos de las huertas productoras de cítricos, de manera que sirvieran como medio para importar y exportar información asociada con los polígonos. Lo anterior bajo el supuesto de que los centroides calculados eran lo suficientemente representativos de los polígonos en los que se encontraban inscritos. Se extrajo la información de las superficies continuas tipo raster correspondientes a la variación espacial de  $ET_o$  en la zona de influencia de Hualahuises y Linares, hacia los centroides de los polígonos de las huertas, según la posición espacial que compartían o en la cual se interceptaban. Los atributos de  $ET_o$  de los centroides fueron transferidos a sus correspondientes polígonos de huertas mediante un algoritmo de integración espacial.

En virtud de que se carecían de registros de cobertura de suelo, período de crecimiento y etapa de desarrollo de las huertas de cítricos, se le asignó a cada polígono el valor promedio de los coeficientes de cultivo ( $K_{c \text{ prom}}$ ) correspondientes a cítricos con 70% de cubierta vegetativa durante sus diferentes períodos de crecimiento (etapa inicial, etapa de mediados de temporada y etapa de finales de temporada), reportados por Allen et al. (1998) (Tabla 9).

**Tabla 9.** Valores del coeficiente único del cultivo  $K_c$  correspondiente a cítricos sin cobertura del suelo (70% cubierta vegetativa) (Allen et al., 1998).

---

<sup>5</sup> Prueba de bondad de ajuste que mide la magnitud promedio de los residuales en función de la diferencia entre los valores predichos por un modelo y los valores observados en la muestra.

Cultivo	$K_c$ ini	$K_c$ med	$K_c$ fin	$K_c$ prom
Cítricos sin cobertura del suelo (70% cubierta vegetativa).	0.70	0.65	0.70	0.68

Los valores de  $ET_c$  fueron determinados mediante la aplicación de la ecuación (6), multiplicando  $K_c$  prom por los valores de  $ET_o$  transferidos a cada uno de los polígonos de huertas. La determinación del requerimiento total de agua ( $ET_{c\ tot}$ ) se llevó a cabo mediante la sumatoria del producto de la multiplicación de los valores de  $ET_c$  de cada uno de los polígonos de las huertas, por sus valores de superficie correspondientes (Allen et al., 1998).

#### **4.1.2. Consumo Neto de Agua de Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción**

Uno de los métodos más comúnmente empleados para la determinación del consumo neto de agua de riego de los cultivos durante un intervalo de tiempo determinado ( $\Delta SW$ ) se basa en el principio de conservación de materia aplicado al cambio dinámico en el contenido de agua en la zona radicular, definido por medio de la siguiente ecuación (James, 1988):

$$\Delta SW = \Theta_i - \Theta_f \quad (7)$$

$$\Theta_i - \Theta_f = \text{Entradas} - \text{Salidas} \quad (7.1)$$

Donde:

- $\Delta SW$ : cambio en el contenido de agua en la zona radicular durante el intervalo de tiempo considerado (mm),
- $Z_r$ : profundidad máxima efectiva de las raíces (mm),
- $\Theta_i$ ,  $\Theta_f$ : contenido de agua en la zona radicular inicial y al final del intervalo de tiempo considerado (mm),
- Entradas, Salidas: flujo total de agua dentro y fuera de la zona radicular durante el intervalo de tiempo considerado (mm).

Tomando en cuenta los factores que influyen en los cambios o variaciones en el contenido de agua en la zona radicular experimentadas a lo largo de un intervalo de tiempo determinado, consecuentemente:

$$\text{Entradas} = \text{Pe} + \text{R}_n + \text{Cr} + \text{Fs} \quad (7.1a)$$

$$\text{Salidas} = \text{Es} + \text{Dp} + \text{ET}_c + \text{Fs} \quad (7.1b)$$

Donde:

- $\text{R}_n$ : requerimiento neto de agua de riego (mm),
- $\text{Pe}$ : precipitación pluvial efectiva (mm),
- $\text{Cr}$ : ascenso capilar (desde la capa freática sub-superficial hacia la zona radicular) (mm),
- $\text{Es}$ : escurrimiento superficial (mm),
- $\text{Dp}$ : percolación profunda (por debajo de la zona radicular) (mm),
- $\text{ET}_c$ : evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (mm),
- $\text{Fs}$ : flujo sub superficial lateral (hacia adentro o fuera de la zona radicular) (mm).

(James, 1988; Allen et al., 1998)

Al integrar las ecuaciones 7.1a y 7.1b dentro de la ecuación 7.1, esta última puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Theta_i - \Theta_f = (\text{Pe} + \text{R}_n + \text{Cr}) - (\text{Es} + \text{Dp} + \text{ET}_c) \pm \text{Fs} \quad (8)$$

La Precipitación Efectiva ( $\text{Pe}$ ) puede determinarse aplicando las fórmulas propuestas por Brouwer & Heibloem (1986), que se basan en los datos disponibles de precipitación mensual en zonas con pendientes inferiores al 5%:

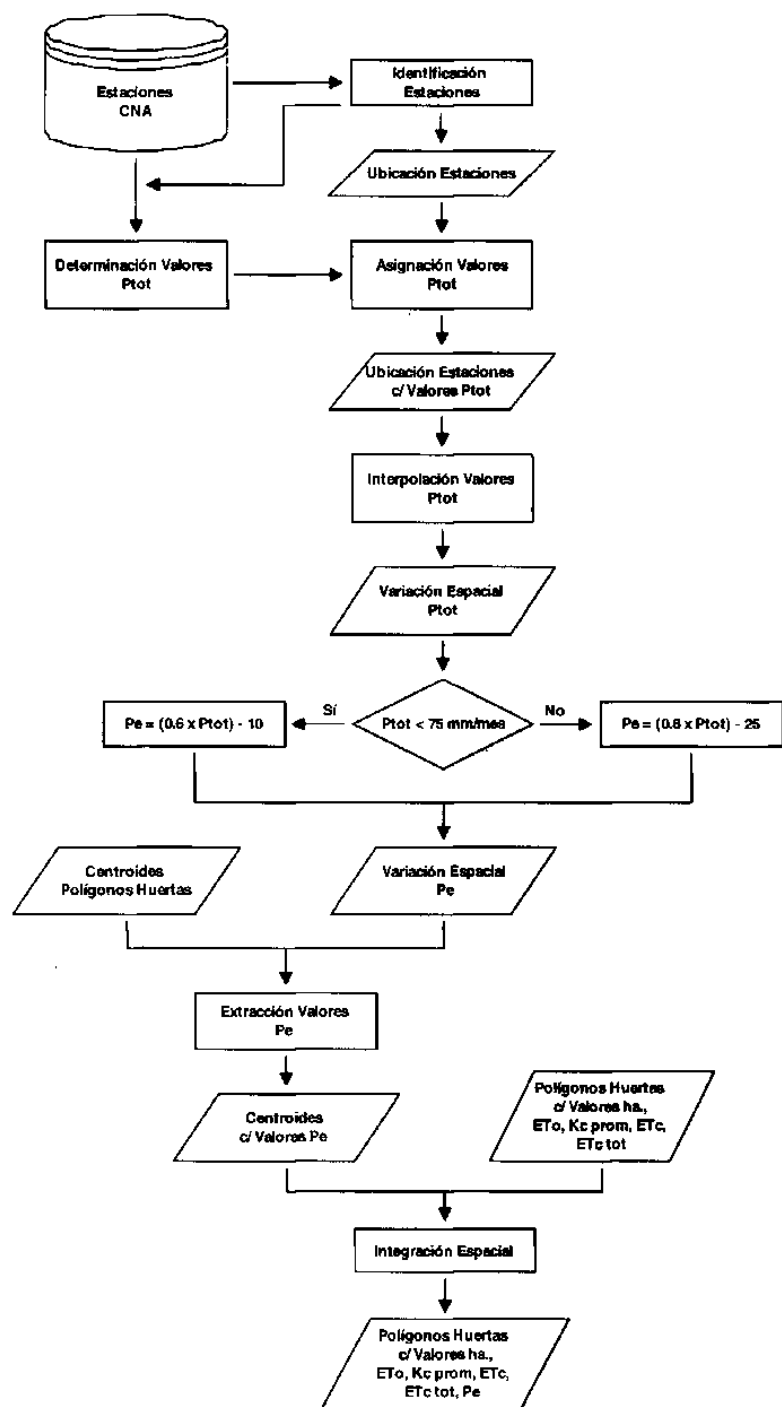
$$\text{Pe} = (0.8 * P) - 25 \text{ Si: } P > 75 \text{ mm/mes} \quad (9.1)$$

$$\text{Pe} = (0.6 * P) - 10 \text{ Si: } P < 75 \text{ mm/mes} \quad (9.2)$$

Donde:

- P: precipitación mensual (mm),
- Pe: precipitación efectiva (mm).

La Figura 13 presenta el diagrama de flujo metodológico general empleado para la determinación de los valores promedio de Pe mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño en la zona de influencia de los municipios de Hualahuises y Linares.



**Figura 13.** Diagrama metodológico para determinar la precipitación efectiva correspondiente a diferentes temporadas.

Para determinar la factibilidad de utilizar este procedimiento para estimar los valores de Pe, fue necesario verificar, en una primera instancia, que las

pendientes de los terrenos que contenían huertas productoras de cítricos, contaban con porcentajes inferiores al 5%. Para ello se incorporó en un SIG, un subset del modelo digital de elevación (MDE) denominado “continuo de elevación mexicano” del INEGI escala 1:50,000, que abarcaba los municipios de Hualahuis y Linares, con proyección UTM, Zona 14 N, Datum WGS84.

Se determinaron los porcentajes de las pendientes topográficas del continuo de elevación aplicando algoritmos de análisis espacial, capaces de calcular el máximo incremento de la elevación (variable z) entre cada uno de las celdas del raster y las que las rodean. Por medio de operaciones de álgebra de mapas, se asignaron valores de cero (0) a las pendientes con porcentajes menores al 5% y valores de uno (1) a las pendientes con porcentajes mayores al 5%, generando así una capa temática raster que resaltaba únicamente las pendientes mayores al 5%. Se realizó una superposición de la capa temática vectorial correspondiente a las superficies de las huertas de cítricos con riego en producción y la capa raster correspondiente a las pendientes resaltadas, constatándose que las superficies de aproximadamente el 97% de las huertas referidas se extendían en su totalidad sobre terrenos con pendientes menores al 5%.

Descartando los ingresos y egresos de agua en la zona radicular por Cr y Fs, suponiendo niveles freáticos a profundidades mayores de 1 m y la localización de las huertas sobre terrenos con pendientes “muy suavemente inclinadas” acorde a la clasificación de pendientes INE-SEMARNAT (SEMARNAT, 2008), así como los egresos por Es y Dp, dado que para fines del presente estudio solo interesaba la precipitación retenida efectivamente en la zona radicular, la ecuación (8) puede simplificarse como la siguiente expresión:

$$\Theta_i - \Theta_f = (P_e + R_n) - (ET_c) \quad (10.1)$$

Donde:

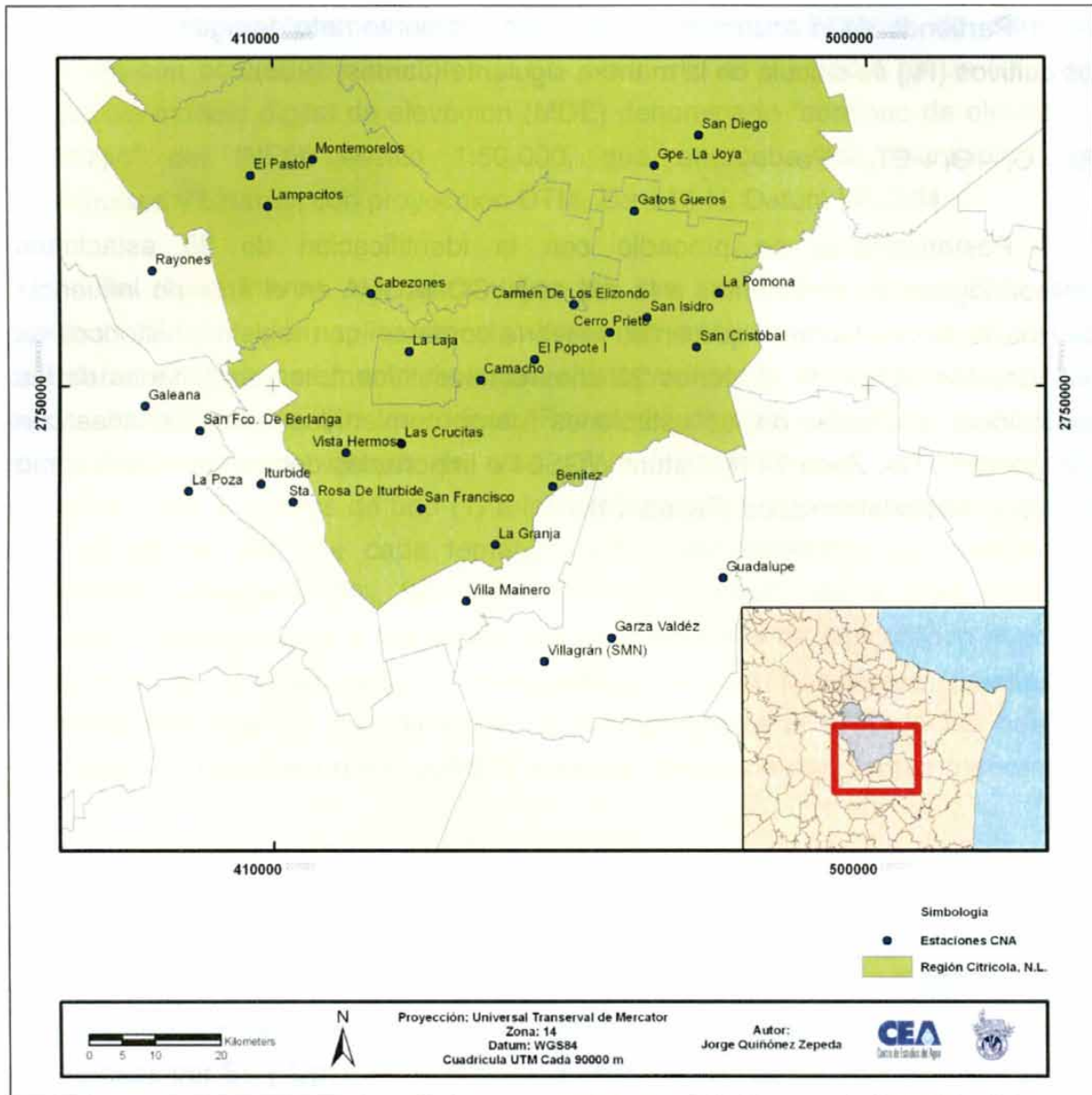
- $P_e$ : precipitación efectiva (mm),
- $ET_c$ : evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar (mm).



Partiendo de la ecuación (10.1), el requerimiento neto de agua de riego de los cultivos ( $R_n$ ) se calcula de la manera siguiente (James, 1988):

$$R_n = \Theta_i - \Theta_f + ET_c - P_e \quad (10.2)$$

Posteriormente se procedió con la identificación de 30 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de la CONAGUA en el área de influencia de Hualahuises y Linares, que en su mayoría contaban con registros históricos de precipitación pluvial de al menos 20 años consecutivos. Las coordenadas de las ubicaciones puntuales de las estaciones fueron convertidas a coordenadas con proyección UTM, Zona 14 N, Datum WGS84 e importadas dentro de un SIG como una capa vectorial temática (Figura 14).



**Figura 14.** Ubicación puntual de estaciones meteorológicas de la CONAGUA en el área de influencia de Hualahuises y Linares.

Se determinaron los valores promedio de Precipitación Pluvial ( $P_{tot}$ ) mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño, con base en registros correspondientes en su mayoría a 20 años consecutivos, facilitados por la Gerencia Regional VI “Río Bravo” de la CONAGUA y los obtenidos de la base de datos del extractor rápido de información climatológica v2.0 (ERIC II) del Instituto Meteorológico Nacional (IMTA), así como de la información disponible en la página web de la Oficina Estatal de Información

para el Desarrollo Rural Sustentable de Nuevo León (OEIDRUS, 2008). Los valores de  $P_{tot}$  fueron asignados como atributos de los puntos vectoriales de ubicación de las estaciones meteorológicas de la CONAGUA.

Se procedió con el análisis exploratorio y análisis estructural de las series de valores muestrales de  $P_{tot}$ , validación cruzada de los respectivos conjuntos de modelos teóricos para los semivariogramas experimentales y configuraciones de vecindades de búsqueda, así como la generación de mapas de predicción de valores de  $P_{tot}$  en la zona de influencia de Hualahuises y Linares mediante Kriging Ordinario<sup>6</sup>.

La variación espacial de  $P_e$  se determinó aplicando operaciones booleanas de algebra de mapas fundamentadas en las ecuaciones (9.1) y (9.2), a las superficies continuas de  $P_{tot}$ , producto del Kriging Ordinario. Dado que los valores de  $P_e$  siempre deben ser mayores o equivalentes a cero (Brouwer & Heibloem, 1986), los valores negativos estimados mediante la interpolación fueron transformados a valores de cero. Se extrajo la información de las capas temáticas raster correspondientes a los valores de  $P_e$  por temporada, hacia los centroides de los polígonos de las huertas de cítricos, según la posición espacial que compartían o en la cual se interceptaban. Los atributos de  $P_e$  de los centroides fueron transferidos a sus correspondientes polígonos de huertas de cítricos, empleando un algoritmo de integración espacial.

Posteriormente se calculó el contenido de humedad a capacidad de campo ( $\Theta_{CC}$ ) y punto de marchitez permanente ( $\Theta_{PMP}$ ) de los suelos en la zona de influencia de los municipios de Hualahuises y Linares. La Figura 15 presenta el diagrama metodológico empleado para determinar dichos parámetros.

---

<sup>6</sup> Se determinó la conveniencia de recurrir al Kriging Ordinario con base en los resultados del análisis exploratorio de los datos muestrales (ver Capítulo II, Sección 2.1.2.2), dado que este variante del Kriging asume una estacionariedad “global”, por lo que genera mapas de predicción confiables a partir de datos muestrales que presentan tendencias y/o carecen de distribución normal (ESRI, 2001; Gallardo, 2006).

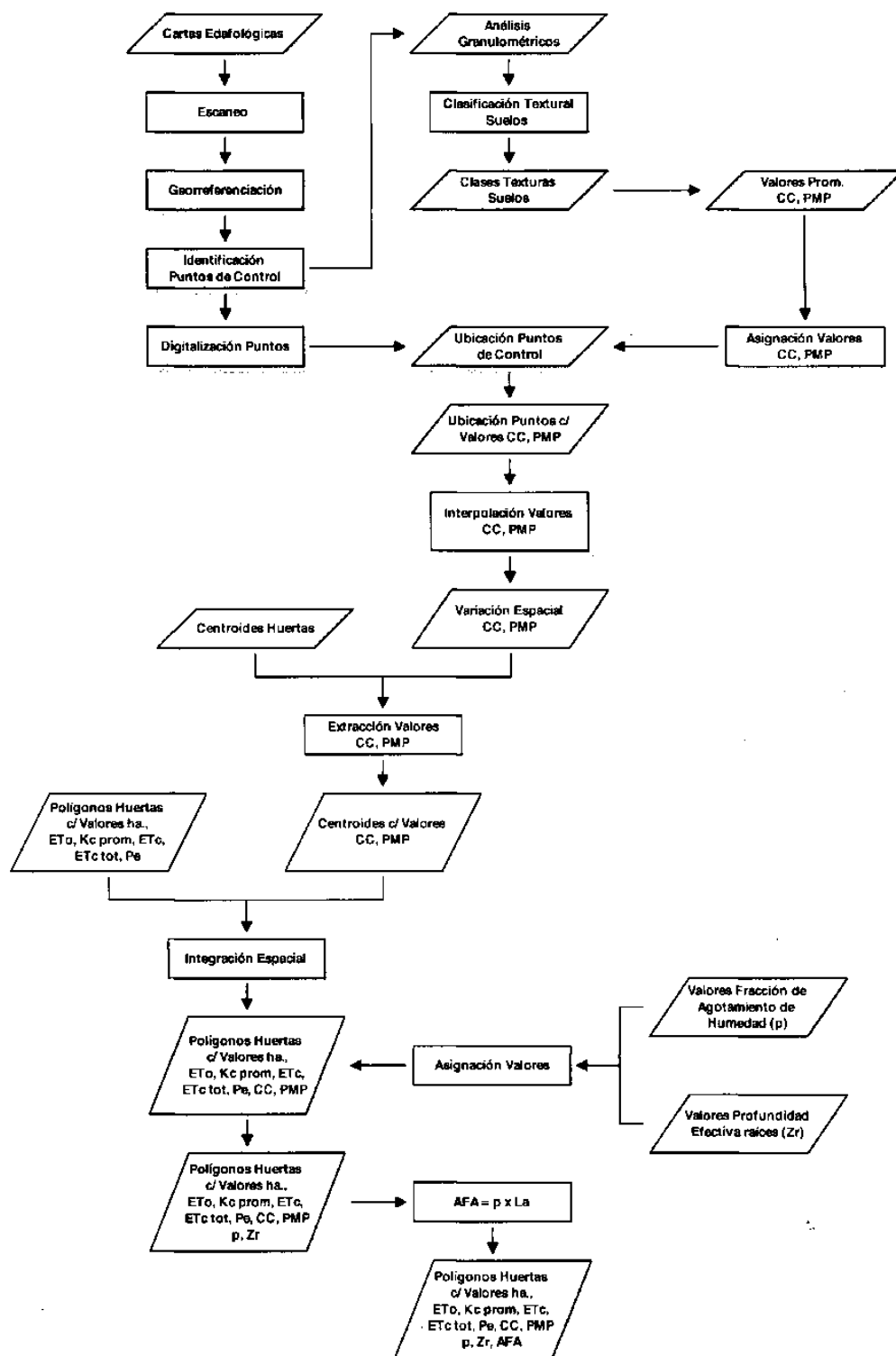
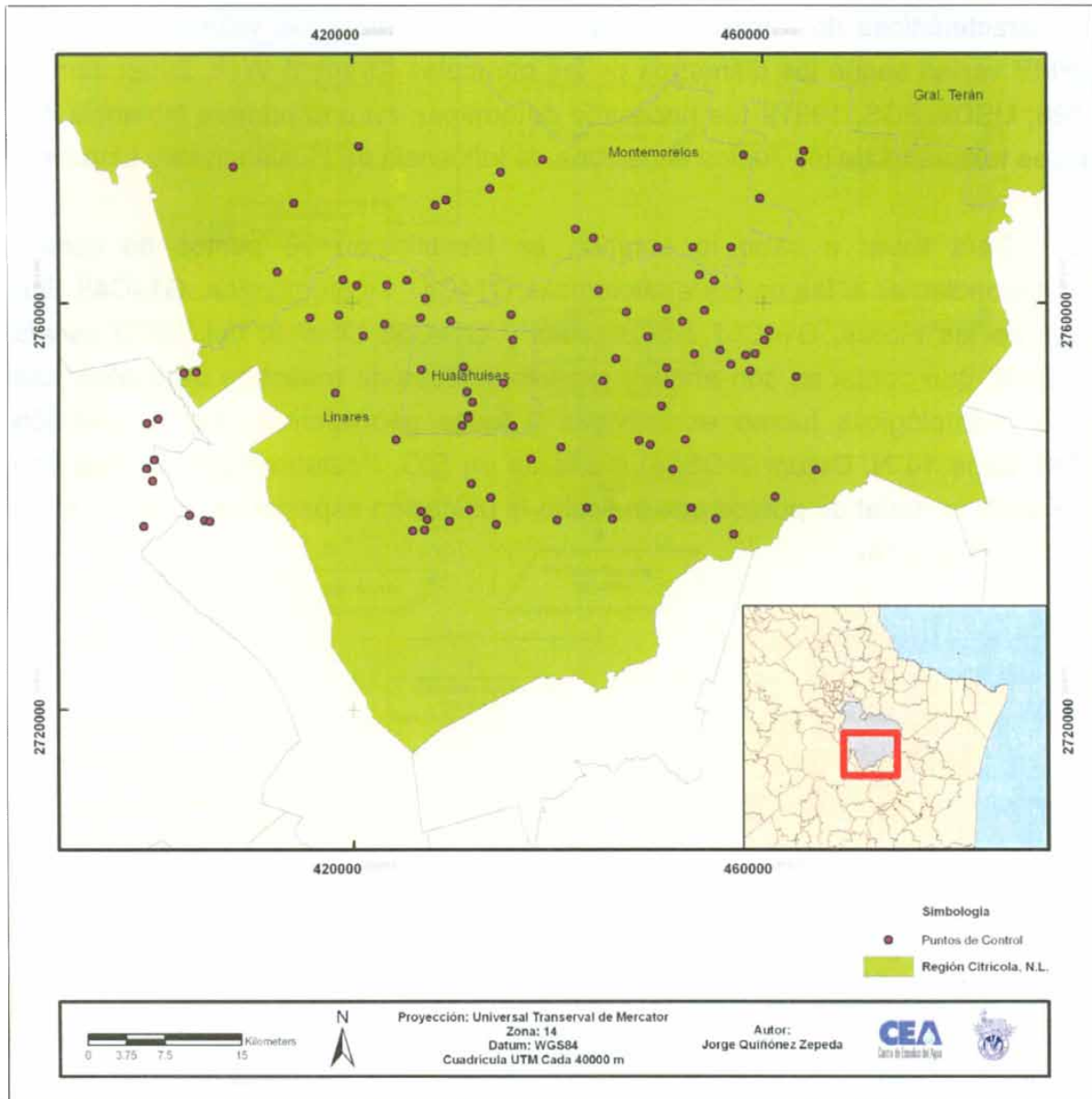


Figura 15. Diagrama metodológico para determinar los contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares.

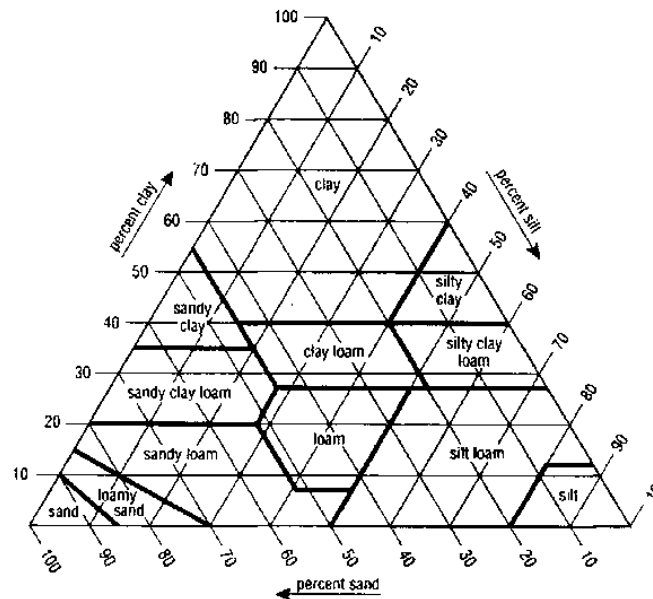
Dado que la textura constituye un factor importante en la determinación de las características de retención de humedad del suelo y los valores de  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$  varían según los diámetros de las partículas (Brady & Weil, 2002; James, 1988; USDA-SCS, 1991), fue necesario determinar, en una primera instancia, las clases texturales de los suelos en la zona de influencia de Hualahuises y Linares.

Para llevar a cabo lo anterior, se identificaron 98 puntos de control correspondientes a las cartas edafológicas G14C47 Montemorelos, G14C48 San José de las Flores, G14C57 Hualahuises y G14C58 Linares, del INEGI escala 1:50000, que contaban con análisis granulométricos de muestras de suelos. Las cartas edafológicas fueron escaneadas y luego georreferenciadas (proyección UTM, Zona 14 N, Datum WGS84) mediante un SIG. Posteriormente se digitalizó una capa vectorial de puntos que indicaba la ubicación espacial de cada punto de control (Figura 16).



**Figura 16.** Ubicación de puntos de control de cartas edafológicas del INEGI escala 1:50,000 correspondientes a zona de influencia de Hualahuises y Linares.

La clasificación textural de las capas superiores de las muestras de suelos de los puntos de control se llevó a cabo a partir de los análisis granulométricos (porcentajes de arcilla, limo y arena) de cada punto, presentados en las respectivas cartas edafológicas del INEGI y recurriendo a los criterios de clasificación establecidos en el triángulo de clases texturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-SCS, 1991) (Figura 17).



**Figura 17.** Triangulo de clases texturales de suelos de la USDA (USDA-SCS, 1991).

Se procedió con la asignación de los valores promedio de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  reportados por Allen et al. (1998), Brakensiek et al. (1982) y Hansen et al. (1979), citado en James (1988) (Tabla 10), que correspondían a las texturas de las capas superiores de las muestras de suelos, como atributos de la capa vectorial de la ubicación de los puntos de control.

**Tabla 10.** Valores promedio y rangos de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  para suelos de diferentes texturas (Allen et al., 1998; Brakensiek et al., 1982; Hansen et al., 1979, citado en James, 1988).

Clasificación de la textura del suelo (USDA-SCS)	Contenido de humedad de suelo			
	Rango $\Theta_{CC}$ ( $m^3 * m^{-3}$ )	Prom. $\Theta_{CC}$ ( $m^3 * m^{-3}$ )	Rango $\Theta_{PMP}$ ( $m^3 * m^{-3}$ )	Prom. $\Theta_{PMP}$ ( $m^3 * m^{-3}$ )
Franco arenoso	0.18 – 0.28	0.23	0.06 – 0.16	0.11
Franco	0.20 – 0.30	0.25	0.07 – 0.17	0.12
Arcilloso	0.32 – 0.40	0.36	0.20 – 0.24	0.22
Franco arcilloso	0.32 – 0.42	0.37	0.15 – 0.20	0.175
Franco arcillo arenoso	ND	0.256	ND	0.148
Arcillo arenoso	ND	0.339	ND	0.239

ND = No Disponible

Se procedió con el análisis exploratorio y estructural de los datos muestrales, validación cruzada de los conjuntos de modelos teóricos para los semivariogramas experimentales y configuraciones de vecindades de búsqueda, así como la interpolación mediante Kriging Ordinario<sup>7</sup> de los valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  en los puntos no muestreados de la zona de influencia de Hualahuises y Linares. Se extrajo la información de las superficies continuas tipo raster producto de las interpolaciones realizadas, hacia los centroides de los polígonos de huertas según la ubicación espacial que compartían o donde se interceptaban. Los atributos de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  de los centroides fueron transferidos a sus correspondientes polígonos de huertas de cítricos por medio de un algoritmo de integración espacial.

Al no contar con datos de humedad inicial del suelo, a modo de hacer efectiva la aplicación de la ecuación (10.2), los valores de  $\Theta_{CC}$  producto de la interpolación, fueron designados como los contenidos de agua en la zona radicular de las huertas de cítricos al inicio del intervalo de tiempo considerado ( $\Theta_i$ ). El volumen de agua contenido entre  $\Theta_{CC}$  y AFA fue designado como el contenido de agua en la zona radicular al final del intervalo de tiempo considerado ( $\Theta_f$ ). Se consideró un intervalo de tiempo de un mes, dado que para el caso de ciertas estaciones meteorológicas, solo se contaban con registros mensuales de precipitación pluvial.

El AFA se determina por medio de la siguiente ecuación (Allen et al., 1998; James, 1988):

$$AFA = p * ADT \quad (11)$$

Donde:

- AFA: agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular (mm),

---

<sup>7</sup> Se determinó la conveniencia de recurrir al Kriging Ordinario con base en los resultados del análisis exploratorio de los datos muestrales (ver Capítulo II, Sección 2.1.3.2), dado que este variante del Kriging supone estacionariedad “global” por lo que genera mapas de predicción confiables a partir de datos muestrales que presentan tendencias y/o carecen de distribución normal (ESRI, 2001; Gallardo, 2006).



- p: fracción promedio del total de agua disponible en el suelo que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (0 – 1),
- ADT: total del agua disponible en la zona radicular del suelo (mm).

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para los valores de  $K_c$  prom, se asignó un valor de 0.50 (m) como atributo de los polígonos de huertas, correspondiente a la fracción de agotamiento de humedad (p) reportada por Allen et al. (1998) para cítricos con 70% de cobertura vegetal en condiciones sin estrés hídrico.

La lámina del agua disponible total en la zona radicular del suelo (ADT) se determina de la siguiente manera (Allen et al., 1998):

$$ADT = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) * Z_r * 1000 \quad (12)$$

Donde:

- ADT: total del agua disponible en la zona radicular del suelo (mm),
- $Z_r$ : profundidad radicular máxima efectiva de las raíces (m),
- $\theta_{CC}$ : contenido de agua a capacidad de campo ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ),
- $\theta_{PMP}$  contenido de agua en el punto de marchitez permanente ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ).

Dado que el menor valor de los rangos de  $Z_r$  reportados para diferentes cultivos es comúnmente empleado para la planificación del riego y considerando que en la mayoría de los cultivos, el 70% del agua absorbida se extrae en la mitad más superficial de su zona radicular donde alcanza su mayor desarrollo (Allen et al., 1998; Raghunath, 1987; USDA-SCS, 1991), se asignó el valor de 0.6 (m) como atributo de los polígonos de huertas, con base en el rango de valores comprendido entre los 1.20 m y 1.50 m reportado por Allen et al. (1998) para cítricos con 70% de cubierta vegetativa.

Con base en la ecuación (10.2), el requerimiento neto de agua de riego a proporcionar mensualmente en una temporada para mantener la humedad de la zona radicular entre los umbrales correspondientes a  $\theta_{CC}$  y AFA y asumiendo una humedad inicial ( $\theta_i$ ) equivalente a  $\theta_{CC}$  y una humedad final ( $\theta_f$ ) igual a la diferencia entre AFA y  $\theta_{CC}$ , se calcula de la siguiente manera:

$$R_n = \Theta CC - (\Theta CC - AFA) + ET_c - Pe \quad (13)$$

Simplificando la ecuación anterior, se obtiene la siguiente expresión:

$$R_n = AFA + ET_c - Pe \quad (13.1)$$

Los valores de  $R_n$  fueron determinados aplicando la ecuación (13.1) a cada polígono de huerta. El requerimiento neto total de agua de riego ( $R_{n \text{ tot}}$ ) se determinó mediante la sumatoria del producto de la multiplicación de los valores de  $R_n$  de cada polígono por los valores de superficie correspondientes (en hectáreas).

#### ***4.1.3. Consumo Bruto Mínimo de Agua de Riego de Superficie Citrícola en Producción***

El consumo bruto mínimo total de agua de riego de la superficie cítrica con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares fue calculado mediante la siguiente ecuación (James, 1988):

$$R_{b \text{ tot}} = R_{n \text{ tot}}/Ea \quad (14)$$

Donde:

- $R_{b \text{ tot}}$ : requerimiento bruto mínimo total de agua de riego (mm),
- $R_{n \text{ tot}}$ : requerimiento neto total de agua riego (mm),
- $Ea$ : eficiencia de aplicación de agua de riego (%).

Con base en las cifras presentadas por el Anuario Estadístico de la Producción Agrícola del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca, Desarrollo Rural y Alimentación (SIAP-SAGARPA), concernientes al porcentaje de superficie cítrica que es objeto de riego en el municipio de Hualahuises (SAGARPA, 2007), se calcularon los valores de  $R_{b \text{ tot}}$  correspondientes al 93% de los polígonos de huertas (1,427.61 ha), seleccionados de manera aleatoria. Para el caso de Linares, con base en esta misma fuente, se calcularon los valores de  $R_{b \text{ tot}}$  correspondientes al 97% de los polígonos de huertas (1,796.23 ha), seleccionados también de manera aleatoria.

Dado que se carecía de información específica referente al porcentaje de superficie citrícola regada mediante sistemas por gravedad y presurizados en Hualahuises y Linares, se asignó para ambos casos el valor promedio de eficiencias de aplicación (Ea) de sistemas por gravedad reportado por Brouwer et al. (1989) al 72% de los polígonos de huertas de cítricos con riego, seleccionadas de manera aleatoria, el valor promedio de Ea de sistemas de microaspersión reportado por Obreza & Pitts (2002) al 24%, el valor promedio de Ea de sistemas de aspersión reportados por Gurovich (1985), Solomon (1988), Barnes et al. (1997) y Brouwer et al. (1989) al 3% y el valor promedio de Ea de sistemas por goteo reportado por Gurovich (1985) y Brouwer et al. (1986) al 1% de los polígonos restantes (Tabla 11). Los porcentajes de la superficie citrícola con riego por gravedad y presurizado en ambos municipios fueron derivados de los porcentajes estimados de manera general para la zona citrícola (ITESM, 2002), bajo el supuesto de que esta distribución se cumple de manera aproximada para cada municipio que la integra.

**Tabla 11.** Valores de eficiencia de aplicación de sistemas de riego por gravedad y sistemas presurizados (Barnes et al., 1997; Brouwer et al., 1989; Gurovich, 1985; Obreza & Pitts, 2002; Solomon, 1988).

Sistema de riego	Eficiencias de Aplicación (Ea)					Prom.
	Gurovich, 1985	Solomon, 1988	Barnes et al., 1997	Brouwer et al., 1989	Obreza & Pitts, 2002	
Riego por Gravedad	---	---	---	60%	---	60%
Riego Presurizado						
1. Aspersión	90%	65 – 80%	65 – 85%	75%	---	78%
2. Micro-irrigación						
2.2.1. Microaspersión	---	---	---	---	90%	90%
2.2.2. Goteo	95%	---	---	90%	---	93%

#### **4.2. Escenario Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción mediante Gravedad o Presurizado**

En este escenario se mantiene la totalidad de la superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares que fue extraída de

la clasificación de las imágenes Landsat 5-TM de 2006 y 2007, pero la misma es regada por una de varias modalidades. Con base en las tres modalidades de riego más comúnmente utilizadas en la zona citrícola (ITESM, 2002), se modelaron los siguientes tres sub-escenarios:

- Riego por gravedad de la totalidad de la superficie citrícola con riego en producción.
- Riego por aspersión de la totalidad de la superficie cítricola con riego en producción.
- Riego por microaspersión de la totalidad de la superficie cítricola con riego en producción.

Se aplicó la ecuación (14) a los polígonos de las huertas de cítricos con riego en producción, considerando los valores promedio de eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) correspondientes a sistemas de riego por gravedad y sistemas de riego presurizado, reportados por Brouwer et al. (1989), Gurovich (1985), Rogers et al., (1997) y Solomon (1988). Posteriormente se realizó la sumatoria de los valores de  $R_{b\ tot}$  calculados para cada polígono.

#### ***4.3. Escenario Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Hortalizas***

En este escenario se mantiene el 50% de las huertas con cítricos (751.00 ha en Hualahuises y 919.28 ha en Linares), mientras que las huertas restantes (675.63 Ha en Hualahuises y 876.87 ha en Linares) son convertidas a tres tipos de hortalizas (tomate, melón y sandía)<sup>8</sup>. Las huertas de cítricos y hortalizas son regadas por gravedad o presurizado o combinaciones de gravedad con presurizado. Con base en lo anterior se modelaron los siguientes sub-escenarios:

- Riego por gravedad, aspersión y microaspersión de la superficie citrícola con riego en producción, considerando la reconversión productiva del 50% de las huertas a tomate, melón y sandía.

---

<sup>8</sup> La selección de cultivos para los sub-escenarios analizados, se hizo con base en las tendencias de reconversión productiva observadas en los últimos años en la zona citrícola (Fuente: Comunicación personal, Ing. Juan Livas Cantú, Director General, FIDECITRUS, 2008).

- Riego por gravedad, aspersion y microaspersion del 50% de las huertas de cítricos con riego en producción y riego por goteo de las huertas restantes convertidas a tomate, melón y sandía.

Cabe señalar que en los sub-escenarios donde se realiza riego por goteo, esta modalidad solo es considerada para las huertas convertidas a hortalizas y no para los cítricos, dado que riego por goteo proporciona volúmenes y distribuciones de agua insuficientes en la zona radicular para lograr una producción comercial cítrica (Fuente: Dr. Juan Valiente Banuet, Profesor-Investigador, ITESM, 2008).

Para el caso de este escenario en donde se realiza riego de la superficie cítrica con riego en producción considerando la reconversión productiva del 50% de las huertas a tomate, melón y sandía, fue necesario calcular la demanda de agua ( $ET_{c \text{ tot}}$ ) y valores de  $R_{n \text{ tot}}$  y  $R_{b \text{ tot}}$  de los polígonos correspondientes a la superficie que es objeto de dicha reconversión.

Se procedió con la selección aleatoria del 50% de los polígonos de huertas de cítricos y sustitución de sus valores de  $K_{c \text{ prom}}$  por los valores promedio de  $K_c$  correspondientes a tomate, melón y sandía reportados por Allen et al. (1998) (Tabla 12).

**Tabla 12.** Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo correspondiente a hortalizas (tomate, melón y sandía) (Allen et al., 1998).

Cultivo	$K_{c \text{ ini}}$	$K_{c \text{ med}}$	$K_{c \text{ fin}}$	$K_{c \text{ prom}}$
Tomate	0.6	1.15	0.70 – 0.90	0.85
Melón	0.5	0.85	0.60	0.65
Sandía	0.4	1.00	0.75	0.72

Los valores de  $ET_c$  de los polígonos designados como hortalizas fueron determinados multiplicando los valores de evapotranspiración de cultivo de referencia ( $ET_o$ ) (extraídos anteriormente de las superficies continuas generadas mediante Kriging Ordinario) por los nuevos valores de  $K_{c \text{ prom}}$  asignados. Se calcularon los valores de  $ET_{c \text{ tot}}$  de cada polígono designado como hortaliza, multiplicando sus valores de  $ET_c$  por sus de superficies correspondientes (en hectáreas) (Allen et al., 1998).

Se determinaron los valores de Zr de las hortalizas con base en los menores valores de los rangos reportados por Allen et al. (1998) y las profundidades a las cuales los sistemas radiculares de los cultivos generalmente alcanzan el mayor desarrollo y consecuentemente extraen la mayor cantidad de agua (Raghunath, 1987; USDA-SCS, 1991) (Tabla 13). Estos valores de Zr fueron asignados a los polígonos designados como hortalizas, en sustitución de los valores de Zr correspondientes a cítricos con 70% de cobertura vegetal.

**Tabla 13.** Rangos de profundidad máxima efectiva de raíces para condiciones sin estrés hídrico, correspondientes a tomate, melón y sandía (Allen et al., 1998; Raghunath, 1987; USDA-SCS, 1991).

<b>Cultivo</b>	<b>Rango Zr (m)</b>	<b>Zr (m)</b>
Tomate	0.7 – 1.5	0.35
Melón	0.9 – 1.5	0.45
Sandía	0.8 – 1.5	0.40

Valores de Zr asignados como atributos de polígonos de hortalizas.

Los valores de fracción de agotamiento (p) correspondientes a tomate, melón y sandía, reportados por Allen et al. (1998) (Tabla 14) fueron asignados a los polígonos designados como hortalizas, en sustitución de los valores de (p) correspondientes a cítricos con 70% de cubierta vegetativa.

**Tabla 14.** Fracción de agotamiento de humedad en el suelo para condiciones sin estrés hídrico correspondiente a tomates, melones y sandías (Allen et al., 1998).

<b>Cultivo</b>	<b>Fracción de agotamiento (p)</b>
Tomate	0.40
Melón	0.45
Sandía	0.40

Posteriormente se aplicó a la ecuación (13.1) a cada polígono designado como hortaliza con el objetivo de calcular sus valores de  $R_n$ . Los valores de  $R_{n\ tot}$

de estos polígonos fueron obtenidos multiplicando sus valores de  $R_n$  por sus superficies correspondientes (en hectáreas).

Los requerimientos netos totales de agua de riego para cada sub-escenario se determinó mediante la sumatoria de los valores de  $R_{n \text{ tot}}$  de cada uno de los polígonos designados como hortalizas y los valores de  $R_{n \text{ tot}}$  de los polígonos de huertas de cítricos calculados con anterioridad.

El requerimiento bruto mínimo total de agua de riego ( $R_{b \text{ tot}}$ ) para cada sub-escenario se determinó aplicando la ecuación (14) a los polígonos correspondientes a hortalizas y cítricos, considerando los valores de  $E_a$  presentados en la Tabla (11) y luego realizando la sumatoria de los respectivos productos.

#### ***4.4. Evaluación de Escenarios en el Uso de Agua de Riego***

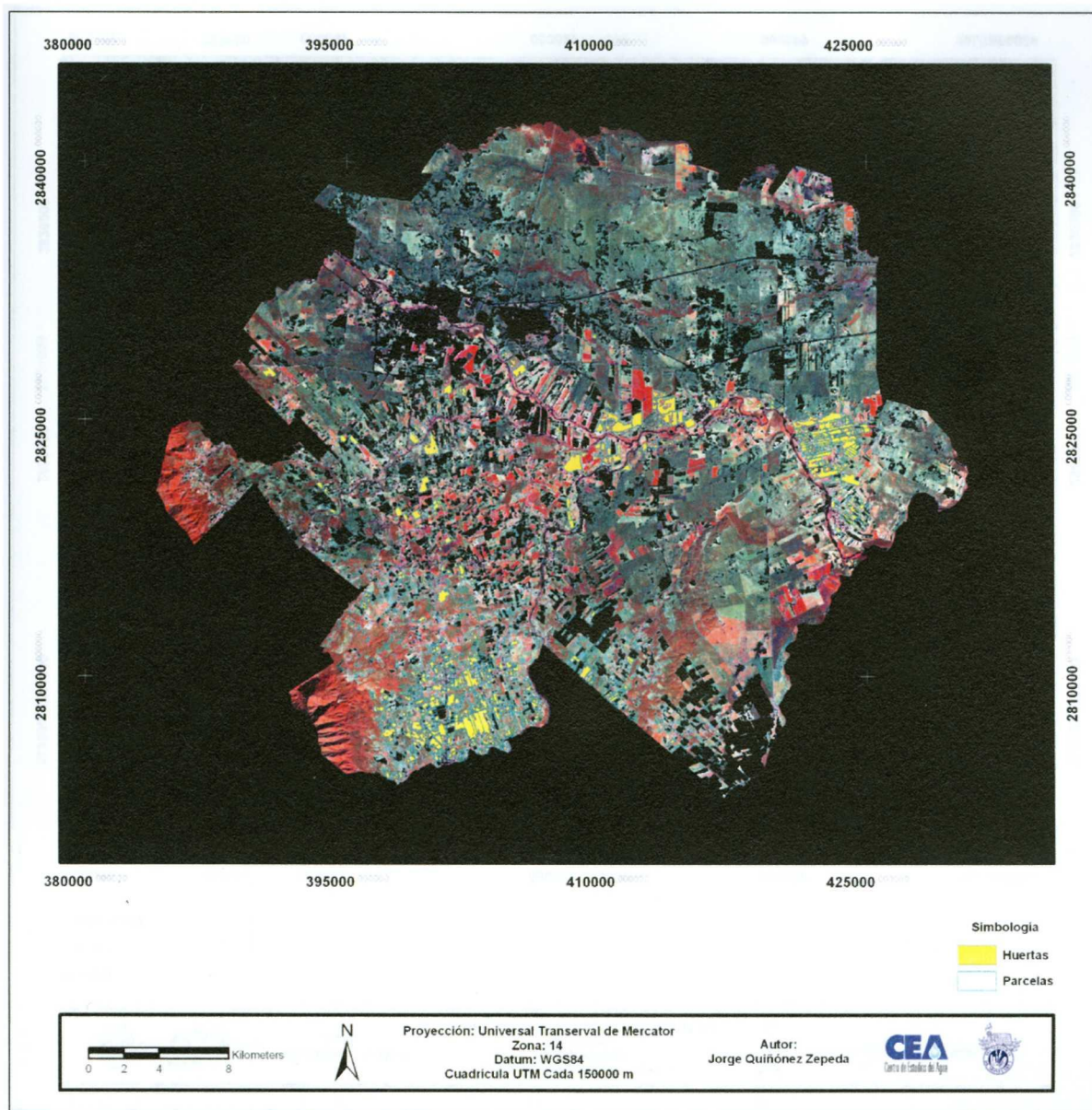
Se realizó un análisis comparativo entre los consumos mínimos totales de agua de riego de la superficie cítricola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares y los requerimientos brutos mínimos totales de agua de riego que fueron calculados para cada uno de los escenarios y sub-escenarios que consideran diferentes modalidades de riego y/o reconversión productiva de cultivos. Se designó como sub-escenario “óptimo” aquel que logra el mayor ahorro potencial de volúmenes de agua destinada para riego en cada municipio y por consiguiente el uso más eficiente.

## **CAPITULO III: RESULTADOS**

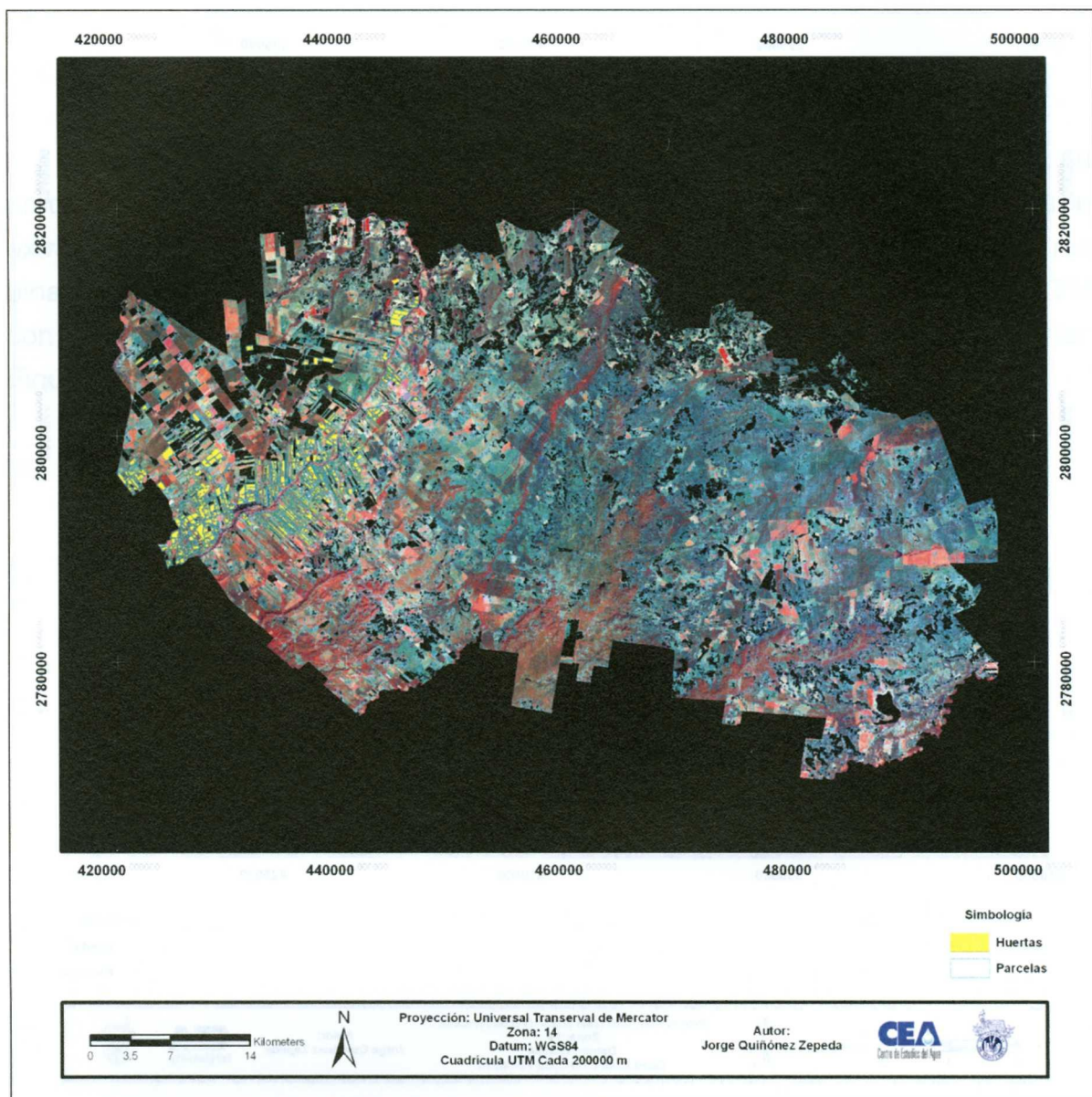
### **1. Clasificación de Imágenes Landsat 5-TM**

Las superficies de las huertas de cítricos con riego y de temporal en producción, localizadas en la zona citrícola del estado de Nuevo León, que fueron extraídas a partir de la clasificación de los subsets irregulares con máscaras binarias integradas correspondientes a las imágenes multibanda Landsat 5-TM con fechas 16 de noviembre 2006 y 20 de febrero 2007, se presentan en las Figuras 18 a 23.



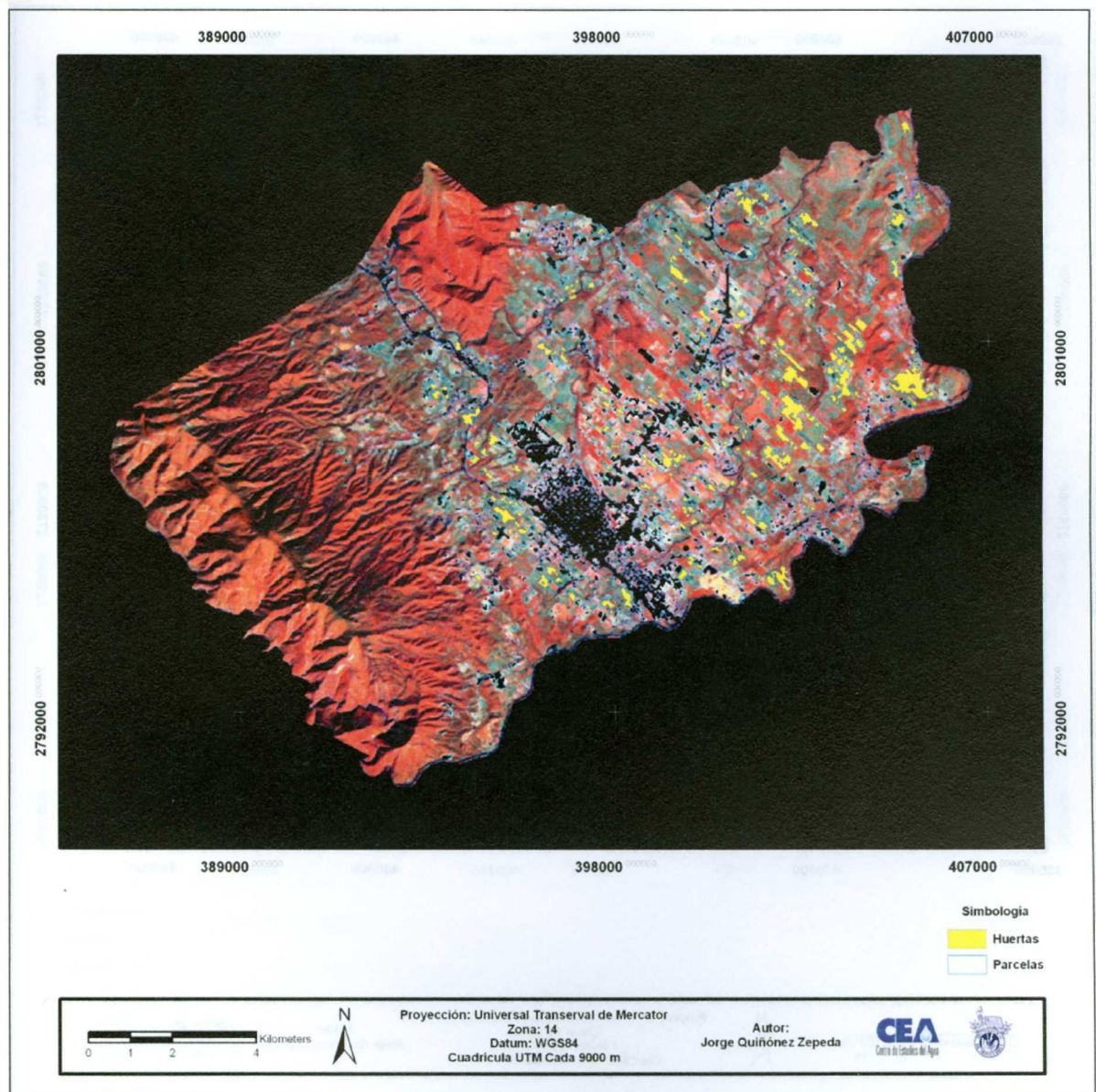


**Figura 18.** Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Cadereyta Jiménez, Nuevo León.

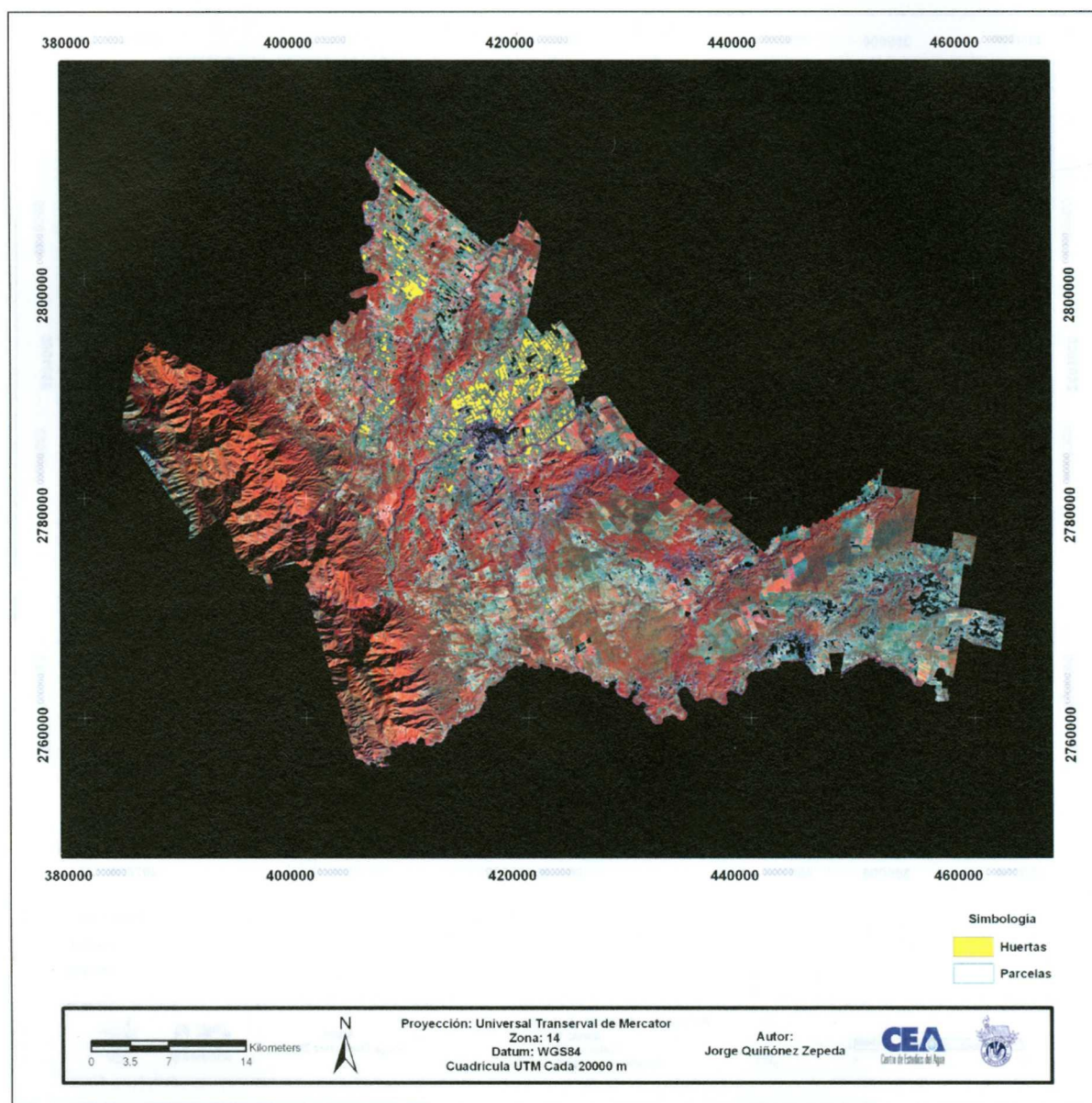


**Figura 19.** Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de General Terán, Nuevo León.



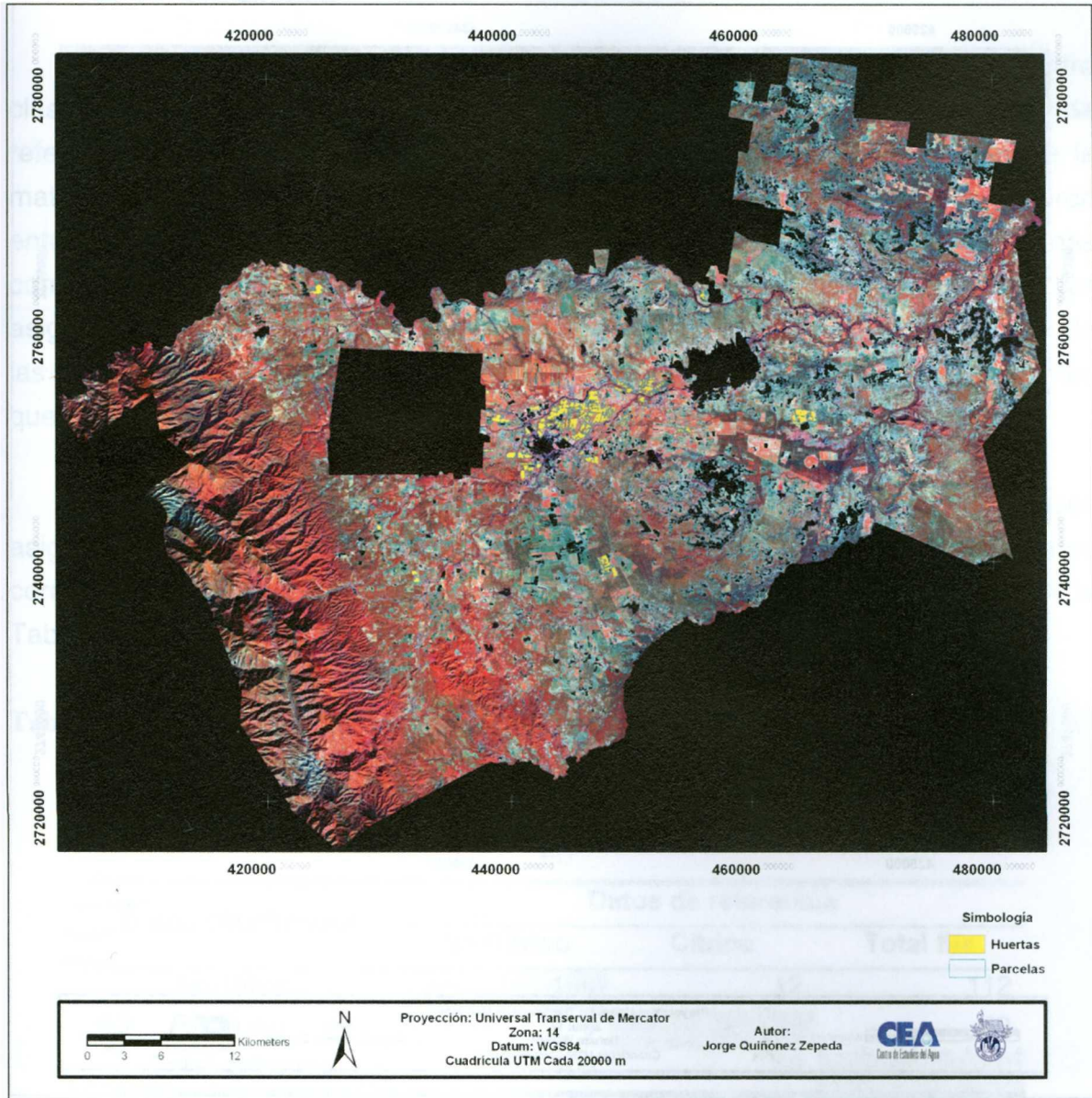


**Figura 20.** Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Allende, Nuevo León.

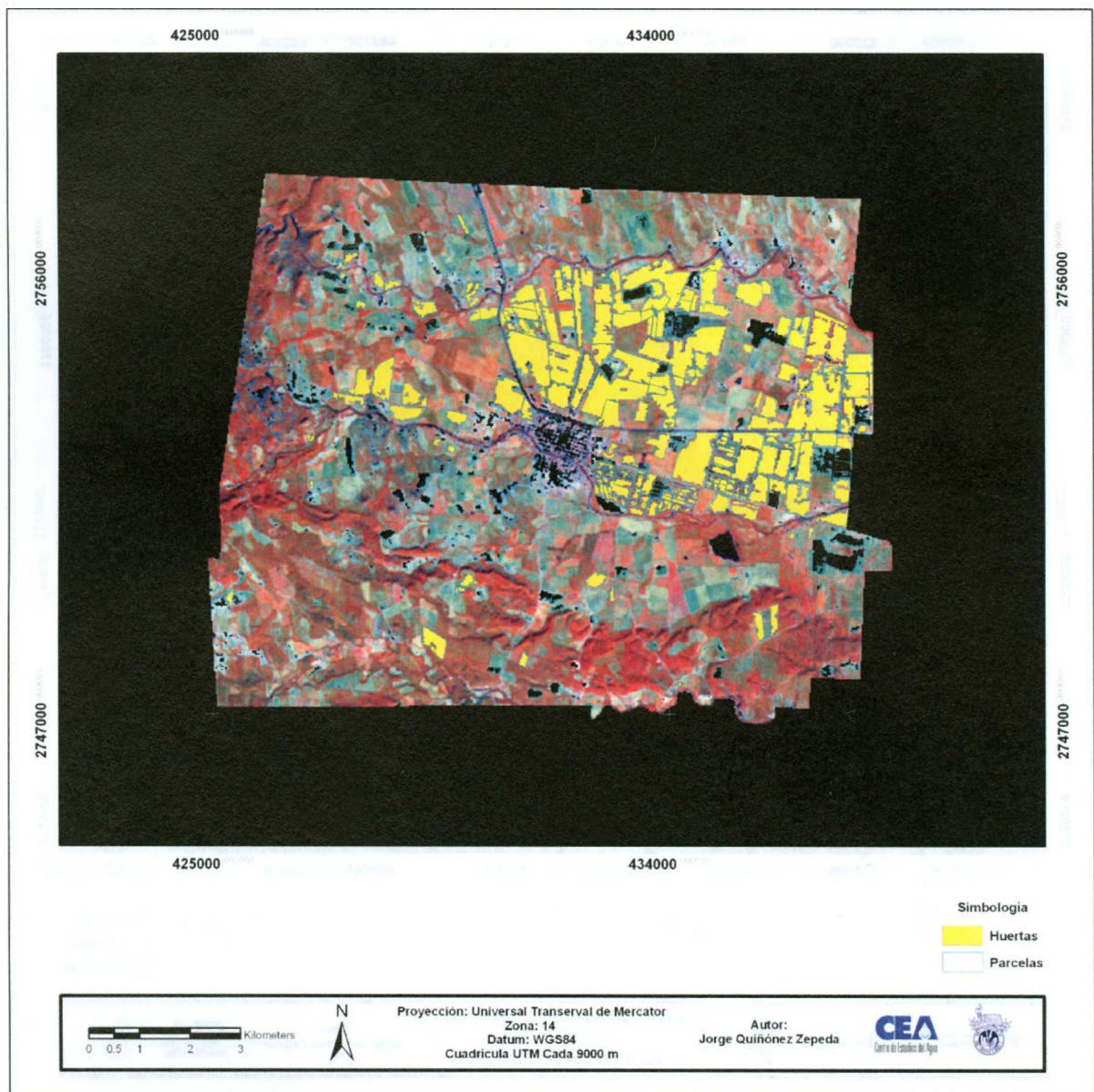


**Figura 21.** Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Montemorelos, Nuevo León.





**Figura 22.** Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Linares, Nuevo León.



**Figura 23.** Huertas de cítricos en producción identificadas en el municipio de Hualahuises, Nuevo León.

### 1.1. Evaluación de la Clasificación

La matriz de error o confusión recoge los conflictos presentados entre clases o categorías. En esta matriz, las columnas identifican las clases de referencia y las filas las clases deducidas de la clasificación. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre la clasificación y la realidad. Las celdas diagonales de las columnas corresponden a los errores de comisión que señalan el número de píxeles asignados a una clase real a la cual no pertenecen. Las celdas no diagonales de las filas corresponden a los errores de omisión que indican el número de píxeles que no fueron asignados a la clase real a la cual pertenecen (Chuvieco, 2002).

Las matrices de error, producto de las comparaciones entre las clases asignadas y las deducidas por las clasificaciones de los subsets irregulares correspondientes a las imágenes multibanda Landsat 5-TM, se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Matrices de error. (a) Subset irregular de fecha 16 de noviembre 2006, (b) Subset irregular de fecha 20 de febrero 2007.

(a)

Datos clasificados	Datos de referencia		
	No-Cítrico	Cítrico	Total fila
No-Cítrico	100	12	112
Cítrico	0	38	38
Total columna	100	50	150

(b)

Datos clasificados	Datos de referencia		
	No-Cítrico	Cítrico	Total fila
No-Cítrico	47	11	58
Cítrico	3	39	42
Total columna	50	50	100

El reporte de las medidas estadísticas generadas a partir de las matrices de error, que permitieron validar numéricamente los resultados de las clasificaciones



de los subsets irregulares de las imágenes Landsat 5-TM se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Reporte de medidas estadísticas de validación numérica de resultados de clasificaciones. (a) Imagen Landsat 5-TM de fecha 16 de noviembre 2006, (b) Imagen Landsat 5-TM de fecha 20 de febrero 2007.

(a)

Clase	Totales de referencia	Totales clasificados	Número correcto	Precisión del productor	Precisión del usuario
No-Cítrico	100	112	100	---	---
Cítrico	50	38	38	76.00%	100.00%
<b>Totales</b>	150	150	138		

Precisión global de la clasificación = 92.00%

Estadística Kappa globales = 0.8085

Kappa condicional para cada clase:

Clase	Kappa
No-Cítrico	0.6786
Cítrico	1.0000

(b)

Clase	Totales de referencia	Totales clasificados	Número correcto	Precisión del productor	Precisión del usuario
No-Cítrico	50	58	47	---	---
Cítrico	50	42	39	78.00%	92.86%
<b>Totales</b>	100	100	86		

Precisión global de la clasificación = 86%

Estadística Kappa global = 0.7200

Kappa condicional para cada clase:



<b>Clase</b>	<b>Kappa</b>
No-Cítrico	0.6207
Cítrico	0.8571

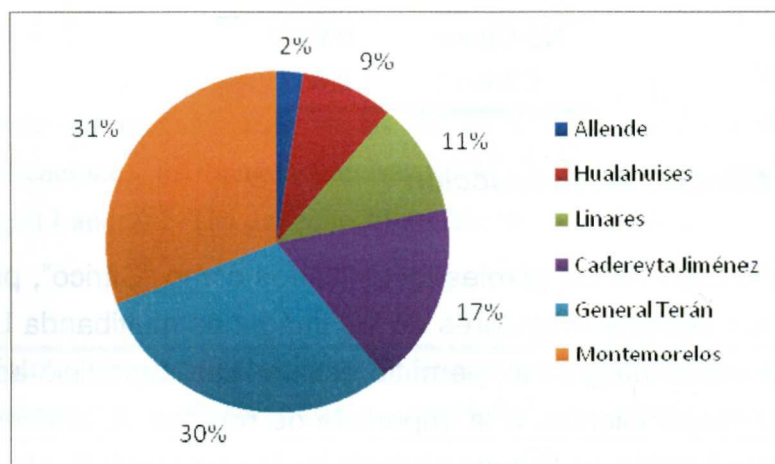
### **1.2. Superficie Citrícola en Producción**

La cuantificación de los píxeles identificados como "Cítrico", producto de la clasificación de los subsets irregulares de las imágenes multibanda Landsat 5-TM con máscaras binarias integradas, permitió estimar una superficie aproximada de 17,540.16 ha, correspondientes a la superficie de huertas de cítricos con riego y de temporal en producción en la zona citrícola de Nuevo León (Tabla 17).

**Tabla 17.** Superficie de huertas de cítricos en producción identificada en la zona citrícola de Nuevo León.

<b>Municipio</b>	<b>Superficie de huertas (ha)</b>
Cadereyta Jiménez	3,056.20
General Terán	5,251.68
Allende	443.50
Montemorelos	5,401.95
Hualahuises	1,535.06
Linares	1,851.78
<b>Total</b>	<b>17,540.16</b>

La Figura 24 presenta la distribución porcentual de las superficies de huertas de cítricos en producción ubicadas en los municipios que integran la zona citrícola de Nuevo León.



**Figura 24.** Distribución porcentual de superficies de huertas de cítricos en producción identificadas en los municipios que integran la zona citrícola de Nuevo León.

## 2. Escenarios en el Uso de Agua de Riego

### 2.1. Situación Actual

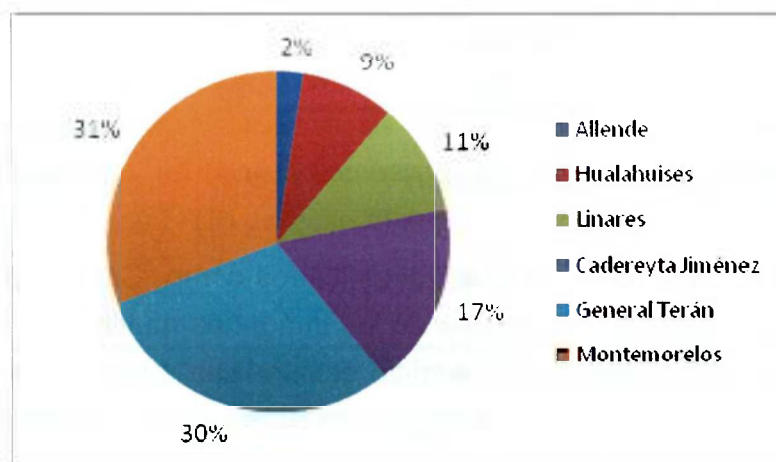
#### 2.1.1. Evapotranspiración de Cultivo de Referencia

##### 2.1.1.1. Datos Muestrales de Evapotranspiración de Referencia

Los valores promedio de las demandas transpirativas de la atmósfera ( $ET_0$ ) mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño de los registros individuales de la red de estaciones agroclimáticas Fundación Produce – INIFAP localizadas en el área de influencia de Hualahuis y Linares, se presentan en el Anexo 1.

##### 2.1.1.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia

La estadística descriptiva de las series de valores promedio de  $ET_0$  mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño en la zona de influencia de Hualahuis y Linares, que permitieron realizar aseveraciones preliminares respecto a la normalidad de los datos, con base en



**Figura 24.** Distribución porcentual de superficies de huertas de cítricos en producción identificadas en los municipios que integran la zona citrícola de Nuevo León.

## 2. Escenarios en el Uso de Agua de Riego

### 2.1. Situación Actual

#### 2.1.1. Evapotranspiración de Cultivo de Referencia

##### 2.1.1.1. Datos Muestrales de Evapotranspiración de Referencia

Los valores promedio de las demandas transpirativas de la atmósfera ( $ET_o$ ) mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño de los registros individuales de la red de estaciones agroclimatológicas Fundación Produce – INIFAP localizadas en el área de influencia de Hualahuis y Linares, se presentan en el Anexo 1.

##### 2.1.1.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia

La estadística descriptiva de las series de valores promedio de  $ET_o$  mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño en la zona de influencia de Hualahuis y Linares, que permitieron realizar aseveraciones preliminares respecto a la normalidad de los datos, con base en

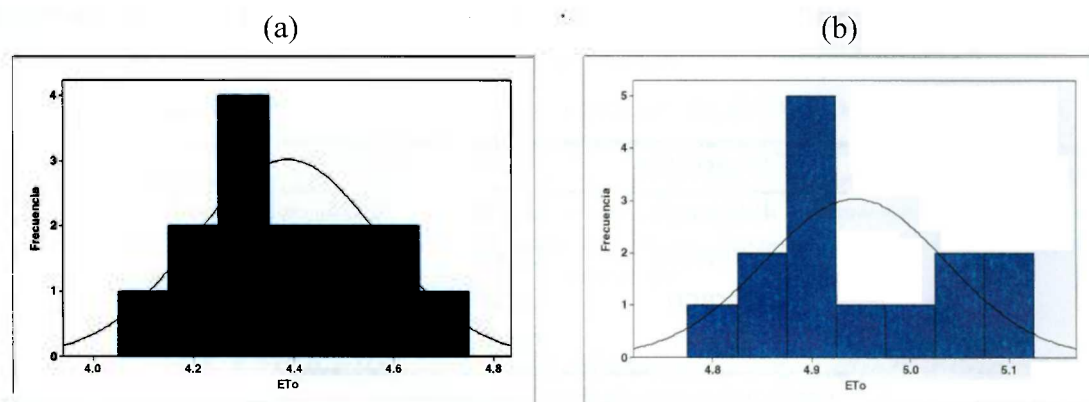
sus medias y medianas, se presenta en la Tabla 18. Los resultados demostraron que la media y mediana de las series de valores promedio de  $ET_o$  mensuales por temporada eran similares, lo cual es un un indicador de simetría, característico de distribuciones gaussianas o normales.

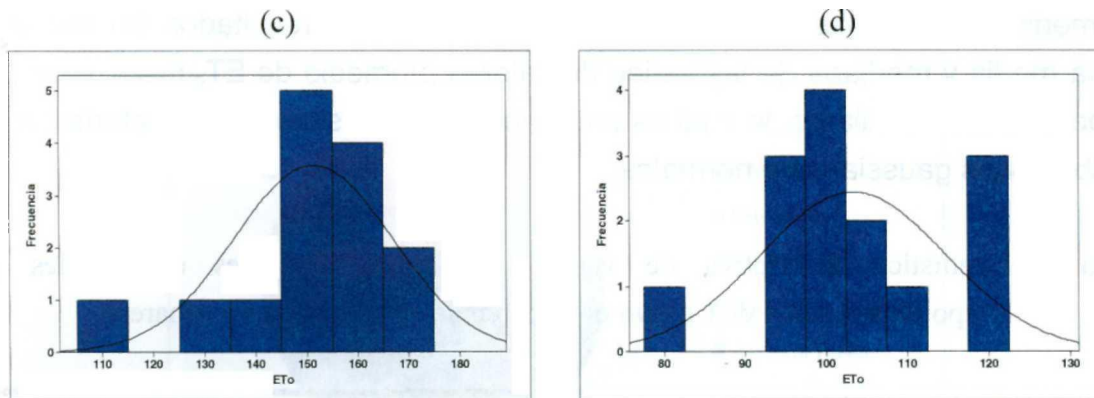
**Tabla 18.** Estadística descriptiva de valores promedio mensuales estacionales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia en Hualahuises y Linares.

Temporada	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Mediana	Coef. Asim.
Invierno	81.79	15.34	57.40	113.20	75.84	0.14761
Primavera	140.94	13.24	121.75	165.30	137.25	0.42368
Verano	151.31	15.63	114.48	168.13	153.54	-1.0325
Otoño	103.35	11.45	78.43	120.08	101.43	-0.17596

Transformación a escala logaritmo natural (ln).

Los histogramas de las series de valores promedio de  $ET_o$  mensuales de las diferentes temporadas en la zona de influencia de Hualahuises y Linares, que también permitieron realizar aseveraciones concernientes a la normalidad de los datos con base en la semejanza gráfica de las barras correspondientes a la frecuencia de los valores representados y la función simétrica de una distribución gausseana, se presentan en la Figura 25. La interpretación visual de los histogramas de frecuencias sugirió que en la mayoría de los casos, los datos presentaban distribuciones semejantes a una distribución normal.





**Figura 25.** Histogramas de series de valores de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia correspondientes a diferentes temporadas (a) In invierno, (b) In primavera, (c) verano, (d) otoño.

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a la series de valores promedio de  $ET_0$  mensuales de las diferentes temporadas en la zona de influencia de Hualahuises y Linares, que sirvieron para rechazar o aceptar de manera definitiva las aseveraciones formuladas respecto a la normalidad de los datos muestrales, producto del análisis de la estadística descriptiva e histogramas de frecuencias, se presentan en la Tabla 19. Con base en los estadísticos Anderson Darling (A-D) y Valores P obtenidos, se dio por aceptada la hipótesis nula que establece que los valores muestrales contaban con una distribución normal.

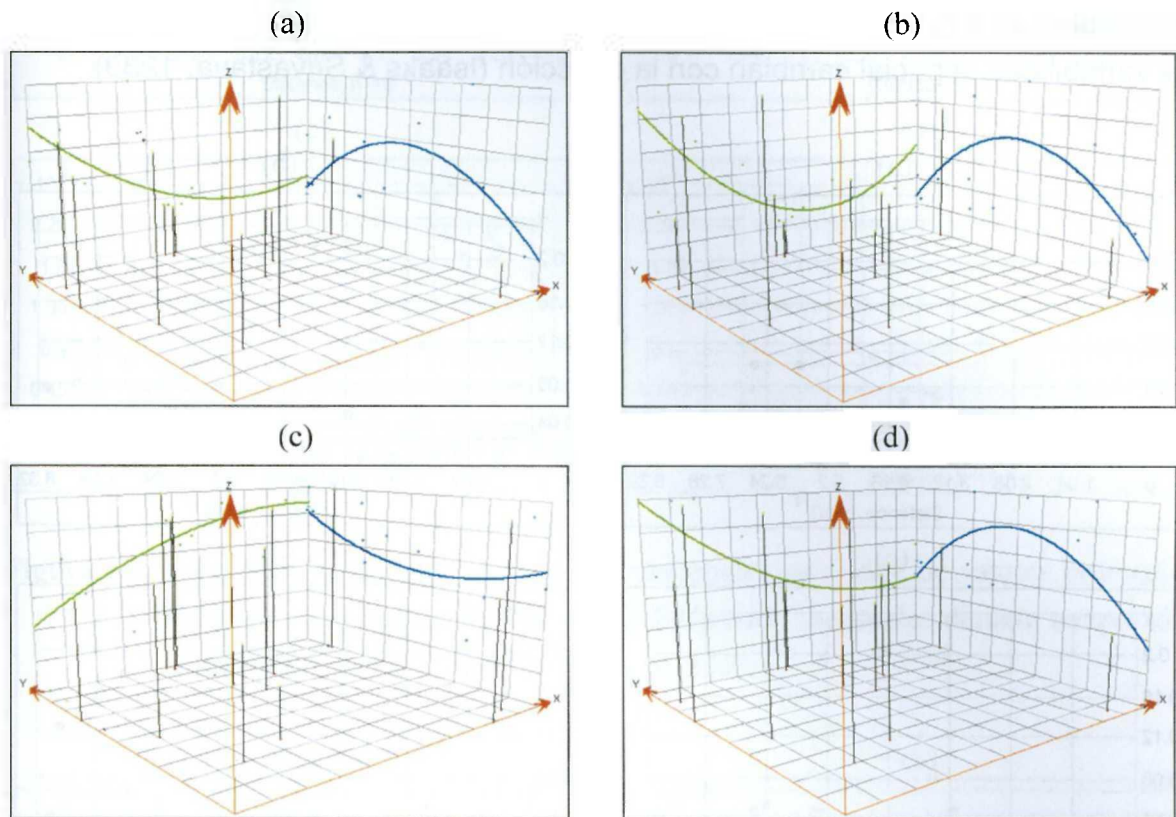
**Tabla 19.** Resultados prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a series de valores de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia correspondientes a diferentes temporadas.

Temporada	A-D	Valor P
Invierno	0.312	0.51
Primavera	0.389	0.335
Verano	0.505	0.168
Otoño	0.481	0.195

Transformación a escala logaritmo natural (ln).

La Figura 26 presenta los gráficos tridimensionales de dispersión que fueron calculados para las series de valores muestrales de  $ET_0$ . Los resultados

demostraron que todas las series de valores presentaban tendencias, por lo que se determinó que no cumplían con el supuesto de estacionariedad (Isaaks & Srivastava, 1989). Esta falta de estacionariedad usualmente se le atribuye a la presencia de anomalías en el espacio debido a la existencia de una tendencia o gradiente espacial cuya dimensión es mayor al área de estudio (Gallardo, 2006).

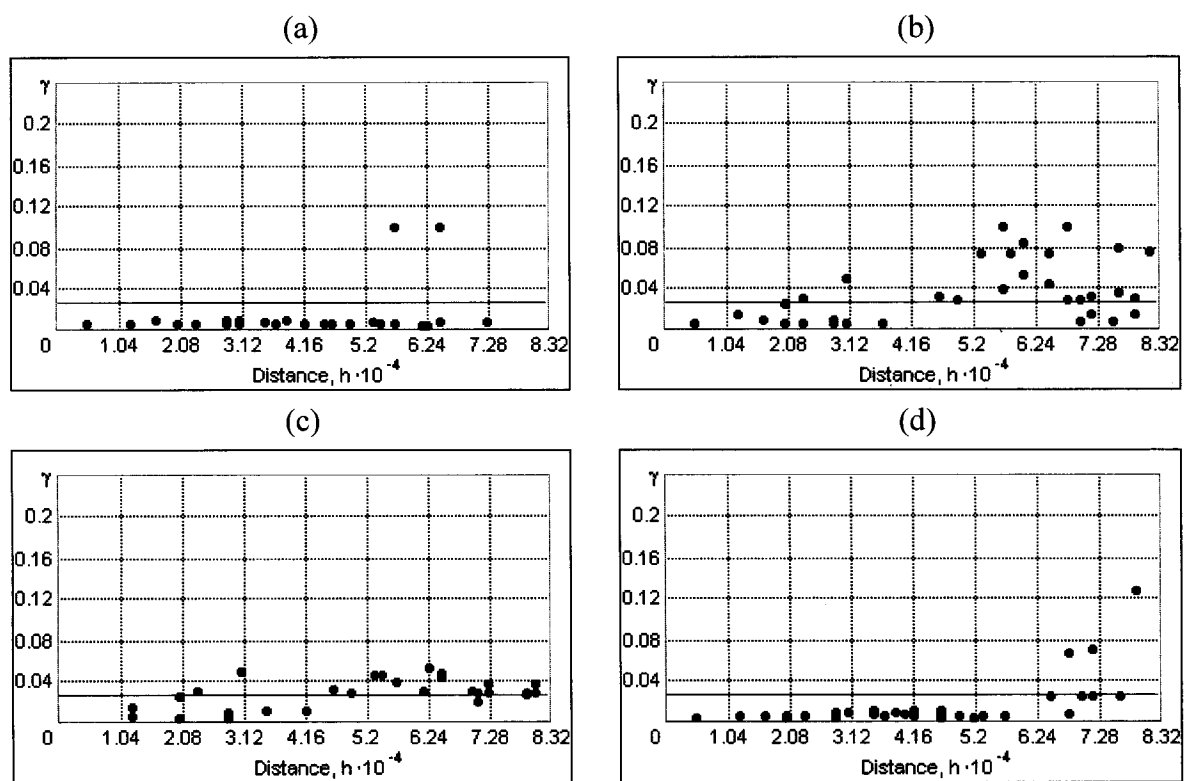


**Figura 26.** Diagramas de dispersión tridimensionales de series de valores muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia correspondientes a diferentes temporadas. (a) In invierno, (b) In primavera, (c) verano, (d) otoño. Nota: El eje x corresponde al eje norte-sur, mientras que el eje y corresponde al eje este-oeste. Las líneas verticales representan los valores y ubicaciones de los puntos muestrales, los cuales se encuentran proyectados hacia dos planos perpendiculares, uno este-oeste y otro norte-sur. Las líneas de color verde corresponden al polinomio que mejor atraviesa los puntos proyectados, modelando la tendencia global en dirección este-oeste, mientras que las líneas de color azul representan un polinomio que modela la tendencia global en dirección norte-sur.

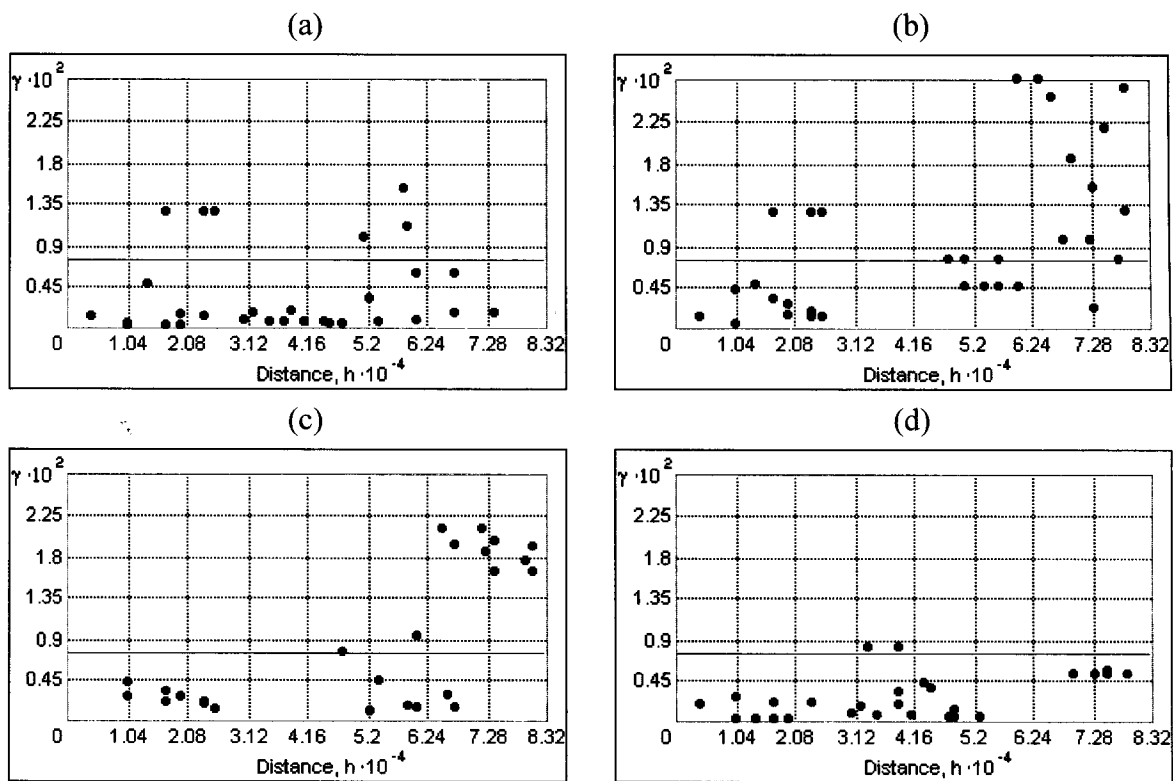
### **2.1.1.3. Análisis Estructural de Datos Muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia**



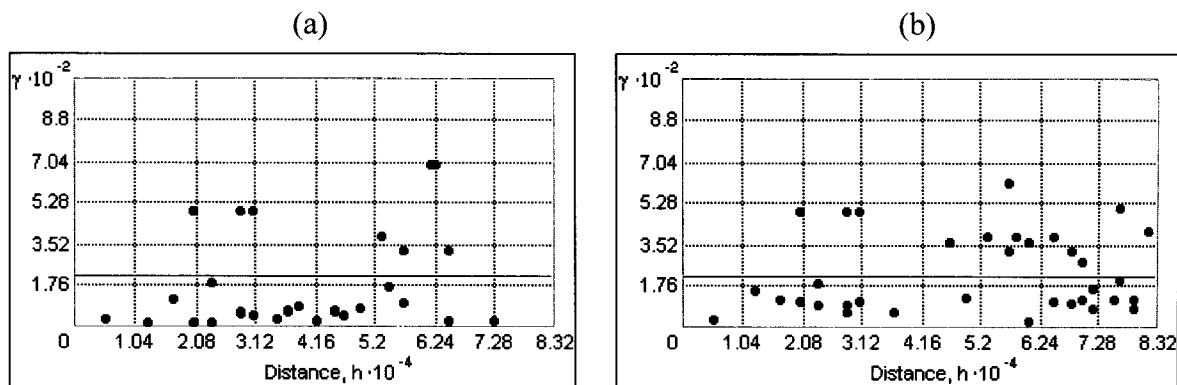
Los semivariogramas experimentales direccionales de las series de valores de  $ET_0$  mensuales de las diferentes temporadas, calculados considerando una distancia máxima entre pares de puntos muestrales de aprox. 165,755.2 m, que corresponde a la distancia comprendida entre las estaciones agroclimatológicas Ciénega del Toro y El Barretal, se presentan en las Figuras 27 a 30. Los semivariogramas direccionales calculados demostraron que las series de valores muestrales de  $ET_0$  presentaban condiciones de anisotropía, dado que los patrones de variabilidad espacial cambian con la dirección (Isaaks & Srivastava, 1989).



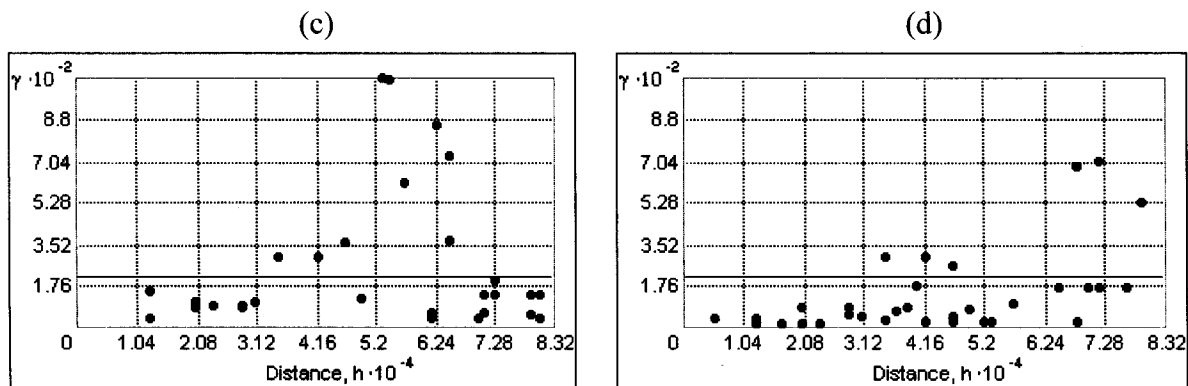
**Figura 27.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia mensuales durante temporada de invierno. (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$ , (d)  $135^\circ$ .



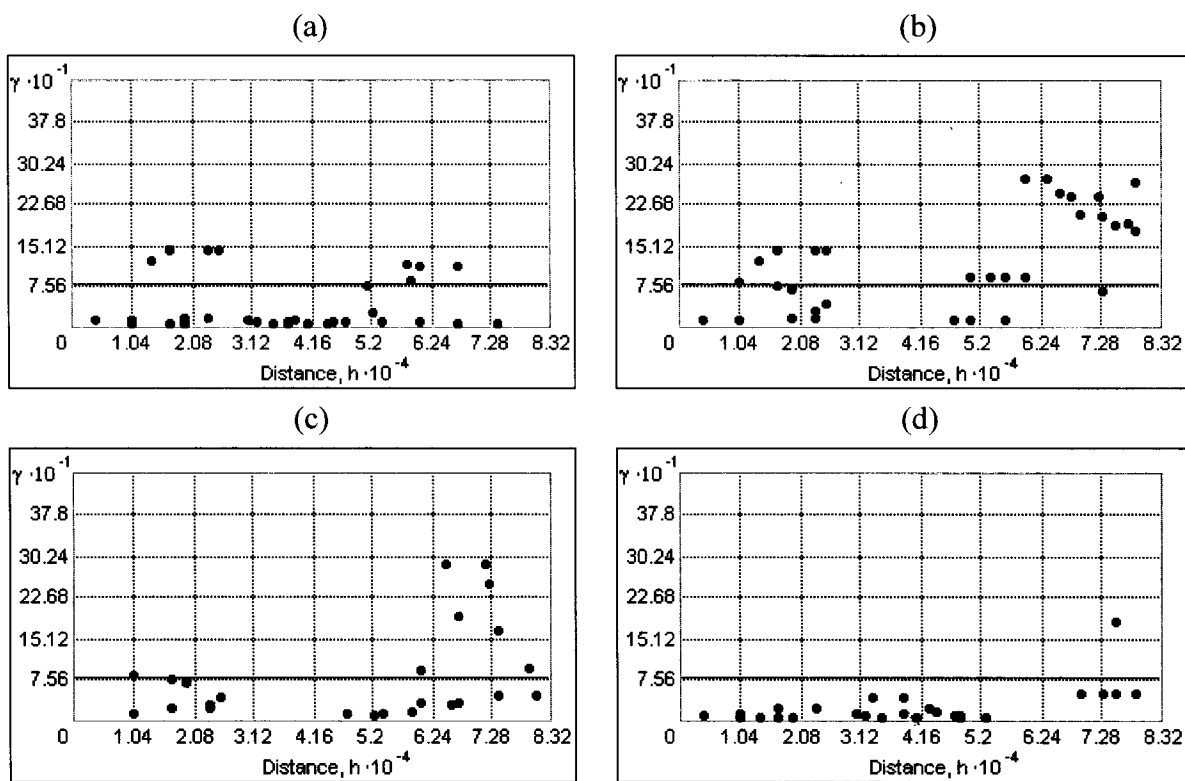
**Figura 28.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia mensuales durante temporada de primavera. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.





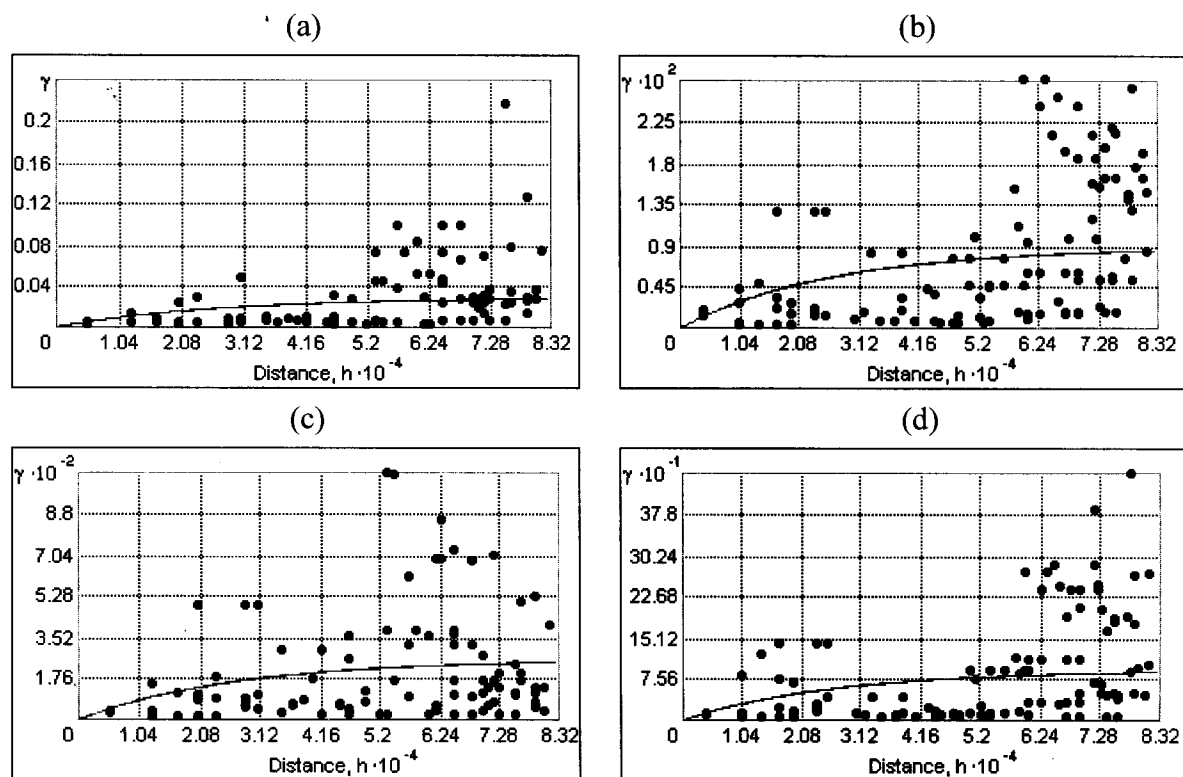


**Figura 29.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia mensuales durante temporada de verano. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.



**Figura 30.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia mensuales durante temporada de otoño. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.

Los modelos teóricos producto del ajuste de mínimos cuadrados de los semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos, correspondientes a las series de valores promedio de  $ET_0$  mensuales de las diferentes temporadas, calculados con base en los mismos criterios de lag y lag size utilizados para calcular los semivariogramas direccionales, se presentan en la Figura 31.



**Figura 31.** Modelos teóricos para semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de series de valores promedio de Evapotranspiración Cultivo de Referencia mensuales por temporada. (a) invierno, (b) primavera, (c) verano, (d) otoño.

Los parámetros de los modelos teóricos y las configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes a dichos modelos, ambos seleccionados con base en los resultados de la validación cruzada, se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Parámetros de modelos teóricos de predicción de valores de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia y configuración de vecindades de búsqueda.

Parámetros	Modelo teórico ET <sub>o</sub>			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>Modelo básico ajust.</b>	Exponencial	Exponencial	Exponencial	Exponencial
<b>Rango mayor (m)</b>	82253.7	81864.3	82253.7	81864.3
<b>Rango menor (m)</b>	79433.7	79591.3	79318	79485
<b>Meseta parcial</b>	0.029205	0.0088802	256.76	92.189
<b>Efecto pepita</b>	0	0	0	0
<b>Dirección máx. cont.</b>	342.0°	338.2°	337.0°	334.0
<b>Lag size (m)</b>	8287.76	6906.47	8287.76	6906.47
<b>N°. de lags</b>	10	12	10	12

Transformación a escala logaritmo natural.

Configuración vecindad	Modelo teórico ET <sub>o</sub>			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>N° máximo puntos</b>	2	2	2	5
<b>N° mínimo puntos</b>	2	2	2	2
<b>N° sectores</b>	4**	4	4**	4

Transformación a escala logaritmo natural.

\*\* Con offset de 45°

En la Tabla 21 se presentan los errores de predicción producto de la validación cruzada de los conjuntos de modelos teóricos para los semivariogramas experimentales de las series de valores promedio de ET<sub>o</sub> mensuales por temporada y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes que fueron seleccionados para llevar a cabo las interpolaciones en puntos no muestreados en la zona de influencia de Hualahuises y Linares.

**Tabla 21.** Errores de predicción de los conjuntos de modelos teóricos para semivariogramas experimentales de series de valores muestrales de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes.

Modelo teórico ET <sub>o</sub>	Error Medio (Mean)	Error Medio Cuadrado (RMS)	Error Estándar Promedio (ASE)	Error Medio Estandarizado (MS)	Error Medio Cuadrado Estandarizado (RMSS)
Invierno*	-1.374	12.37	12.08	-0.07366	0.9274
Primavera*	-1.396	10.71	11.24	-0.08342	0.9047
Verano	0.7405	13.83	13.44	0.03883	0.9731
Otoño	-0.6623	7.904	8.005	-0.04492	0.9389

Transformación a escala logaritmo natural (ln).

Las varianzas de los valores de RMSS de los conjuntos de modelos teóricos de predicción de valores de ET<sub>o</sub> mensuales de las diferentes temporadas y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes, que fueron analizados, se presentan en la Tabla 22. Las varianzas obtenidas, sugirieron que las diferencias entre los resultados de las interpolaciones que serían generadas mediante los diferentes conjuntos, presentarían diferencias poco significativas entre sí debido a la cercanía de sus valores a cero.

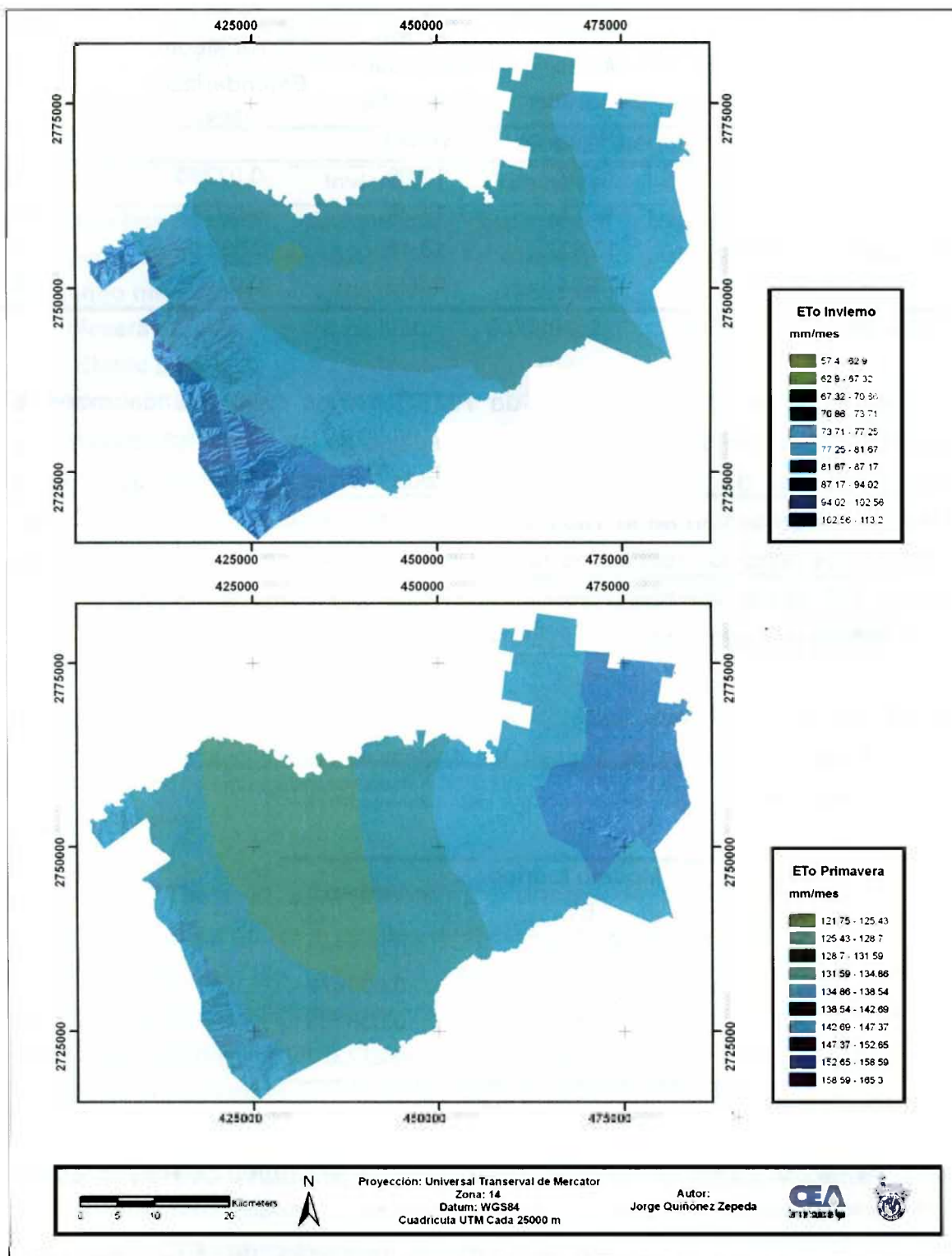
**Tabla 22.** Varianzas de valores de RMSS de modelos teóricos de predicción de valores de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia correspondientes a diferentes temporadas.

Modelo teórico ET <sub>o</sub>	Varianza
Invierno*	0.003863
Primavera*	0.000972
Verano	0.038139
Otoño	0.027317

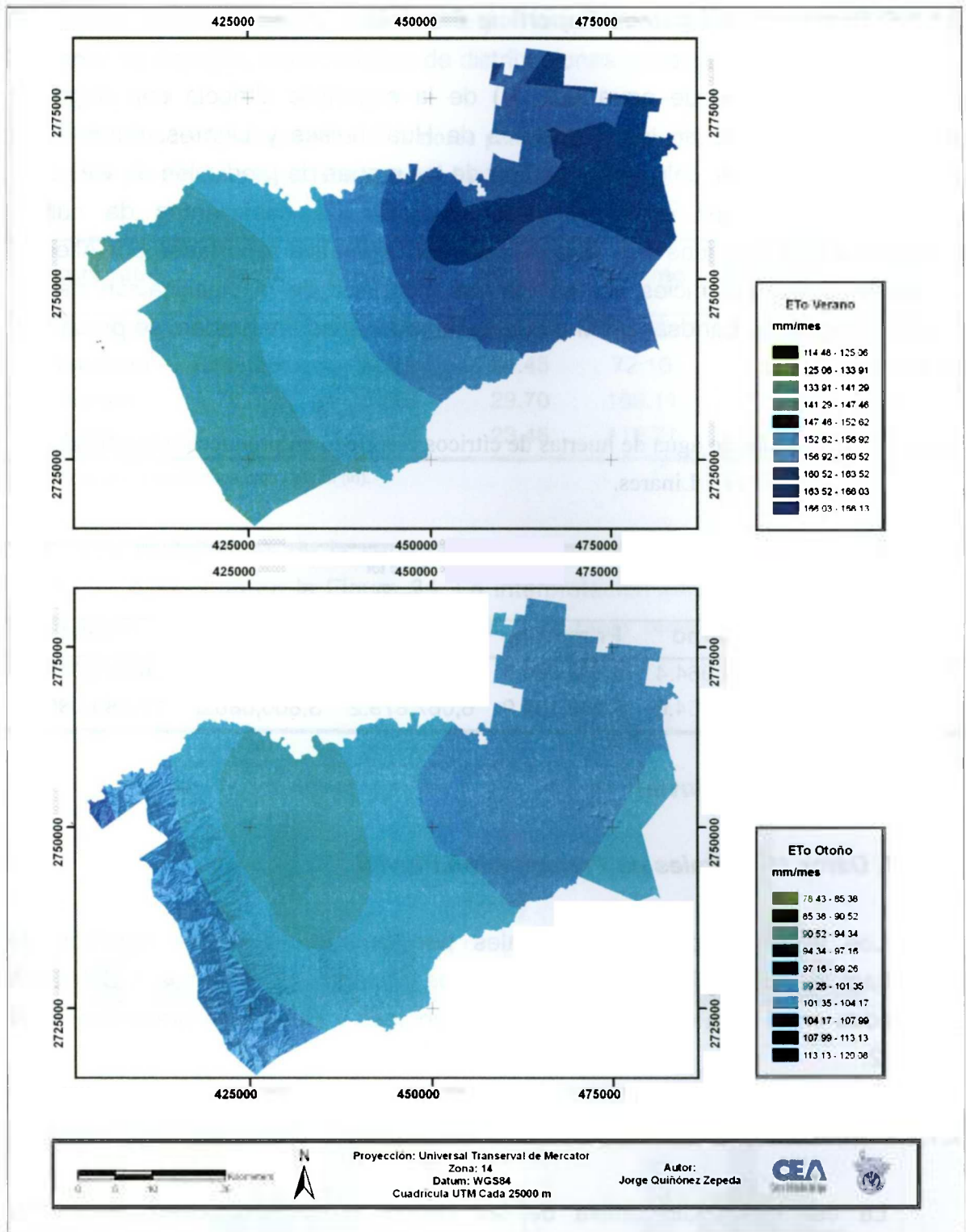
Transformación a escala logaritmo natural.

#### **2.1.1.4. Variación Espacial de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia**

La variación espacial de los valores promedio de ET<sub>o</sub> mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño en Hualahuises y Linares, determinada mediante Kriging Ordinario, se presentan en las Figuras 32 y 33.



**Figura 32.** Variación espacial de valores de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia durante las temporadas de invierno y primavera en Hualahuises y Linares.



**Figura 33.** Variación espacial de valores de Evapotranspiración de Cultivo de Referencia durante las temporadas de verano y otoño en Hualahuises y Linares.

**Figura 34.**

### 2.1.1.5. Demanda de Agua de Superficie Citrícola

Las demandas de agua ( $ET_{c\ tot}$ ) de la superficie citrícola con riego en producción localizada en los municipios de Hualahuises y Linares, durante las diferentes temporadas, calculados a partir de los mapas de predicción de variación espacial de  $ET_o$ , así como el valor promedio de coeficientes de cultivo correspondiente a cítricos con 70% de cubierta vegetativa reportados por Allen et al. (1998) y las superficies de las huertas extraídas de la clasificación de los subsets irregulares Landsat 5-TM con máscaras binarias integradas, se presentan en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Demandas de agua de huertas de cítricos con riego en producción localizadas en Hualahuises y Linares.

Municipio	$ET_{c\ tot}$ ( $m^3$ )				
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Total
Hualahuises	2,314,964.4	4,160,864.7	4,858,641.9	3,060,703.2	<b>14,395,174.20</b>
Linares	2,823,954.6	5,188,164.9	6,067,879.2	3,800,086.8	<b>17,880,085.50</b>

### 2.1.2. Precipitación Pluvial

#### 2.1.2.1. Datos Muestrales de Precipitación Pluvial

Los valores promedio mensuales por temporada de los registros de Precipitación Pluvial ( $P_{tot}$ ) de las estaciones meteorológicas de la CONAGUA localizadas en el área de influencia de Hualahuises y Linares se presentan en el Anexo 2.

#### 2.1.2.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Precipitación Pluvial

La estadística descriptiva de las series de valores promedio de  $P_{tot}$  mensuales correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño en la zona de influencia de Hualahuises y Linares se presentan en la Tabla 24. Los resultados obtenidos demostraron que la media y mediana de las series

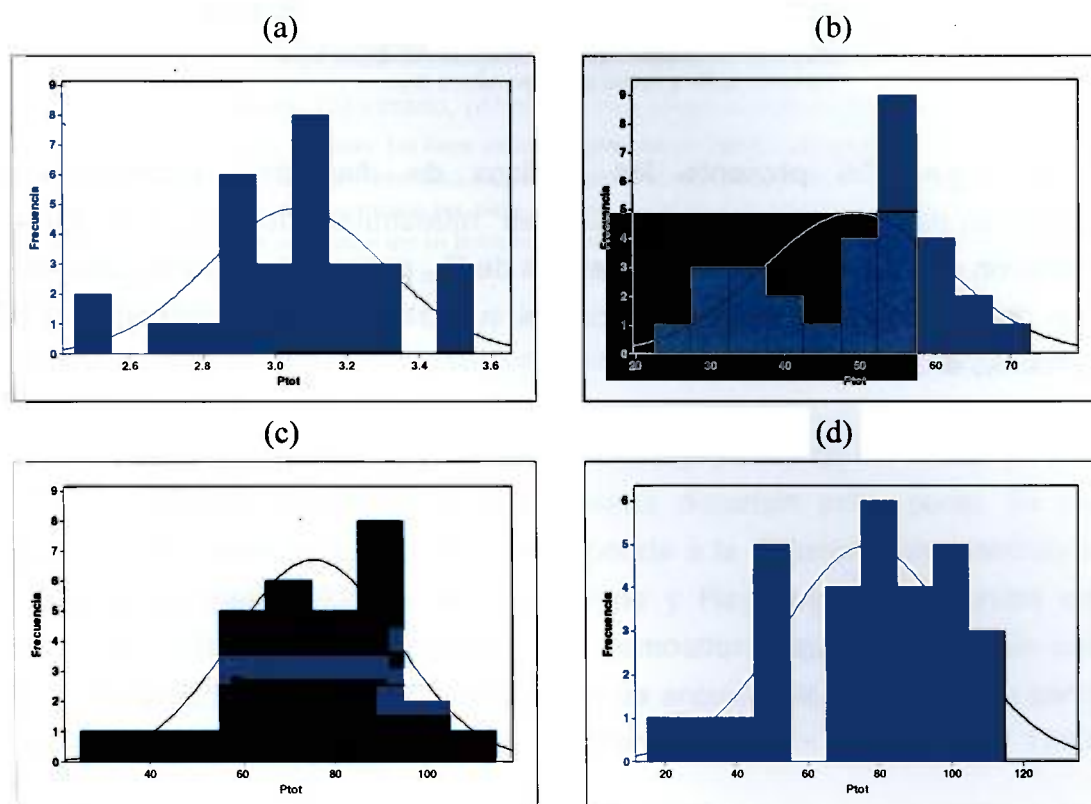
de valores promedio de  $P_{tot}$ , mensuales por temporada eran similares, lo cual es indicador de simetría, característico de distribuciones gaussianas o normales.

**Tabla 24.** Estadística descriptiva de valores promedio de precipitación pluvial mensuales por temporada en Hulahuises y Linares

Temporada	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Mediana	Coef. Asim.
Invierno	21.906	5.3221	12.280	33.00	21.480	-0.29039
Primavera	49.26	12.23	24.45	72.16	53.93	-0.47638
Verano	75.386	17.595	29.70	108.11	76.49	-0.48615
Otoño	77.129	24.274	23.46	112.71	78.76	-0.47768

Transformación a escala logaritmo natural (ln).

Los histogramas de la serie de valores promedio mensuales estacionales de  $P_{tot}$  se presentan en la Figura 34. La interpretación visual de los histogramas sugirió que en la mayoría de los casos, los datos presentaban distribuciones semejantes a una distribución normal.





**Figura 35.** Histogramas de frecuencia de series de valores promedio mensuales de precipitación pluvial de diferentes temporadas (a) In invierno, (b) primavera, (c) verano, (d) otoño.

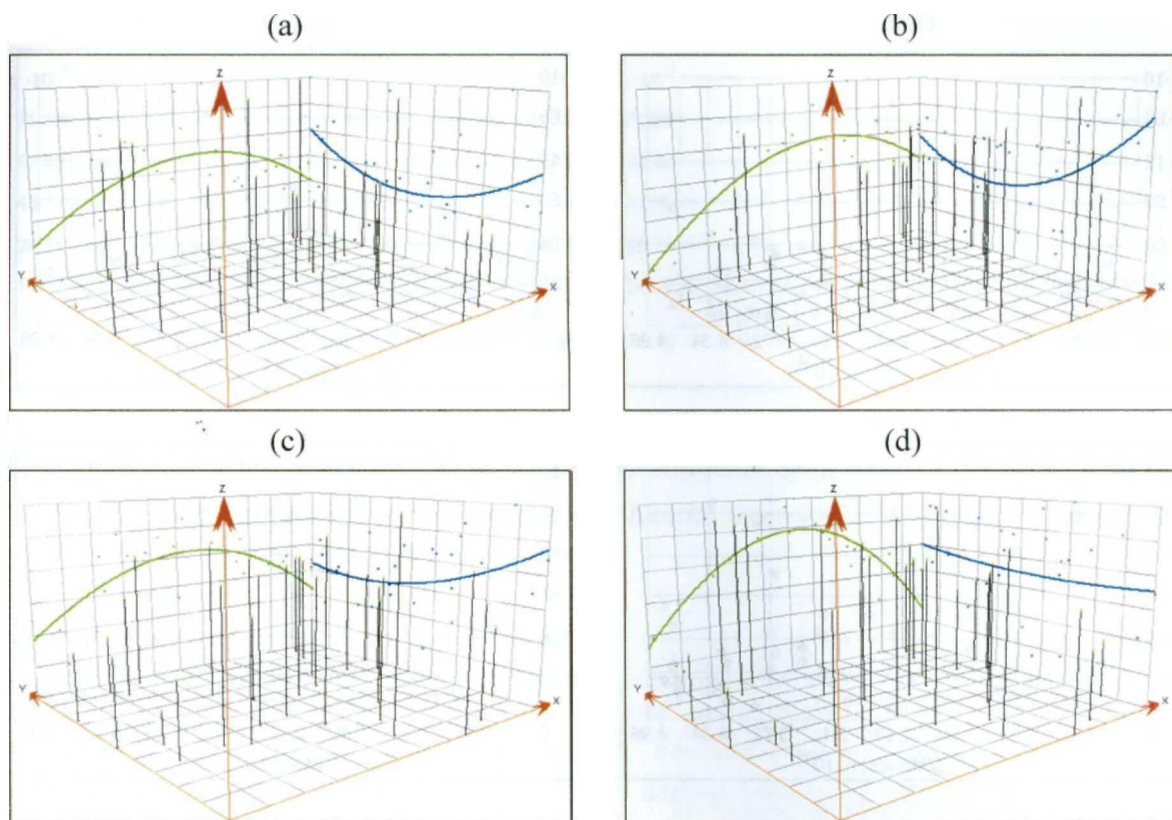
Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a la series de valores mensuales de  $P_{tot}$  correspondientes a las temporadas de invierno, primavera, verano y otoño se presentan en la Tabla 25. Con base en los estadísticos Anderson Darling (A-D) y Valores P obtenidos, se dio por aceptada la hipótesis nula que establece que los valores muestrales contaban con una distribución normal, salvo en el caso de la serie de valores muestrales correspondientes a la temporada de primavera.

**Tabla 25.** Resultados prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a series de valores estacionales de precipitación pluvial.

Temporada	A-D	Valor P
Invierno	0.291	0.585
Primavera	0.815	0.031
Verano	0.263	0.678
Otoño	0.443	0.283

Transformación a escala logaritmo natural (ln)

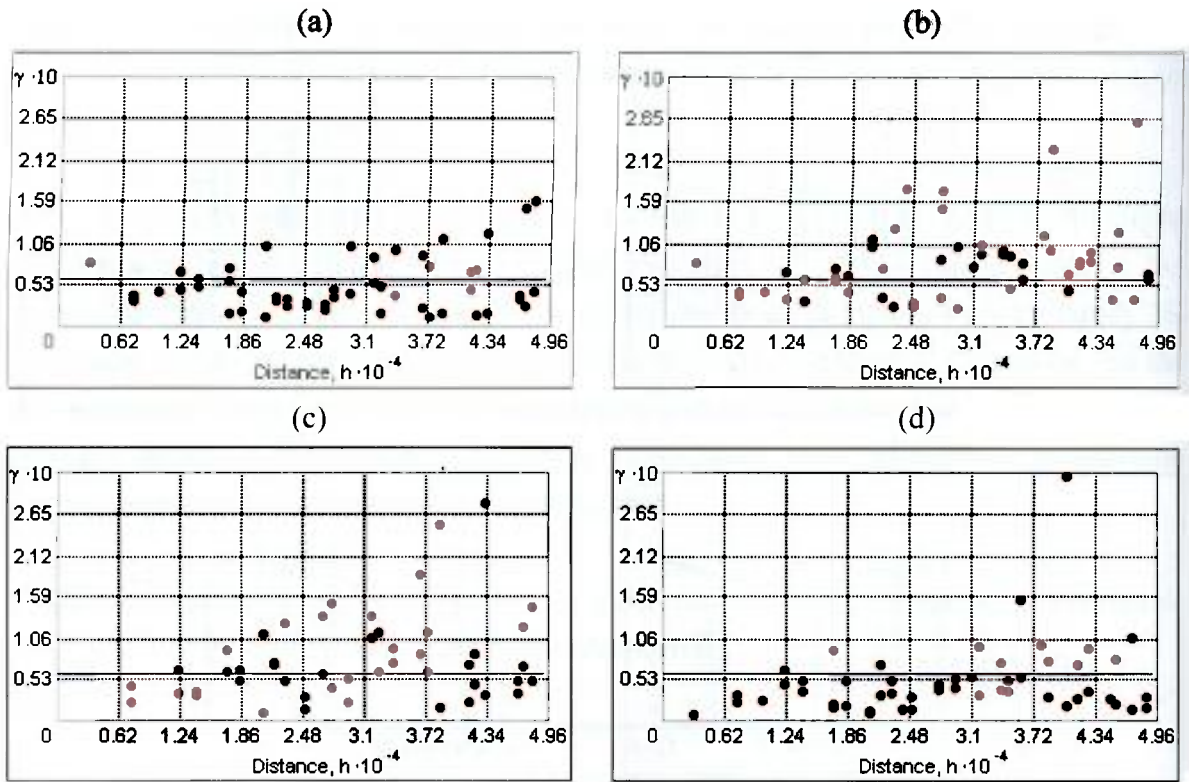
La Figura 35 presenta los gráficos de dispersión tridimensionales correspondientes a las series de valores muestrales de  $P_{tot}$ . Los gráficos demostraron que todas las series de valores de  $P_{tot}$  presentaban tendencias, por lo que se determinó que no cumplían con el supuesto de estacionariedad (ESRI, 2001; Isaaks & Srivastava, 1989).



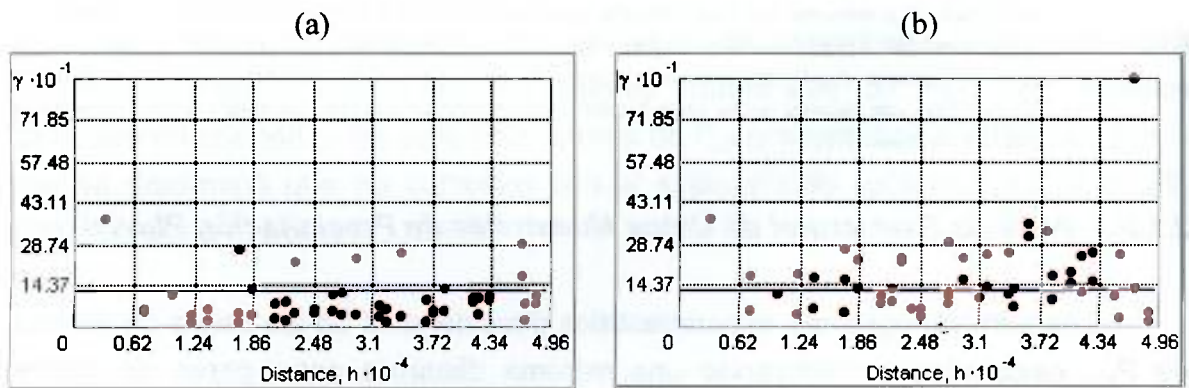
**Figura 36.** Diagramas de dispersión tridimensionales de series de valores muestrales de precipitación pluvial correspondientes a diferentes temporadas. (a) In invierno, (b) primavera, (c) verano, (d) otoño. Nota: El eje x corresponde al eje norte-sur, mientras que el eje y corresponde al eje este-oeste. Las líneas verticales representan los valores y ubicaciones de los puntos muestrales, los cuales se encuentran proyectados hacia dos planos perpendiculares, uno este-oeste y otro norte-sur. Las líneas de color verde corresponden al polinomio que mejor atraviesa los puntos proyectados, modelando la tendencia global en dirección este-oeste, mientras que las líneas de color azul representan un polinomio que modela la tendencia global en dirección norte-sur.

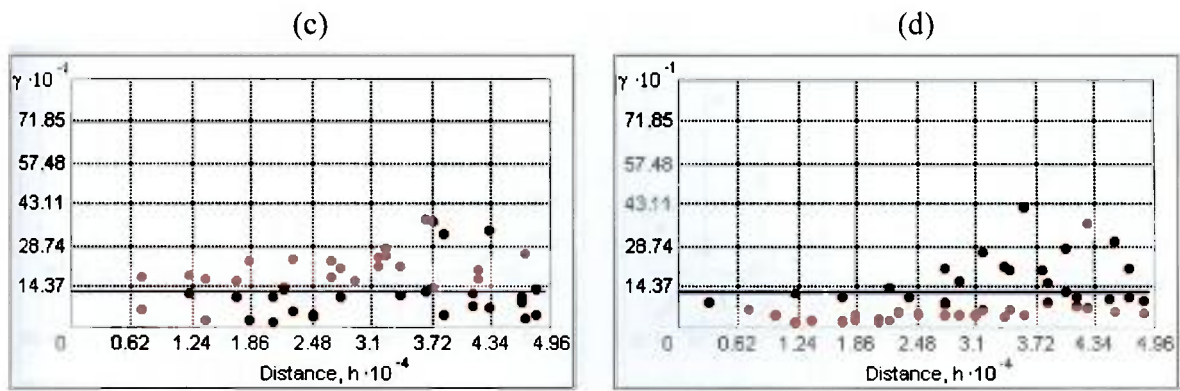
### 2.1.2.3. Análisis Estructural de Datos Muestrales de Precipitación Pluvial

Los semivariogramas experimentales direccionales de las series de valores de  $P_{tot}$ , calculados considerando una máxima distancia entre pares de puntos muestrales de aprox. 98,555 m que corresponde a la distancia comprendida entre las estaciones meteorológicas de Guadalupe y Rayones, se presentan en las Figuras 36 a 39. Dichos semivariogramas demostraron que las series de valores muestrales de  $ET_o$  presentaban condiciones de anisotropía, dado que los patrones de variabilidad espacial cambiaban con la dirección (Isaaks & Srivastava, 1989).

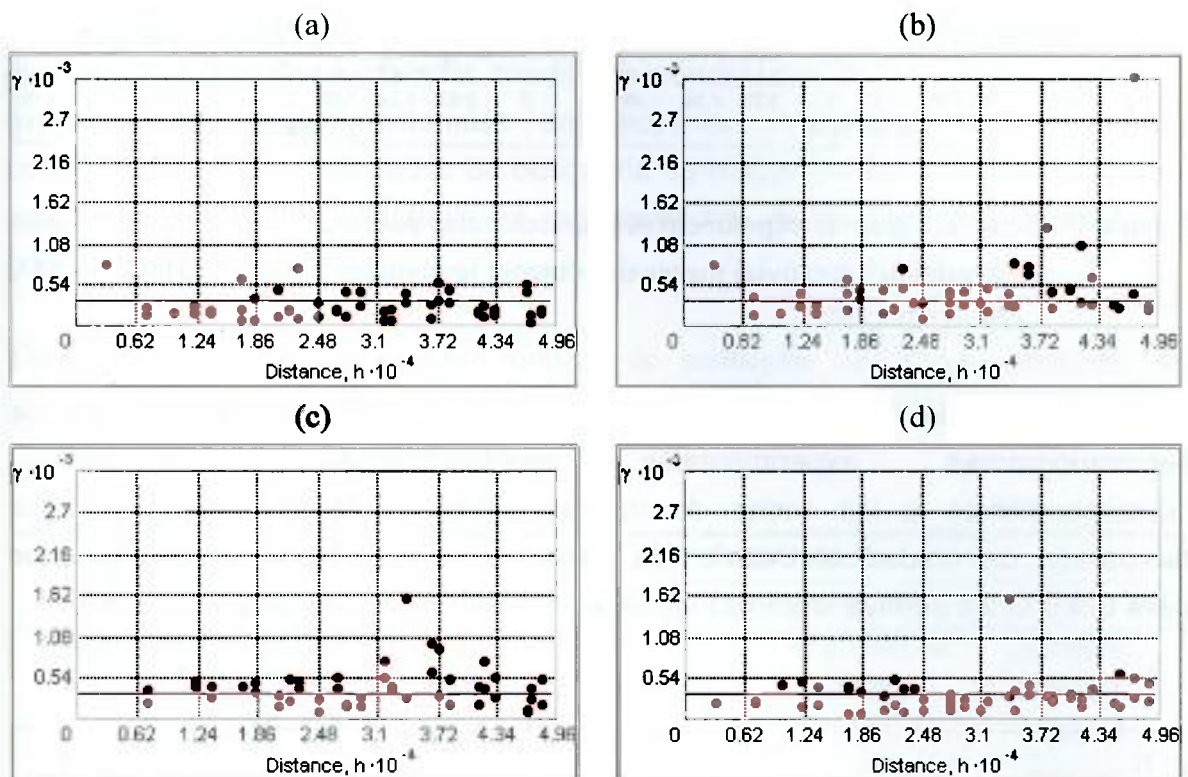


**Figura 37.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de precipitación pluvial mensuales durante temporada de invierno. (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$ , (d)  $135^\circ$ .



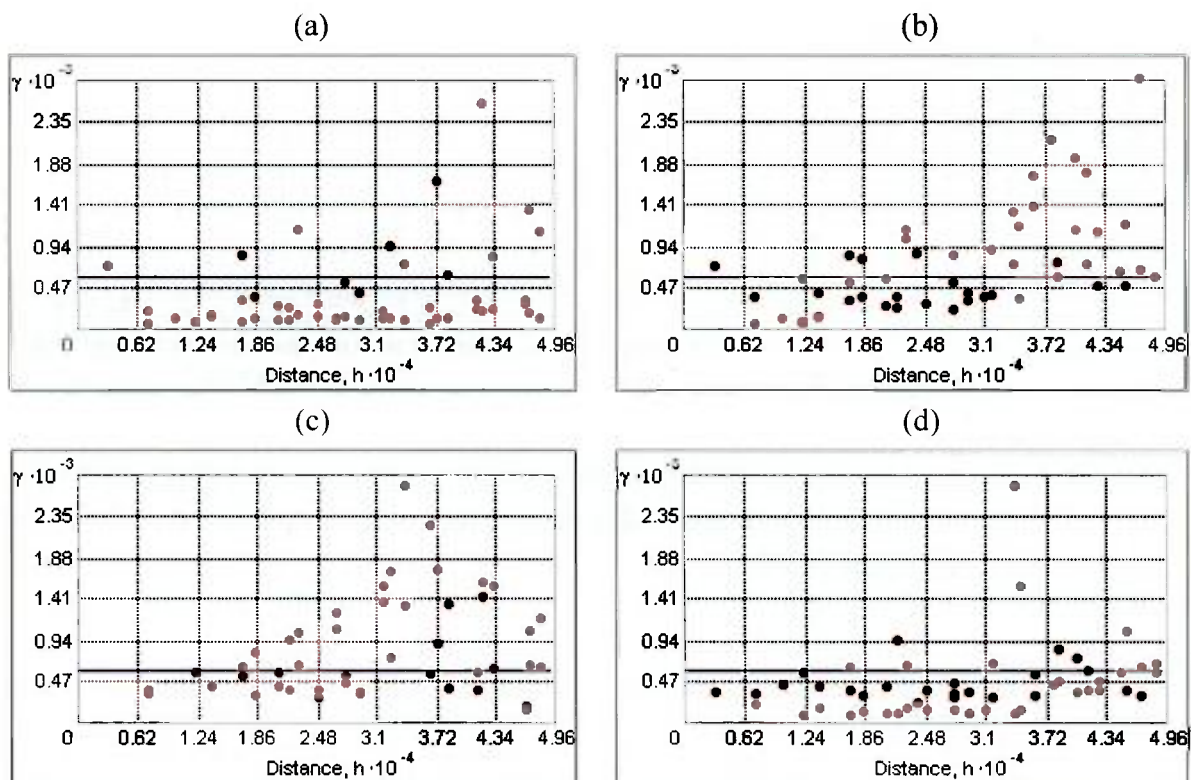


**Figura 38.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de precipitación pluvial mensuales durante temporada de primavera. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.



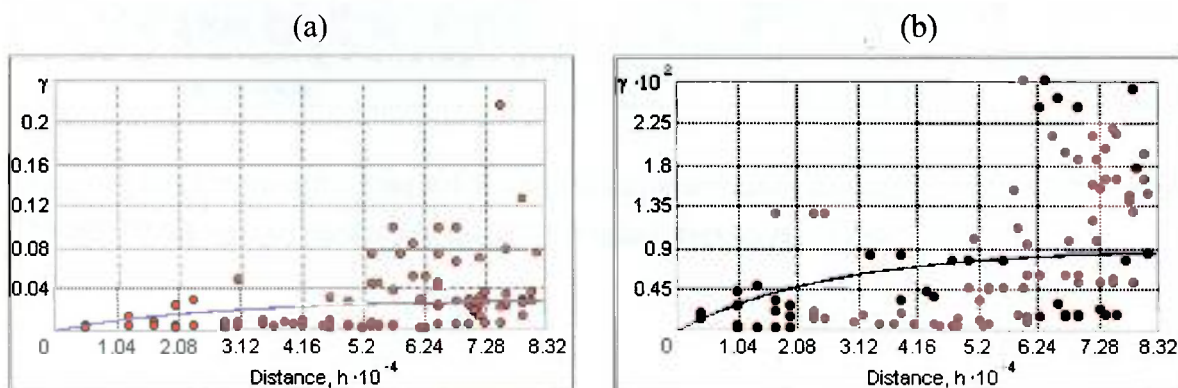
**Figura 39.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de precipitación pluvial mensuales durante temporada de verano. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.

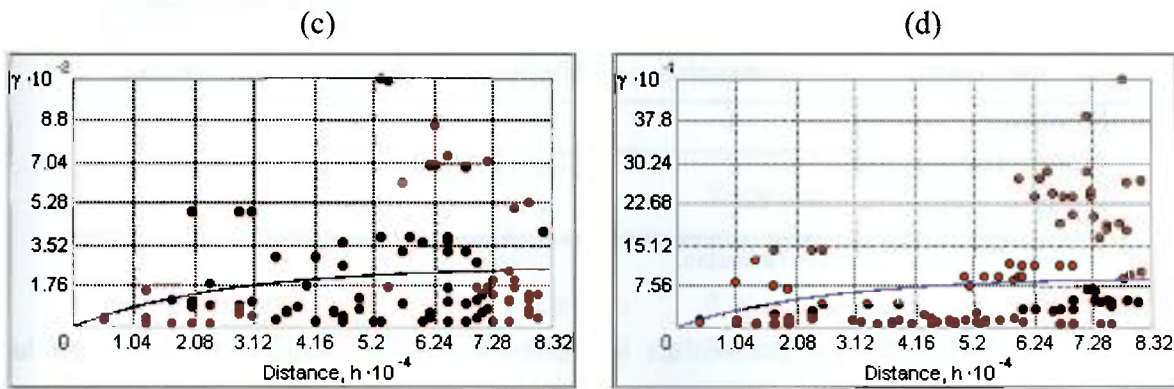




**Figura 40.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores promedio de precipitación pluvial mensuales durante temporada de otoño. (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$ , (d)  $135^\circ$ .

Los modelos teóricos producto del ajuste de mínimos cuadrados de los semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos, correspondientes a las series de valores promedio de  $P_{tot}$  mensuales por temporada, calculados con base en los mismos criterios de lag y las size utilizados para calcular los semivariogramas direccionales, se presentan en la Figura 40.





**Figura 41.** Modelos teóricos para semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de series de valores promedio de precipitación pluvial mensuales por temporada. (a) invierno, (b) primavera, (c) verano, (d) otoño.

Los parámetros de los modelos teóricos de predicción de valores de  $P_{tot}$ , producto del ajuste de mínimos cuadrados ponderados de los semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos a modelos básicos y lag configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes a dichos modelos, ambos seleccionados con base en los resultados de la validación cruzada, se presentan en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Parámetros de modelos teóricos de predicción de valores promedio de precipitación pluvial mensuales por temporada y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes.

Parámetros	Modelo teórico $P_{tot}$			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
<b>Modelo básico ajust.</b>	Exponencial	Exponencial	Exponencial	J-Bessel
<b>Rango mayor</b>	47045.8	46932.4	46988.7	46865.7
<b>Rango menor</b>	34491.9	26386.4	30436.7	46862.8
<b>Meseta parcial</b>	0.070331	104.78	225.72	349.14
<b>Efecto pepita</b>	0	31.73	130.37	257.05
<b>Dirección máx. cont.</b>	331.2°	334.9°	347.0°	9.0°
<b>Lag size</b>	4927.75	4927.75	4927.75	4927.75
<b>N°. de Lags</b>	10	10	10	10

Transformación a escala logaritmo natural (ln).

Configuración de vecindad	Modelo teórico $P_{tot}$			
	Invierno*	Primavera	Verano	Otoño
N° máximo puntos	4	5	4	4
N° mínimo puntos	2	2	2	2
N° sectores	4	4	4	4

\*Transformación a escala logaritmo natural (ln).

En la Tabla 27 se presentan los errores de predicción producto de la validación cruzada de los conjuntos de modelos teóricos para los semivariogramas experimentales de las series de valores promedio de  $P_{tot}$  mensuales por temporada y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes que fueron seleccionados para llevar a cabo las interpolaciones en puntos no muestreados en la zona de influencia de Hualahuises y Linares.

**Tabla 27.** Errores de predicción de los conjuntos de modelos teóricos para semivariogramas experimentales de series de valores de precipitación pluvial mensuales por temporada y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes.

Modelo teórico Et <sub>o</sub>	Error Medio (Mean)	Error Medio Cuadrado (RMS)	Error Estándar Promedio (ASE)	Error Medio Estandarizado (MS)	Error Medio Cuadrado Estandarizado (RMSS)
Invierno*	0.2019	4.8	4.935	0.03002	0.9399
Primavera*	0.102	8.342	10.74	0.01676	0.7989
Verano	0.113	13.74	17.73	0.007976	0.7976
Otoño	1.014	15.3	20.92	0.03436	0.7527

\*Transformación a escala logaritmo natural (ln).

Las varianzas de los valores de RMSS de los conjuntos de modelos teóricos de predicción de valores de  $P_{tot}$  y configuraciones de vecindades de búsqueda analizados se presentan en la Tabla 28. Las varianzas obtenidas sugirieron que las diferencias entre los resultados de las interpolaciones que serían generadas mediante los diferentes conjuntos, presentarían diferencias poco significativas entre sí debido a la cercanía de sus valores a cero.

**Tabla 28.** Varianzas de valores de RMMS de modelos teóricos de predicción de valores promedio de precipitación pluvial mensuales por temporada.

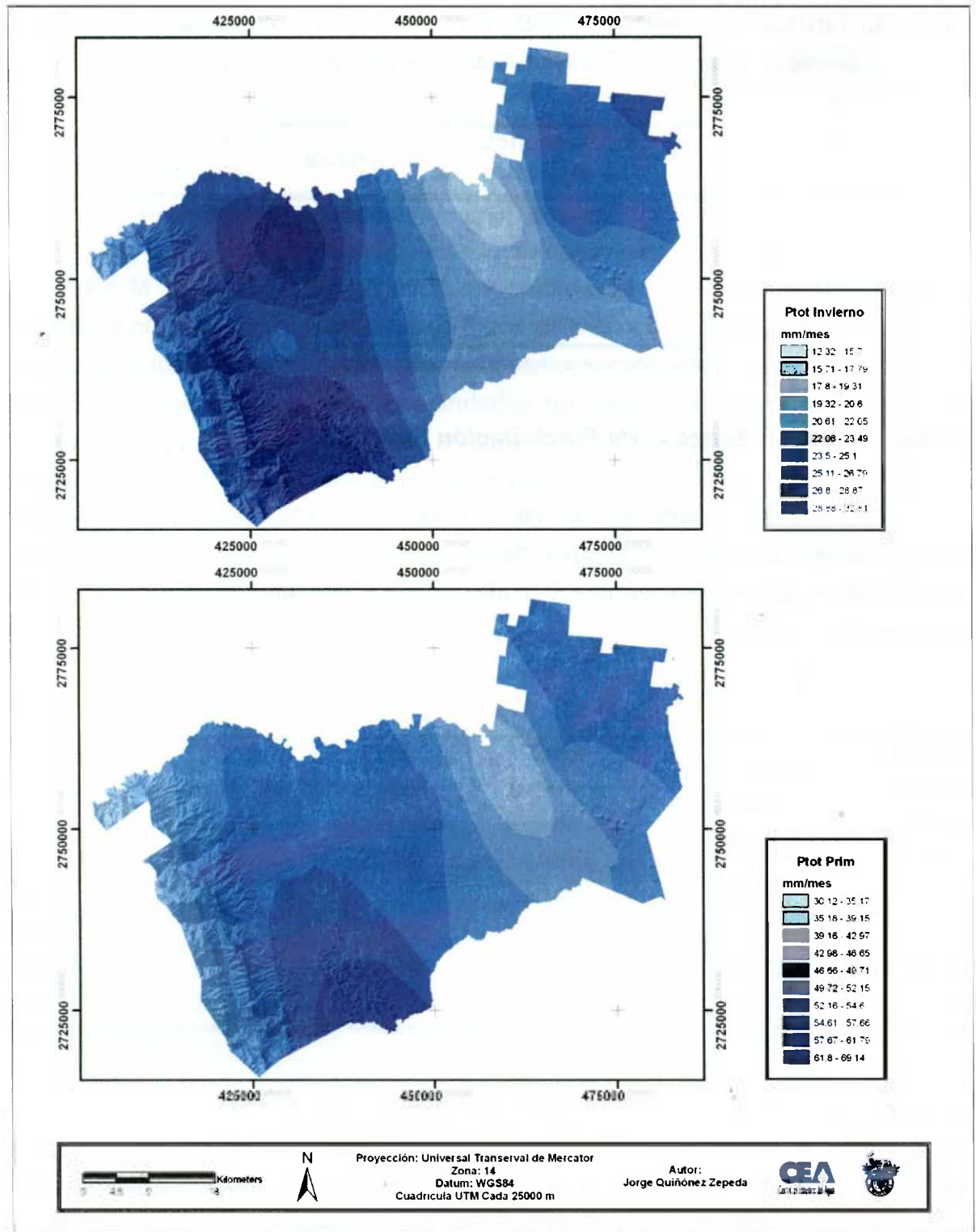
<b>Modelo teórico</b>	<b>Varianza</b>
$P_{tot}$	
Invierno	0.004776
Primavera	0.001274
Verano	0.001761
Otoño	0.000283

Transformación a escala logaritmo natural (ln).

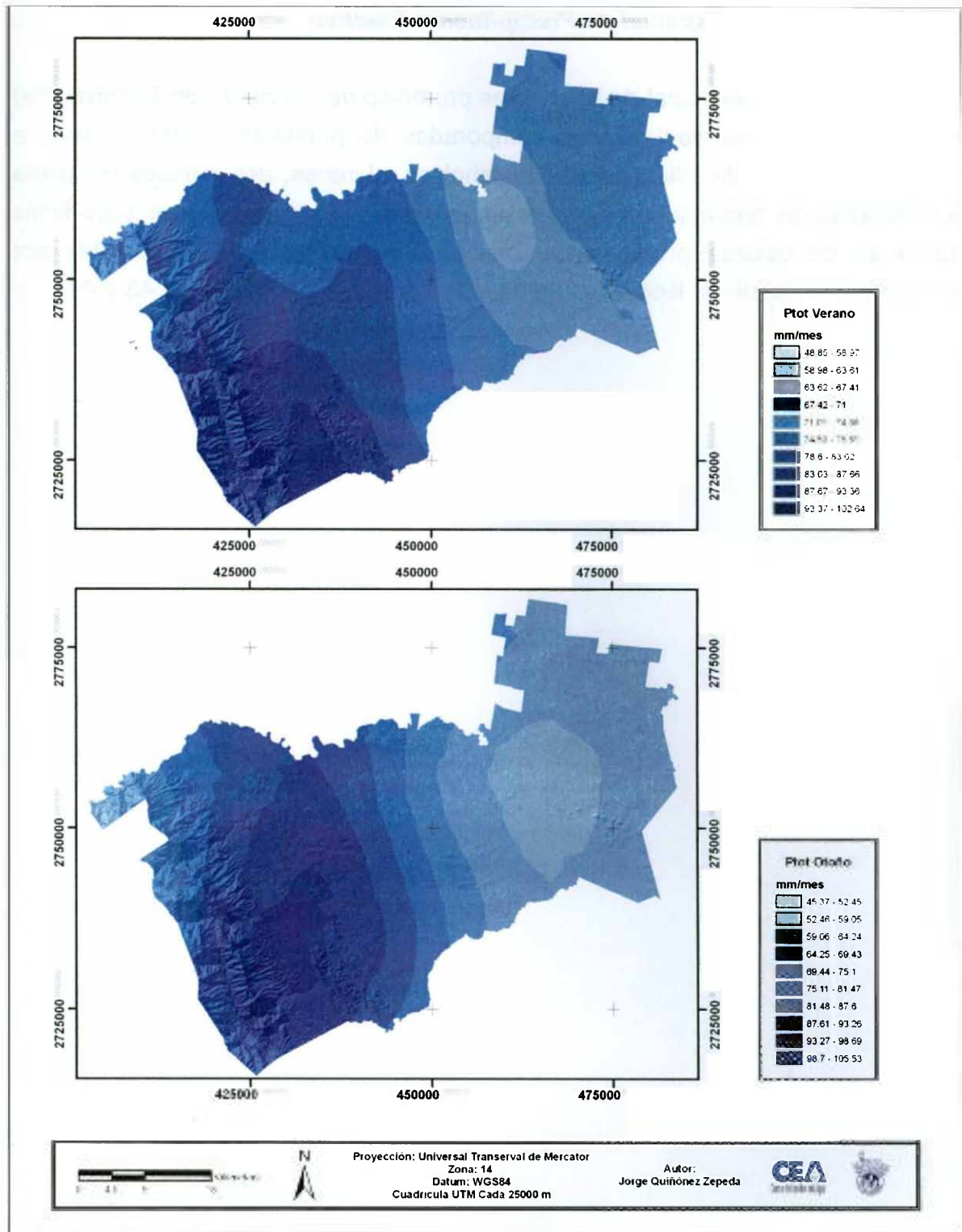
#### **2.1.2.4. Variación Espacial de Precipitación Pluvial**

La variación espacial de los valores promedio de  $P_{tot}$  mensuales correspondientes a las temporadas de primavera, verano, otoño e invierno en Hualahuises y Linares, determinada mediante Kriging Ordinario se presentan en las Figuras 41 y 42.





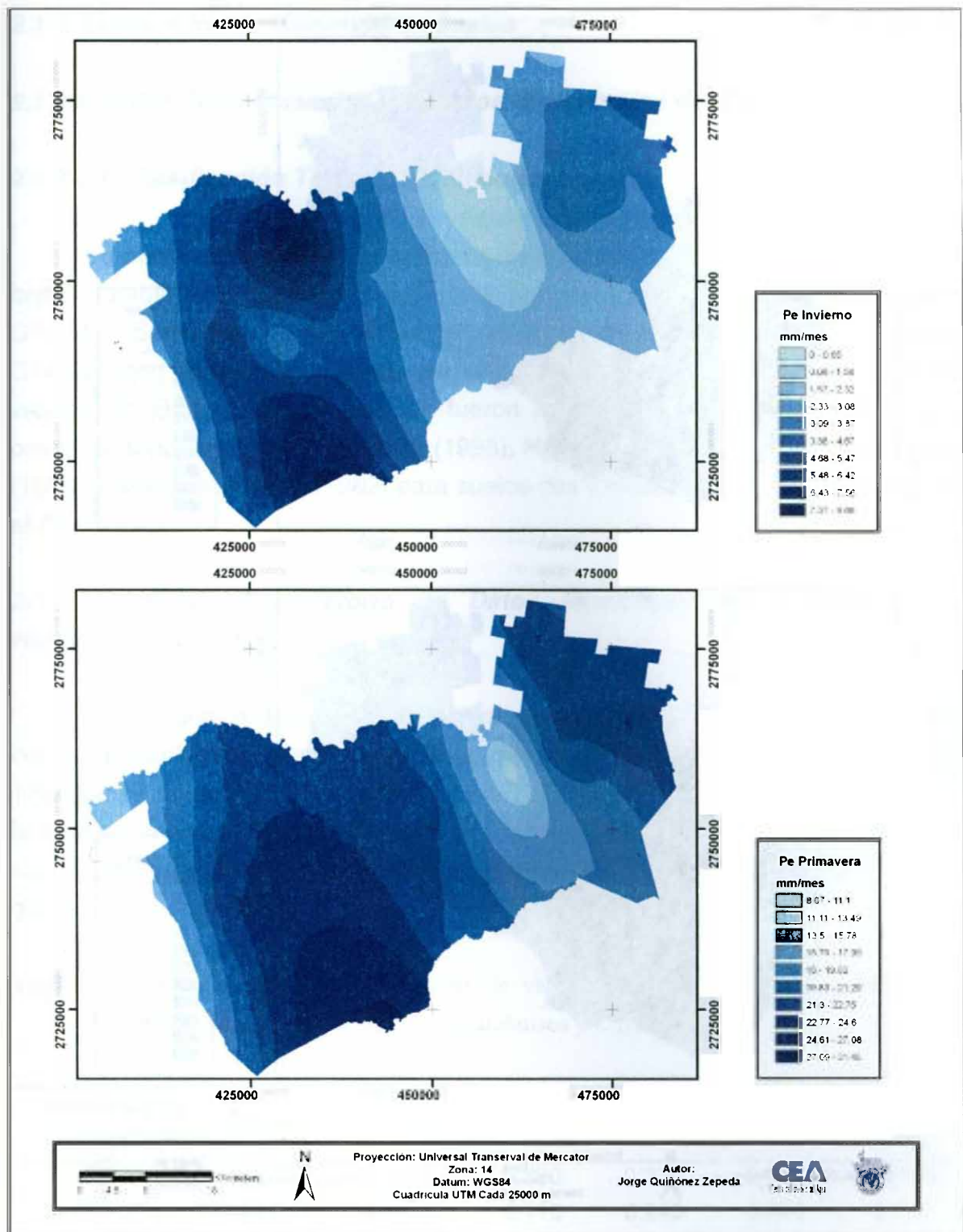
**Figura 42.** Variación espacial de valores promedio de precipitación pluvial mensuales correspondientes a temporada de invierno y primavera en Hualahuises y Linares.



**Figura 43.** Variación espacial de valores promedio de precipitación pluvial mensuales correspondientes a temporada de verano y otoño en Hualahuises y Linares.

#### **2.1.2.4.1. Variación Espacial de Precipitación Efectiva**

La variación espacial de los valores promedio de Precipitación Efectiva ( $P_e$ ) mensuales correspondientes a las temporadas de primavera, verano, otoño e invierno en el área de influencia de Hualahuises y Linares, determinada mediante la aplicación de operaciones booleanas de álgebra de mapas a las superficies continuas de valores promedio de precipitación pluvial ( $P_{tot}$ ) mensuales por temporada, producto de Kriging Ordinario, se presentan en la Figura 43 y 44.



**Figura 44.** Variación espacial de valores promedio mensuales de precipitación efectiva correspondientes a temporada de invierno y primavera en Hualahuises y Linares.



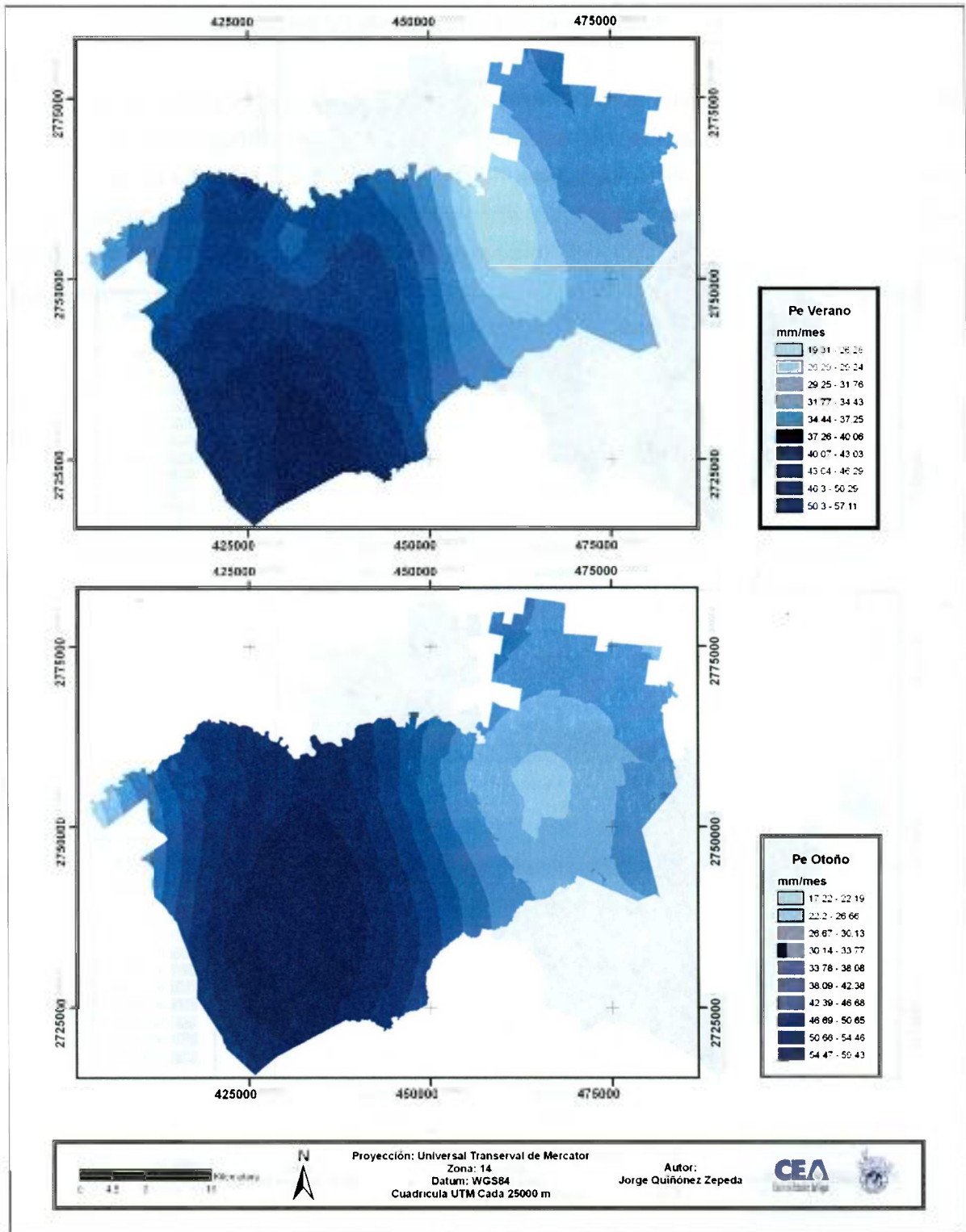


Figura 45. Variación espacial de valores promedio mensuales de precipitación efectiva correspondientes a temporada de verano y otoño en Hualahuises y Linares.

### 2.1.3. Contenidos de Humedad de Suelos

#### 2.1.3.1. Datos Muestrales de Contenidos de Humedad de Suelos

##### 2.1.3.1.1. Clasificación Textural de Suelos

La clasificación de las texturas de suelos de los puntos de control de las cartas edafológicas del INEGI escala 1:50,000, correspondientes a Montemorelos G14C47, San José de las Flores G14C48, Hualahuises G14C57 y Linares G14C58, con base en el triángulo textural de la USDA-SCS (1991), así como los valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  que les fueron asignados con base en los rangos promedio reportados por Allen et al. (1998), Hansen et al. (1979), citado en James (1988) y Brakensiek et al. (1982) para suelos con dichas texturas, se presentan en el Anexo 3.

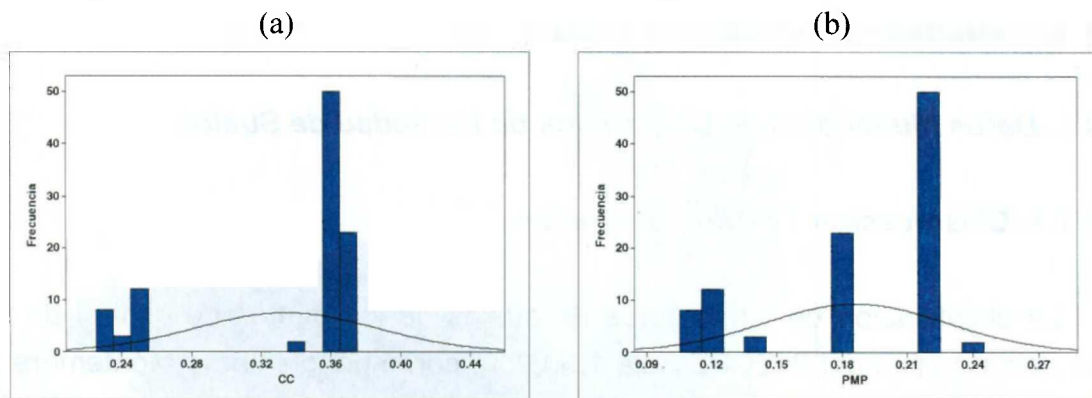
##### 2.1.3.2. Análisis Exploratorio de Datos Muestrales de Contenidos de Humedad de Suelos

La estadística descriptiva de los valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  de los puntos de control de suelos en Hualahuises y Linares de las cartas edafológicas INEGI escala 1:50,000 se presentan en la Tabla 29. Los resultados obtenidos demostraron que la media y mediana de las series de valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  eran similares, lo cual constituye un indicador de simetría, característico de distribuciones gaussianas o normales.

**Tabla 29.** Estadística descriptiva de series de valores muestrales de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  de suelo en área de influencia de Hualahuises y Linares.

Contenido de humedad	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Mediana	Coef. Asim.
$\Theta_{CC}$	0.334	0.0519	0.230	0.370	0.360	-1.2503
$\Theta_{PMP}$	0.186	0.0420	0.110	0.240	0.220	-0.726

Los histogramas de las series de valores de contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares se presentan en la Figura 45.



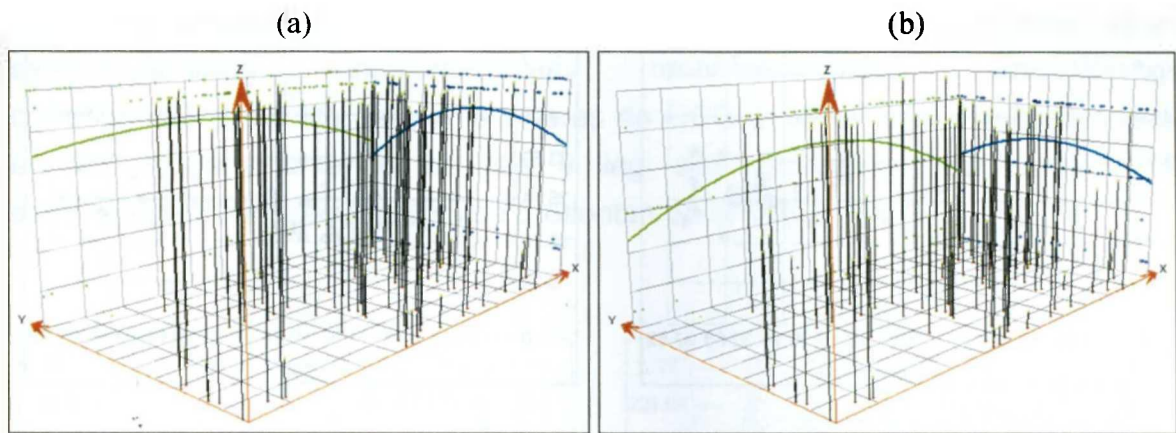
**Figura 46.** Histogramas de series de valores muestrales de contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares. (a)  $\Theta_{CC}$ , (b)  $\Theta_{PMP}$ .

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a los valores muestrales de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  se presentan en la Tabla 30. Con base en los estadísticos Anderson Darling (A-D) y Valores P obtenidos, se rechazó la hipótesis nula que establece que los valores muestrales contaban con una distribución normal.

**Tabla 30.** Resultados prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling aplicadas a valores muestrales de contenido de humedad de suelos.

Contenido de humedad	A-D	Valor P
$\Theta_{CC}$	18.634	<0.005
$\Theta_{PMP}$	9.646	<0.005

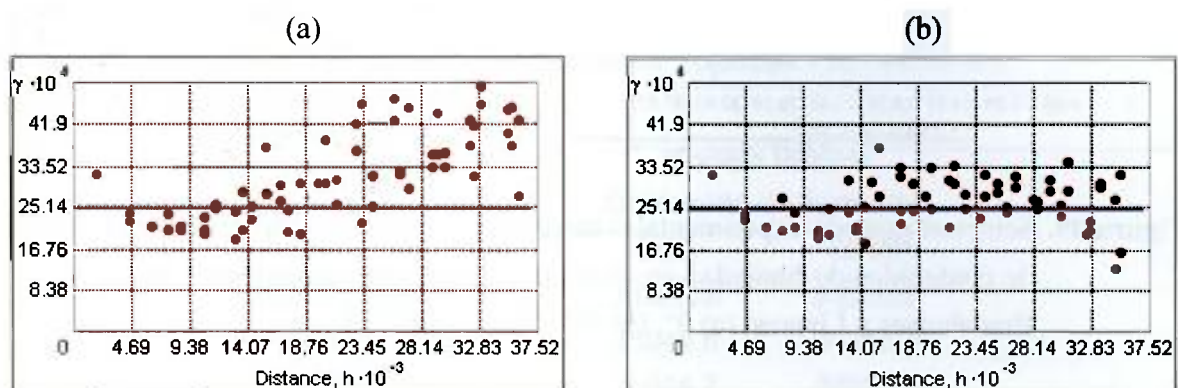
La Figura 46 presenta los gráficos de dispersión tridimensionales correspondientes a las series de valores muestrales de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$ . Los gráficos demostraron que las series de valores muestrales presentaban tendencias, por lo que se determinó que no cumplían con el supuesto de estacionariedad (Isaaks & Srivastava, 1989).



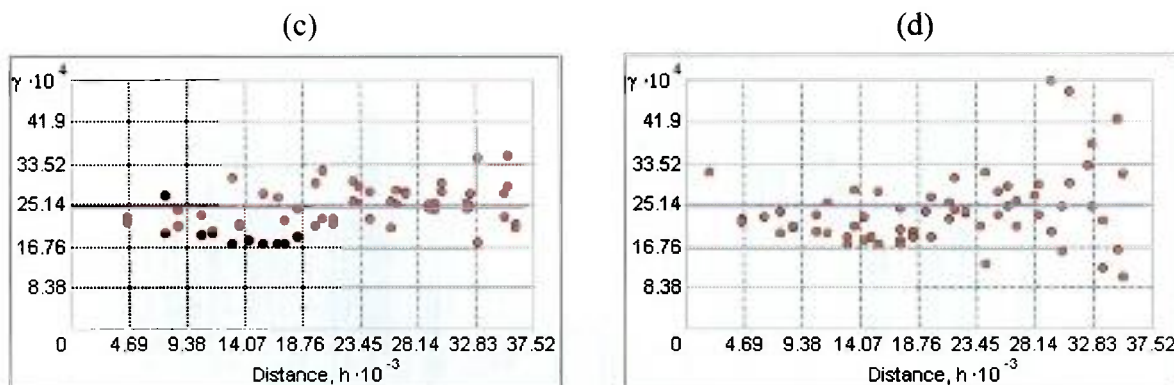
**Figura 47.** Diagramas de dispersión tridimensionales de series de valores de contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares. (a)  $\Theta_{CC}$ , (b)  $\Theta_{PMP}$ . Nota: El eje x corresponde al eje norte-sur, mientras que el eje y corresponde al eje este-oeste. Las líneas verticales representan los valores y ubicaciones de los puntos muestrales, los cuales se encuentran proyectados hacia dos planos perpendiculares, uno este-oeste y otro norte-sur. Las líneas de color verde corresponden al polinomio que mejor atraviesa los puntos proyectados, modelando la tendencia global en dirección este-oeste, mientras que las líneas de color azul representan un polinomio que modela la tendencia global en dirección norte-sur.

### 2.1.3.3. Análisis Estructural de Datos Muestrales de Contenidos de Humedad de Suelos

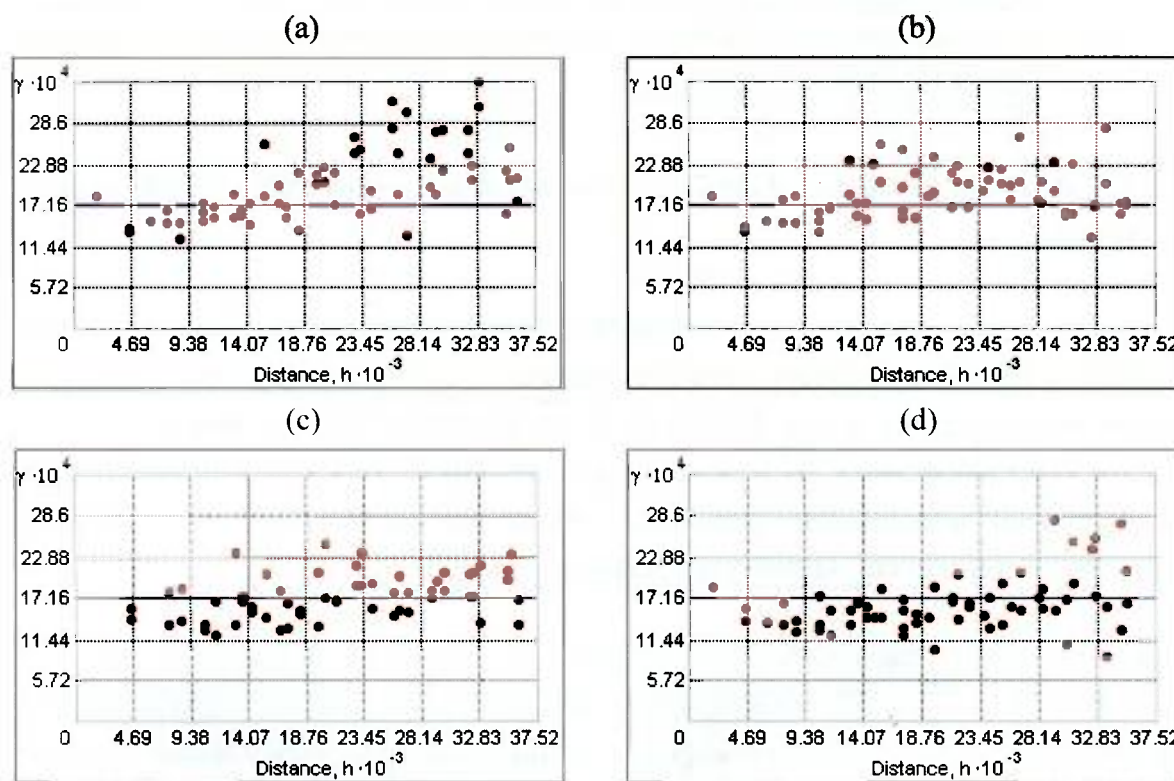
Los semivariogramas experimentales direccionales de las series de valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$ , calculados considerando una máxima distancia entre pares de puntos muestrales de aprox. 74,092.08 m, se presentan en las Figuras 47 y 48. Dichos semivariogramas demostraron que las series de valores muestrales de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  presentaban anisotropía, dado que los patrones de variabilidad espacial cambiaban con la dirección (Isaaks & Srivastava, 1989).





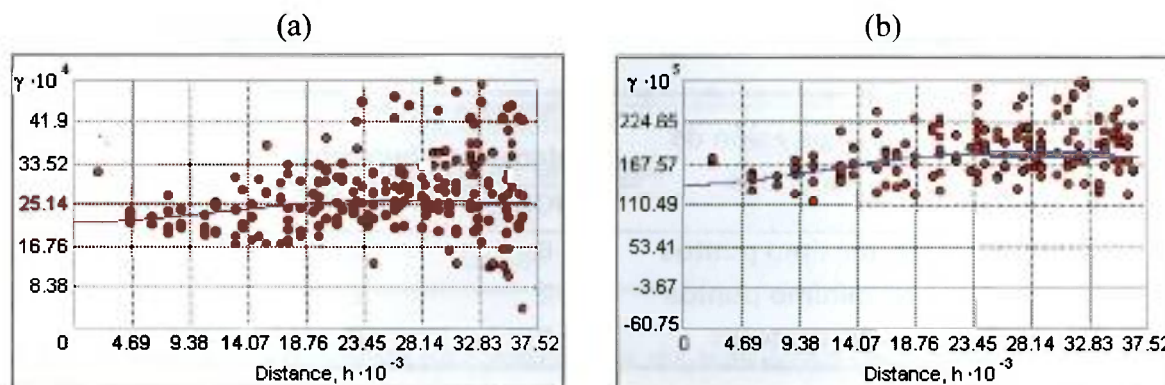


**Figura 48.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores muestrales de contenidos de humedad a capacidad de campo de suelos en Hualahuises y Linares. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.



**Figura 49.** Semivariogramas experimentales direccionales para serie de valores muestrales de contenidos de humedad en el punto de marchitez permanente de suelos en Hualahuises y Linares. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°.

Los modelos teóricos producto del ajuste de mínimos cuadrados de los semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos, correspondientes a las series de valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  (calculados con base en los mismos criterios de lag y lag size utilizados para calcular los semivariogramas direccionales) se presentan en la Figura 49.



**Figura 50.** Modelos teóricos para semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de series de valores muestrales de contenido de humedad de suelos en Hualahuises y Linares. (a)  $\Theta_{CC}$ , (b)  $\Theta_{PMP}$ .

Los parámetros de los modelos teóricos de predicción de valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$ , producto del ajuste de mínimos cuadrados ponderados de los semivariogramas experimentales omnidireccionales anisotrópicos de las series de valores muestrales y las configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes a dichos modelos, ambos seleccionados con base en los resultados de la validación cruzada, se presentan en la Tabla 31.

**Tabla 31.** Parámetros de modelos teóricos de predicción de valores de contenidos de humedad de suelos y configuraciones de vecindades de búsqueda.

Parámetros	Modelo teórico	
	Contenido de humedad	
	$\Theta_{CC}$	$\Theta_{PMP}$
<b>Modelo básico ajust.</b>	J-Bessel	J-Bessel
<b>Rango mayor</b>	35048.6	35236.4
<b>Rango menor</b>	35044.7	33690.8
<b>Meseta parcial</b>	0.0004155	0.00040498

Parámetros	Modelo teórico	
	Contenido de humedad	
	$\Theta_{CC}$	$\Theta_{PMP}$
Efecto pepita	0.0021424	0.0013822
Dirección máx. cont.	279.2°	311.2°
Lag size	3087.17	3704.6
N°. de Lags	12	10

Configuración de vecindad	Modelo teórico	
	Contenido de humedad	
	$\Theta_{CC}$	$\Theta_{PMP}$
N° máximo puntos	6	6
N° mínimo puntos	2	2
N° sectores	8	8

La Tabla 32 presenta los errores de predicción producto de la validación cruzada de los conjuntos de modelos teóricos para los semivariogramas experimentales de las series de valores de contenidos de humedad del suelo y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes que fueron seleccionados para las interpolaciones en puntos no muestreados en la zona de influencia de Hualahuises y Linares.

**Tabla 32.** Errores de predicción de los conjuntos de modelos teóricos para semivariogramas experimentales de series de valores muestrales de contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes.

Modelo teórico contenido de humedad	Error Medio (Mean)	Error Medio Cuadrado (RMS)	Error Estándar Promedio (ASE)	Error Medio Estandarizado (MS)	Error Medio Cuadrado Estandarizado (RMSS)
$\Theta_{CC}$	0.001155	0.05168	0.04838	0.0216	1.063
$\Theta_{PMP}$	0.001003	0.04161	0.03921	0.02275	1.055

Las varianzas de los valores de RMSS del conjunto de modelos teóricos de predicción de valores de  $\Theta_{CC}$  y  $\Theta_{PMP}$  y configuraciones de vecindades de búsqueda correspondientes, que fueron analizados se presentan en la Tabla 33.

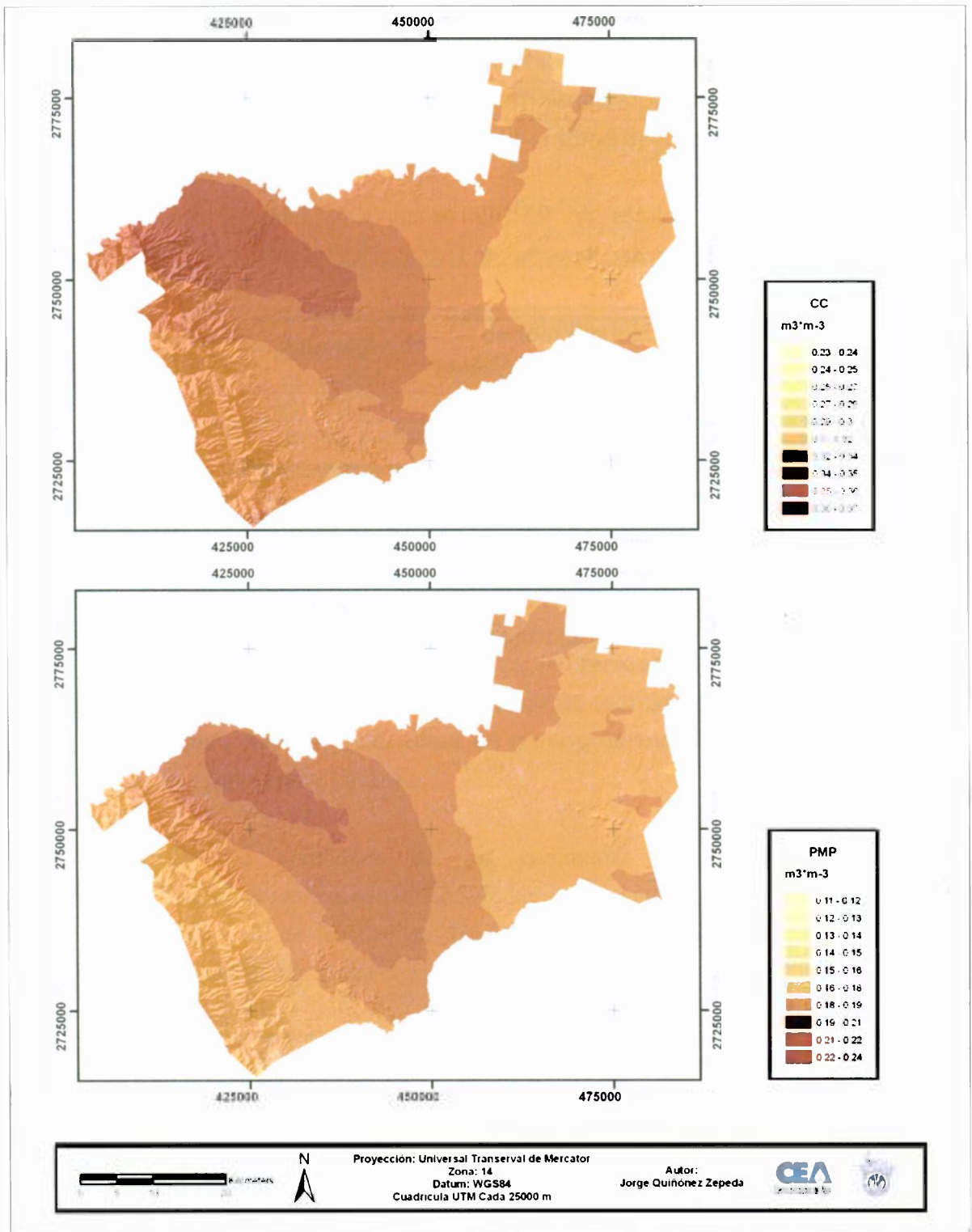
Las varianzas obtenidas sugirieron que las diferencias entre los resultados de las interpolaciones que serían generadas mediante los diferentes conjuntos de modelos teóricos y configuraciones de vecindades de búsqueda, presentarían diferencias poco significativas entre sí debido a la cercanía de sus valores a cero.

**Tabla 33.** Varianzas de valores de RMMS de modelos teóricos de predicción de contenidos de humedad de suelos en Hualahuises y Linares.

<b>Modelo teórico contenido de humedad</b>	<b>Varianza</b>
$\Theta_{CC}$	0.000125
$\Theta_{PMP}$	0.000138

#### ***2.1.3.4. Variación Espacial de Contenidos de Humedad de Suelos***

La variación espacial de los contenidos de humedad de los suelos en Hualahuises y Linares, determinada mediante Kriging Ordinario, se presentan en la Figura 50.



**Figura 51.** Variación espacial de contenidos de humedad de suelos en los municipios de Hualahuis y Linares. (a)  $\Theta_{CC}$ , (b)  $\Theta_{PMP}$ .

### 2.1.4. Consumo Mínimo de Agua de Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción

Los consumos brutos mínimos totales de agua de riego ( $R_{b \text{ tot}}$ ) de la superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares, calculados con base en los consumos netos totales ( $R_{n \text{ tot}}$ ), se presentan en la Tabla 34.

**Tabla 34.** Consumos netos y brutos totales de agua de riego de superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares.

(a)		
Temporada	$R_{n \text{ tot}}$ ( $m^3$ )	$R_{b \text{ tot}}$ ( $m^3$ )
Invierno	3,980,866	5,965,718
Primavera	5,094,560	7,687,366
Verano	5,053,230	7,648,064
Otoño	2,546,084	3,854,275
<b>Total</b>	<b>16,674,740</b>	<b>25,155,423</b>

(b)		
Temporada	$R_{n \text{ tot}}$ ( $m^3$ )	$R_{b \text{ tot}}$ ( $m^3$ )
Invierno	5,079,295	7,768,278
Primavera	6,413,196	9,807,060
Verano	6,370,150	9,742,365
Otoño	3,828,435	5,852,903
<b>Total</b>	<b>21,691,076</b>	<b>33,170,626</b>

## 2.2. Escenario Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades

### 2.2.1. Sub-Escenarios Riego Por Gravedad o Presurizado de Superficie Citrícola con Riego en Producción

Los resultados de los requerimientos brutos mínimos totales de agua de riego ( $R_{b \text{ tot}}$ ) de los sub-escenarios "Qué pasa si...?" que consideran riego de la

totalidad de la superficie citrícola con riego en producción mediante sistemas por gravedad o mediante sistemas presurizados (aspersión y microaspersión) se presentan en la Tabla 35.

**Tabla 35.** Requerimientos brutos mínimos totales de agua de riego de sub-escenarios de riego por gravedad o presurizado de superficie citrícola con riego en producción. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	Sub-escenario		
	Gravedad	Presurizado	
		Aspersión	Microasp.
	$R_{b\ tot}$ ( $m^3$ )	$R_{b\ tot}$ ( $m^3$ )	$R_{b\ tot}$ ( $m^3$ )
Invierno	6,634,776	5,103,674	4,423,184
Primavera	8,490,934	6,531,487	5,660,622
Verano	8,422,050	6,478,500	5,614,700
Otoño	4,243,474	3,264,211	2,737,725
<b>Total</b> ( $m^3/año$ )	<b>27,791,234</b>	<b>21,377,872</b>	<b>18,436,232</b>

(b)

Temporada	Sub-escenario		
	Gravedad	Presurizado	
		Aspersión	Microasp.
	$R_{b\ tot}$ ( $m^3$ )	$R_{b\ tot}$ ( $m^3$ )	$R_{b\ tot}$ ( $m^3$ )
Invierno	8,465,492	6,511,917	5,643,661
Primavera	10,688,661	8,222,046	7,125,773
Verano	10,616,916	8,166,859	7,077,944
Otoño	6,380,725	4,908,250	4,253,817
<b>Total</b> ( $m^3/año$ )	<b>36,151,794</b>	<b>27,809,072</b>	<b>24,101,196</b>

### **2.3. Escenario Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Hortalizas**

### **2.3.1. Sub-Escenarios Riego por Gravedad y/o Presurizado de Superficie Citrícola con Riego en Producción con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Hortalizas**

Los resultados de los requerimientos de agua de riego correspondientes a los sub-escenarios “*Qué pasa si...?*” que consideran riego por gravedad del 50% de las huertas de cítricos con riego en producción y las huertas restantes convertidas a tomate, melón y sandía se presentan en las Tablas 36 a 38.



**Tabla 36.** Requerimientos de agua de riego de sub-escenarios de riego por gravedad y/o presurizado de superficie citrícola con riego en producción considerando reconversión productiva del 50% de las huertas a tomate. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	ET <sub>c tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>n tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Sistema de riego					
			Gravedad	Aspersión	Microasp.	Gravedad/ Goteo <sup>*</sup>	Aspersión/ Goteo <sup>*</sup>	Microasp./ Goteo <sup>*</sup>
			R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )
Invierno	2,590,135	3,755,009	6,258,348	4,814,114	4,172,232	5,272,632	4,469,458	4,112,492
Primavera	4,655,278	5,087,946	8,479,910	6,523,008	5,653,274	7,051,419	6,023,536	5,566,698
Verano	5,435,877	5,129,438	8,549,064	6,576,203	5,699,376	7,083,146	6,063,644	5,610,533
Otoño	3,424,408	2,408,762	4,014,603	3,088,156	2,676,402	3,380,336	2,866,385	2,637,962
<b>Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>16,105,697</b>	<b>16,381,155</b>	<b>27,301,926</b>	<b>21,001,481</b>	<b>18,201,284</b>	<b>22,787,534</b>	<b>19,423,023</b>	<b>17,927,684</b>

Aplica solo para riego de las huertas de cítricos con riego en producción convertidas a tomate.

(b)

Temporada	ET <sub>c tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>n tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Sistema de riego					
			Gravedad	Aspersión	Microasp.	Gravedad/ Goteo <sup>*</sup>	Aspersión/ Goteo <sup>*</sup>	Microasp./ Goteo <sup>*</sup>
			R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )
Invierno	3,168,415	4,797,401	7,995,668	6,150,514	5,330,446	6,695,921	5,696,057	5,251,673
Primavera	5,822,248	6,420,751	10,701,252	8,231,732	7,134,168	8,841,842	7,581,589	7,021,477

Temporada	ET <sub>c tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>n tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Sistema de riego					
			Gravedad	Aspersión	Microasp.	Gravedad/ Goteo*	Aspersión/ Goteo*	Microasp./ Goteo*
			R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )
Verano	6,809,882	6,485,373	10,808,954	8,314,580	7,205,969	8,894,806	7,645,298	7,089,960
Otoño	4,264,341	3,665,591	6,109,318	4,699,776	4,072,879	5,092,086	4,343,819	4,011,257
<b>Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>20,064,887</b>	<b>21,369,116</b>	<b>35,615,193</b>	<b>27,396,602</b>	<b>23,743,462</b>	<b>29,524,655</b>	<b>25,266,763</b>	<b>23,374,367</b>

Aplica solo para riego de las huertas de cítricos con riego en producción convertidas a tomate.

**Tabla 37.** Requerimientos de agua de riego de sub-escenarios de riego por gravedad y/o presurizado de superficie citrícola con riego en producción considerando reconversión productiva del 50% de las huertas a melón. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	ET <sub>c tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>n tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Sistema de riego					
			Gravedad	Aspersión	Microasp.	Gravedad/ Goteo*	Aspersión/ Goteo*	Microasp./ Goteo*
			R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )
Invierno	2,266,405	3,626,993	6,044,988	4,649,991	4,029,992	5104981	4,301,807	3,944,840
Primavera	4,073,615	4,701,997	7,836,662	6,028,202	5,224,442	6636421	5,608,537	5,151,700
Verano	4,756,777	4,646,052	7,743,420	5,956,477	5,162,280	6563375	5,543,874	5,090,762
Otoño	2,996,520	2,176,588	3,627,647	2,790,497	2,418,431	3130687	2,616,736	2,388,312
<b>Total</b>	<b>14,093,317</b>	<b>15,151,631</b>	<b>25,252,717</b>	<b>19,425,167</b>	<b>16,835,145</b>	<b>21,435,464</b>	<b>18,070,953</b>	<b>16,575,614</b>



			$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )
Invierno	2,379,710	3,607,213	6,012,022	4,624,632	4,008,015	5,113,712	4,310,537.7	3,953,572
Primavera	4,277,197	4,772,494	7,954,157	61,18,582	5,302,771	6,712,223	5,684,339.7	5,227,510
Verano	4,994,462	4,750,652	7,917,753	6,090,579	5,278,502	6,675,848	5,656,346.7	5,203,235
Otoño	3,146,281	2,193,263	3,655,439	2,811,876	2,436,959	3,148,618	2,634,666.0	2,406,244
<b>Total</b> (m <sup>3</sup> /año)	<b>14,797,650</b>	<b>15,323,622</b>	<b>25,539,371</b>	<b>19,645,670</b>	<b>17,026,247</b>	<b>21,650,401</b>	<b>18,285,890.1</b>	<b>16,790,559</b>

Aplica solo para riego de las huertas de cítricos con riego en producción convertidas a sandía.

(b)

Temporada	$ET_c\ tot$ (m <sup>3</sup> )	$R_n\ tot$ (m <sup>3</sup> )	Sistema de Riego					
			Gravedad	Aspersión	Microasp.	Gravedad/ Goteo	Aspersión/ Goteo	Microasp./ Goteo
			$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )
Invierno	2,904,906	4,612,163	7,686,938	5,913,029	5,124,625	6,496,739	5,496,876	5,052,492
Primavera	5,337,072	6,013,846	10,023,077	7,710,059	6,682,051	8,404,310	7,144,056	6,583,944
Verano	6,242,202	5,995,963	9,993,272	7,657,133	6,662,181	8,368,559	7,119,051	6,563,714
Otoño	3,909,162	3,388,682	5,647,803	4,344,464	3,765,202	4,794,305	4,046,038	3,713,475
<b>Total</b> (m <sup>3</sup> /año)	<b>18,393,342</b>	<b>20,010,654</b>	<b>33,351,090</b>	<b>25,624,685</b>	<b>22,234,060</b>	<b>28,063,913</b>	<b>23,806,021</b>	<b>21,913,625</b>

Aplica solo para riego de las huertas de cítricos con riego en producción convertidas a sandía.

## CAPITULO IV: DISCUSIÓN

### 1. Clasificación de Imágenes Landsat 5-TM

Las huertas de cítricos contenidas en las parcelas delimitadas presentaron una elevada heterogeneidad espectral, lo que se atribuye a su reducida homogeneidad física. La mayoría de las parcelas contenían huertas de diferentes especies, variedades, edades, tamaños, sistemas de plantación y estados de salud entremezcladas entre sí, así como la presencia de maleza, suelo desnudo y secciones de terreno con suministro de riego deficiente. Lo anterior dificultó asociar los píxeles correspondientes a las huertas de cítricos, a un número reducido de muestras de entrenamiento y clases espectrales fácilmente separables al momento de efectuar las clasificaciones de las imágenes satelitales multibanda empleadas en el presente estudio. Otro factor que dificultó la clasificación de las imágenes Landsat 5 fue el fenómeno de píxel mixto por causa de la resolución espacial del sensor TM (30 m x 30 m) que contribuye a la definición imprecisa o ambigua de clases por carencia de una frontera clara y bien marcada entre ellas.

La zona que presentó las mayores dificultades para la obtención de muestras de entrenamiento espectralmente homogéneas y que consecuentemente produjo los resultados de clasificación más pobres al hacerse el comparativo visual entre la clasificación final y la información auxiliar “verdad-terreno” disponible, fue el municipio de Allende, debido en gran parte a las reducidas dimensiones de la mayoría de sus parcelas; asimismo, como consecuencia de las respuestas espectrales poco vigorosas de sus huertas, que corresponden en su mayoría a huertas de cítricos de temporal, lo cual generó respuestas espectrales similares a suelos desprovistos de vegetación o vegetación dispersa. Los mejores resultados de clasificación se obtuvieron en los municipios de Hualahuises y Linares, donde la mayor parte de la superficie cítrícola existente cuenta con riego, razón por la cual fueron seleccionados como zona piloto para el desarrollo de los escenarios en el uso de agua de riego “*Qué pasa sí...*” del presente estudio.

Durante el proceso de definición del umbral NDVI en torno al cual serían generadas las máscaras binarias, se determinó que muchas de las cubiertas que fueron identificadas como matorral, con base en la información auxiliar “verdad-

terreno” disponible, presentaron valores de NDVI similares y en algunos casos mayores a las huertas de cítricos cuyas superficies se pretendían extraer mediante la clasificación multispectral, por lo que si se establecía un valor de NDVI demasiado elevado para anular dichas cubiertas, un porcentaje significativo de los píxeles de las huertas de cítricos se verían afectados. Por este motivo, se definió un umbral de 0.21 que permitió anular píxeles correspondientes a suelos desprovistos de vegetación, áreas sin vegetación aparente o vegetación dispersa, vegetación poco vigorosa, cuerpos de agua y zonas urbanas, afectando en el menor grado posible los píxeles correspondientes a huertas de cítricos en producción.

Los valores elevados de NDVI presentados por las comunidades de matorrales se atribuyó principalmente a la presencia de comunidades de matorral submontano y matorral espinoso tamaulipeco dispersas por toda la zona de estudio, cuyas características fisionómicas les confiere respuestas espectrales de vegetación vigorosa. Se descartó la posibilidad de que precipitación pluvial haya sido factor en el grado de vigorosidad presentada por las comunidades vegetales referidas, dado que las estaciones meteorológicas localizadas en el área de influencia de la zona de estudio que contaban con datos de precipitación pluvial correspondientes a los años 2006 y 2007 (en su mayoría estaciones agroclimatológicas de la red Fundación Produce – INIFAP), no presentaron registros de volúmenes significativos de lluvia durante los meses en los cuales fueron adquiridas las imágenes Landsat 5-TM. No se descartó la posibilidad de que la disminución del ángulo de incidencia de la luz solar que ocurre durante la temporada en la cual fue adquirida la imagen correspondiente al 16 de noviembre 2006, haya contribuido a la disminución de los valores de reflectividad del suelo, permitiendo un mayor contraste de los valores entre las bandas del R e IRC.

Dada la problemática asociada con la elevada heterogeneidad espectral de la clase informacional de interés, píxeles mixtos y confusiones entre cubiertas con respuestas espectrales similares, se recurrió al uso conjunto de ERDAS Imagine® y la extensión Feature Analyst® para ERDAS Imagine® con el objetivo de obtener resultados de clasificación más precisos. A diferencia del método de clasificación tradicional “por-píxel” empleado por ERDAS Imagine® que obliga la asignación de la totalidad de píxeles presentes en las imágenes a un determinado número de clases espectrales o informacionales, según el método de entrenamiento

seleccionado, la extensión Feature Analyst<sup>®</sup> para ERDAS Imagine<sup>®</sup> permitió concentrar la clasificación únicamente en aquellos píxeles que presentaban mayor semejanza a los patrones de las muestras de entrenamiento correspondientes a la clase informacional de interés, eliminando la necesidad de clasificar las demás cubiertas presentes en las imágenes.

Considerando que la resolución de las imágenes Landsat 5-TM no permite distinguir fácilmente objetos discretos, a diferencia de imágenes de alta resolución, la selección de las muestras de entrenamiento de la clase informacional de interés (“Cítrico”) se llevó a cabo con base en los criterios estadísticos comúnmente utilizados en la clasificación multispectral tradicional “por-píxel”. La clasificación final, sin embargo, se vio beneficiada por la combinación de los criterios de asignación empleados por la extensión Feature Analyst<sup>®</sup> v4.2 para ERDAS Imagine<sup>®</sup> tales como el vecino más cercano, máxima verosimilitud, árboles de decisiones, lógica difusa, redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos de búsqueda, que además se apoyan en algoritmos de aprendizaje de máquina basados en aprendizaje jerárquico, inductivo e iterativo (VLS, 2008). Se considera que lo anterior contribuyó a lograr una clasificación más precisa en comparación con la que se hubiese logrado empleando métodos tradicionales.

Adicionalmente se incorporó a la clasificación un criterio contextual con base en las delimitaciones de las parcelas que contenían huertas de cítricos con riego en producción. Lo anterior con el objetivo de reducir confusiones potenciales con píxeles correspondientes a otras cubiertas dispersas en la zona de estudio, debido a su semejanza espectral. Es de hacer notar que las delimitaciones de las parcelas fueron digitalizadas a partir de la interpretación de información auxiliar verdad-terreno y no corresponden a las delimitaciones catastrales oficiales de las parcelas. Los polígonos fueron digitalizados utilizando como criterio las divisiones fácilmente identificables creadas por accesos y carreteras, así como espacios distintivos entre huertas. Cabe señalar que originalmente se había planeado designar el censo elaborado en el 2005 por el órgano administrativo desconcentrado de la SAGARPA denominado Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA) como “región de interés” para llevar a cabo la asignación de píxeles mediante uso de la extensión Feature Analyst<sup>®</sup> para ERDAS Imagine<sup>®</sup>, sin embargo la interpretación visual de la superposición de la capa vectorial de polígonos del censo y la información auxiliar verdad-terreno

disponible, reveló que el censo no abarcaba la totalidad de las parcelas con huertas de cítricos visibles en la zona de estudio. Al comparar la superficie total de los polígonos que integran el censo ASERCA con la superficie total de los polígonos que fueron digitalizados como parte del presente estudio, se determinó que el censo ASERCA abarcaba únicamente el 57% de la superficie total de dichos polígonos.

### **1.1. Evaluación de Clasificación**

Los valores de precisión global de las clasificaciones realizadas para ambos subsets irregulares con máscaras binarias integradas revelaron que los resultados obtenidos eran estadísticamente confiables. Lo anterior con base en el criterio de precisión mínima admitida del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), ya que ambos valores fueron mayores al 85% (Lillesand et al., 2004).

Dado que la precisión global puede ocultar diferencias importantes entre clases con diversos niveles de exactitud, se calcularon para ambas clasificaciones, la precisión de usuario y precisión de productor, que señalan los errores de comisión y omisión respectivamente. El concepto de usuario se refiere al que hará uso del mapa temático producto de la clasificación en cuestión, mientras que el concepto de productor, al que lo construyó. El mayor o menor grado de precisión obtenido de la clasificación constituye éxito o fracaso para el productor y confiabilidad o riesgo para el usuario. Las precisiones de usuario y de productor obtenidos indicaron una alta probabilidad de que la superficie realmente ocupada por cítricos se encontraba incluida en la clasificaciones efectuadas, debido a que los errores de omisión fueron menores que los errores de comisión (Chuvieco, 2002).

El coeficiente Kappa mide la diferencia entre el acuerdo clasificación-realidad observado y el que se podría esperar simplemente por azar (Lillesand et al. 2004). Para el caso del subset irregular de fecha 16 de noviembre 2006, el coeficiente Kappa global indicó que la clasificación fue 80% mejor de lo que podría esperarse por el simple azar, mientras que los valores kappa condicionales (coeficientes Kappa correspondientes a las clases informacionales individuales) indicaron que la clasificación de la cubierta correspondiente a "No-Citrico" fue 67%



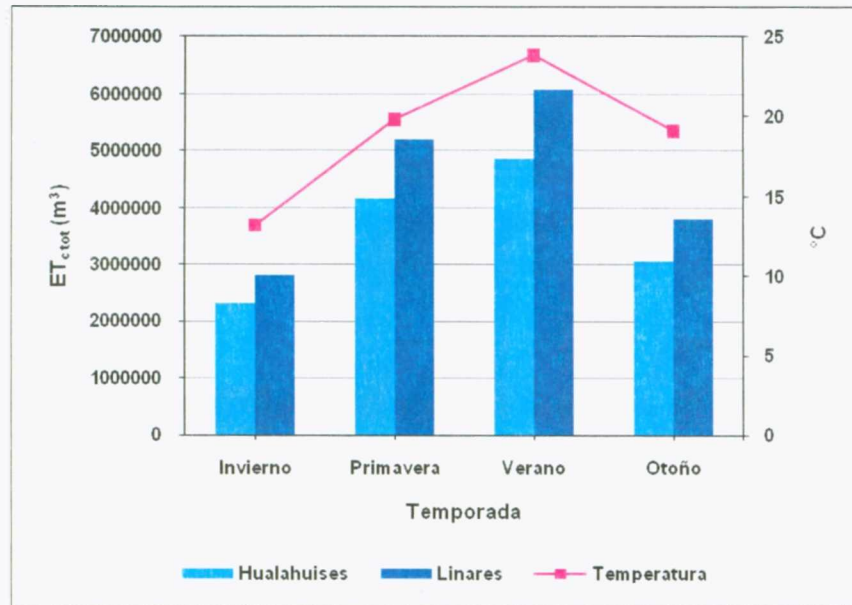
mejor y la designada como "Cítrico" fue 85% mejor. Para el caso del subset irregular de fecha 20 de febrero 2007, el coeficiente Kappa global indicó que la clasificación fue 72% mejor de lo que podría esperarse por el simple azar, mientras que los valores Kappa condicionales indicaron que la clasificación de la cubierta designada como "No-Citrico" fue 62% mejor y la designada como "Cítrico" fue 86% mejor.

## **2. Análisis de Escenarios en el Uso de Agua de Riego**

### ***2.1. Escenario Situación Actual***

Los valores promedio de  $ET_o$  mensuales correspondientes a las diferentes temporadas en la zona de influencia de Hualahusies y Linares, sugirieron que la demanda transpirativa de la atmósfera es mayor durante la temporada de verano, seguido por las temporadas de primavera y otoño, presentándose las menores demandas durante la temporada de invierno. Cabe señalar que los resultados anteriores deben tomarse con especial precaución, dado que los registros de las estaciones correspondieron a un período de tiempo promedio de aproximadamente dos años, coincidente con el tiempo de operación de la mayoría de las estaciones Fundación PRODUCE-INIFAP localizadas en el área de estudio.

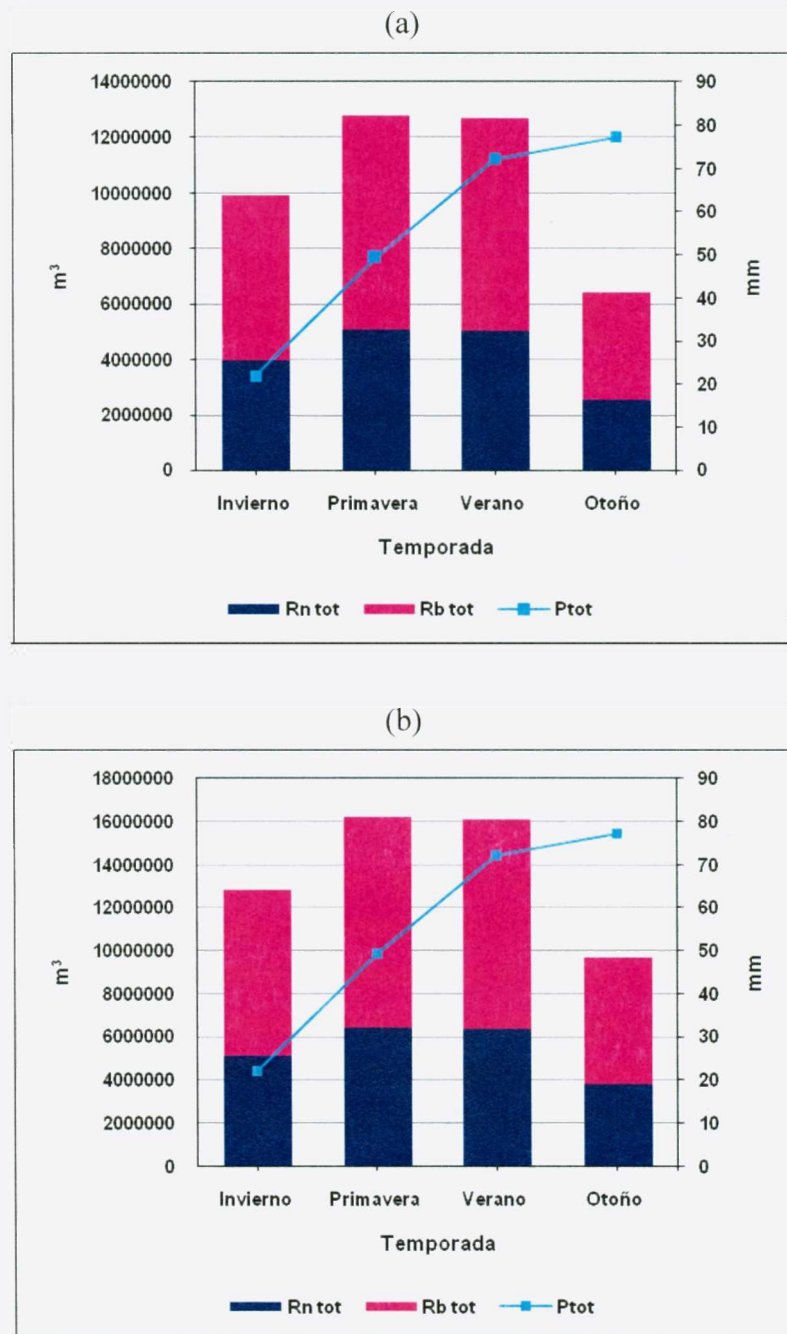
Las huertas de cítricos con riego en producción que fueron identificadas en los municipios de Hualahuises y Linares, con base en la clasificación de las imágenes Landsat 5-TM correspondientes a noviembre 2006 y febrero 2007, presentaron las mayores demandas de agua ( $ET_{c\ tot}$ ) durante la temporada de verano, seguido por la temporada de primavera y otoño, presentándose las menores demandas durante la temporada de invierno. Lo anterior se le atribuye al hecho de que las máximas temperaturas promedio en la zona de influencia de Hualahuises y Linares se presentan durante la temporada de verano, seguido por las temporadas de primavera y otoño, mientras que las temperaturas menores se presentan durante la temporada de invierno (Anexo 4). A medida que aumenta la temperatura, también lo hace la evapotranspiración y consecuentemente la demanda de agua de los cultivos. Durante las temporadas de otoño e invierno, la demanda de agua disminuye debido al descenso de las temperaturas (Figura 51).



**Figura 52.** Demandas de agua de superficie citrícola con riego en producción en Hualahuises y Linares y temperaturas promedio en su zona de influencia.

La superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares presenta los mayores consumos netos totales ( $R_{n\ tot}$ ) y consumos brutos mínimos totales ( $R_{b\ tot}$ ) de agua de riego durante la temporada de primavera, seguido por la temporada de verano e invierno, presentándose los menores consumos durante la temporada de otoño. Se considera que la temporada de otoño, aun cuando registra temperaturas promedio muy semejantes a las registradas en primavera, presenta los menores consumos de agua de riego debido a que coincide con el período de máximas precipitaciones pluviales anuales. Los consumos mínimos brutos totales de agua durante las temporadas de verano y primavera son prácticamente iguales, no obstante, la temporada de primavera presenta consumos de agua de riego ligeramente mayores, lo que se atribuye al hecho de que durante la primavera, se presenta una menor precipitación pluvial promedio en comparación con la ocurrida durante el verano, lo cual repercute en un menor volumen de precipitación efectiva disponible y un mayor consumo de agua de riego. Para el caso del invierno, el consumo de agua de riego es menor que el consumo durante el otoño. Se considera que lo anterior se debe a que aun cuando la temperatura de invierno es el 70% de la de otoño, las precipitaciones en otoño son 3.5 veces mayores que las que se presentan en

invierno, por lo que se requiere un mayor volumen de agua de riego complementario en invierno (Figura 52).



**Figura 53.** Consumos netos totales y consumos brutos mínimos totales de agua de riego de la superficie citrícola con riego en producción en Hualahuises y Linares y promedios de precipitación pluvial en su zona de influencia. (a) Hualahuises. (b) Linares.

Cabe resaltar que en la realidad se podrían estar aplicando volúmenes mayores de agua de riego como consecuencia del despilfarro comúnmente asociado con el método de riego predominante en la zona bajo estudio (riego por gravedad), aunado al hecho de que las fugas o pérdidas de agua de riego ocurridas en las redes de conducción y distribución no fueron cuantificadas en el presente estudio. Lo anterior constituye la razón por la cual el consumo bruto total calculado para este escenario ha sido designado como consumo bruto *mínimo* total.

Con base en los consumos netos y consumos brutos mínimos totales de agua de riego de la superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares, se determinó que se aplica cuando menos un excedente de 8,480,683 m<sup>3</sup>/año de agua de riego en el municipio de Hualahuises, mientras que para el caso de Linares, se aplica un excedente de 11,479,550 m<sup>3</sup>/año (Tabla 39). Lo anterior se le atribuye a las bajas eficiencias de los sistemas de riego utilizados en la zona de estudio, lo cual implica la necesidad de aplicar volúmenes de agua de riego adicionales a los requerimientos netos para compensar las pérdidas de agua que estos sistemas ocasionan.

**Tabla 39.** Excedentes de volúmenes de agua de riego aplicados a huertas de cítricos en producción. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

<b>Temporada</b>	<b>R<sub>n tot</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>R<sub>b tot</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Excedente (m<sup>3</sup>)</b>
Invierno	3,980,866	5,965,718	1,984,853
Primavera	5,094,560	7,687,366	2,592,806
Verano	5,053,230	7,648,064	2,594,834
Otoño	2,546,084	3,854,275	1,308,190
<b>Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>16,674,740</b>	<b>25,155,423</b>	<b>8,480,683</b>

(b)

<b>Temporada</b>	<b>R<sub>n tot</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>R<sub>b tot</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Excedente (m<sup>3</sup>)</b>
Invierno	5,079,295	7,768,278	2,688,982.5

Primavera	6,413,196	9,807,080	3,393,884.1
Verano	6,370,150	9,742,365	3,372,214.8
Otoño	3,828,435	5,852,903	2,024,468.1
<b>Total</b> (m <sup>3</sup> /año)	<b>21,691,076</b>	<b>33,170,626</b>	<b>11,479,550</b>

## **2.2. Escenario Riego de Totalidad de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades**

### **2.2.1. Sub-Escenarios Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción por Gravedad o Presurizado**

Con base en el comparativo de las diferencias entre el consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos con riego en producción y los requerimientos brutos mínimos totales ( $R_{b\ tot}$ ) correspondientes a los diferentes sub-escenarios analizados, para el caso de Hualahuises, los mayores ahorros de volúmenes de agua de riego se obtienen utilizando sistemas de riego por microaspersión, logrando un ahorro potencial de 6,719,192 m<sup>3</sup> equivalentes al 26.71% del consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos. Los menores ahorros se obtienen a partir del uso de sistemas por gravedad, resultando en la aplicación de 2,635,811 m<sup>3</sup> adicionales al consumo bruto mínimo total.

Para el caso de Linares, los mayores ahorros de agua se obtienen mediante uso de sistemas de riego por microaspersión, logrando un ahorro de 9,069,430 m<sup>3</sup> equivalentes al 27.34% del consumo bruto mínimo de agua de riego de cítricos. Los menores ahorros se obtienen a partir del uso de sistemas por gravedad, resultando en la aplicación de 2,981,169 m<sup>3</sup> adicionales al consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos (Tabla 40).

**Tabla 40.** Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos en producción utilizando sistemas por gravedad y microaspersión. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	Situación	Sub-escenario			
	Actual	100% Cítricos c/ Gravedad		100% Cítricos c/ Microasp.	
	$R_{b\ tot}$	$R_{b\ tot}$	Excedente	$R_{b\ tot}$	Ahorro

	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
Invierno	5,965,718	6,634,776	669,058	4,423,184	1,542,534
Primavera	7,687,366	8,490,934	803,567	5,660,622	2,026,744
Verano	7,648,064	8,422,050	773,986	5,614,700	2,033,364
Otoño	3,854,275	4,243,474	389,200	2,737,725	1,116,549
<b>Total</b> (m <sup>3</sup> /año)	<b>25,155,423</b>	<b>27,791,234</b>	<b>2,635,811</b>	<b>18,436,232</b>	<b>6,719,192</b>

(b)

Temporada	Situación	Sub-escenario			
	Actual	100% Cítricos c/ Gravedad		100% Cítricos c/ Microasp.	
	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Excedente (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Ahorro (m <sup>3</sup> )
Invierno	7,768,278	8,465,492	697,214	5,643,661	2,124,617
Primavera	9,807,080	10,688,661	881,581	7,125,773	2,681,307
Verano	9,742,365	10,616,916	874,552	7,077,944	2,664,420
Otoño	5,852,903	6,380,725	527,822	4,253,817	1,599,086
<b>Total</b> (m <sup>3</sup> /año)	<b>33,170,626</b>	<b>36,151,794</b>	<b>2,981,169</b>	<b>24,101,196</b>	<b>9,069,430</b>

Los ahorros potenciales de volúmenes de agua de riego logrados se atribuyen al hecho de que los sistemas de riego por microaspersión presentan mayores eficiencias de aplicación en comparación con las eficiencias de aplicación promedio de sistemas de riego por gravedad y por aspersión, dado que permiten aplicar el agua en puntos específicos en forma de lluvia fina o neblina, logrando de esta manera una mayor uniformidad de riego, dado que el patrón de humedad se ajusta al área del cultivo humedecida (Gurovich, 1990).

### ***2.3. Escenario Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Hortalizas***

#### ***2.3.1. Sub-Escenarios Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% a Tomate***

Con base en el comparativo entre las diferencias entre el consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos en producción y los valores de R<sub>b tot</sub>

calculados para cada uno de los sub-escenarios modelados, los mayores ahorros potenciales de agua de riego en los municipios de Hualahuises y Linares se logran utilizando la combinación de sistemas de riego por goteo para las huertas de tomate y microaspersión para las huertas de cítricos, mientras que los menores ahorros se obtienen mediante riego por gravedad de las huertas de cítricos y tomate.

La combinación de riego por microaspersión y goteo logra ahorros potenciales de 7,227,739 m<sup>3</sup>, equivalentes al 28.73% del consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos en producción en Hualahuises y un ahorro de 9,796,259 m<sup>3</sup> equivalentes al 29.53% del consumo bruto mínimo total en Linares. El riego por gravedad de las huertas de cítricos y tomate implica la aplicación de 2,146,502 m<sup>3</sup> adicionales al consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos en Hualahuises y 2,444,567 m<sup>3</sup> adicionales en Linares (Tabla 41).

**Tabla 41.** Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos/ tomate utilizando sistemas por gravedad y microaspersión/goteo. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	Situación	Sub-escenario			
		Actual	100% Cítricos c/ Gravedad	50% Cítricos c/ Microasp. 50% Tomate c/ Goteo	
	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Excedente (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Ahorro (m <sup>3</sup> )
Invierno	5,965,718	6,258,348	292,630	4,112,492	1,853,226
Primavera	7,687,366	8,479,910	792,544	5,566,698	2,120,668
Verano	7,648,064	8,549,064	901,000	5,610,533	2,037,532
Otoño	3,854,275	4,014,603	160,329	2,637,962	1,216,313
<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>25,155,423</b>	<b>27,301,926</b>	<b>2,146,502</b>	<b>17,927,684</b>	<b>7,227,739</b>

(b)

Temporada	Situación	Sub-escenario			
		Actual	100% Cítricos c/ Gravedad	50% Cítricos c/ Microasp. 50% Tomate c/ Goteo	
	R <sub>b tot</sub>	R <sub>b tot</sub>	Excedente	R <sub>b tot</sub>	Ahorro

	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )
Invierno	7,768,278	7,995,668	227,391	5,251,673	2,516,605
Primavera	9,807,080	10,701,252	894,173	7,021,477	2,785,603
Verano	9,742,365	10,808,954	1,066,589	7,089,960	2,652,404
Otoño	5,852,903	6,109,318	256,415	4,011,257	1,841,647
<b>Total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>33,170,626</b>	<b>35,615,193</b>	<b>2,444,567</b>	<b>23,374,367</b>	<b>9,796,259</b>

Los ahorros logrados se atribuyen al uso combinado de dos sistemas altamente eficientes, particularmente el riego por goteo que presenta las mayores eficiencias de aplicación en comparación con sistemas de riego por gravedad, aspersión y microaspersión. Lo anterior debido a que los sistemas de riego por goteo logran importantes reducciones de la evaporación del suelo, lo que trae consigo una reducción significativa de los volúmenes de agua de riego que deberán ser aplicados a los cultivos.

### ***2.3.2. Sub-Escenarios de Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Melón***

Con base en el comparativo entre el consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos en producción y los valores de  $R_{b\ tot}$  calculados para cada uno de los sub-escenarios modelados, los mayores ahorros potenciales de volúmenes de agua de riego en los municipios de Hualahuises y Linares se logran utilizando la combinación de sistemas de riego por goteo para las huertas de melón y microaspersión para las huertas de cítricos, mientras que los menores ahorros se obtienen mediante riego por gravedad de las huertas de cítricos y melón.

En Hualahuises, la combinación de riego por microaspersión y goteo, logra ahorros potenciales de 8,579,809 m<sup>3</sup>, equivalentes al 34% del consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos en producción, mientras que en Linares, logra un ahorro de 11,509,433 m<sup>3</sup>, equivalentes al 34.7% del consumo mínimo bruto total de agua de riego de cítricos en producción. El riego por gravedad de las huertas de cítricos y melón implica la aplicación de 97,294 m<sup>3</sup> adicionales al consumo bruto mínimo total de agua de riego de cítricos en producción en



Hualahuises, mientras que en Linares, resulta en el ahorro de 210,806 m<sup>3</sup> (Tabla 42).

**Tabla 42.** Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos/hortalizas de melón utilizando sistemas por gravedad y microaspersión/ goteo. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	Situación Actual	Sub-escenario			
		Cítricos y Melón c/ Gravedad		50% Cítricos c/ Microasp. 50% Melón c/ Goteo	
		R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Excedente (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )
Invierno	5,965,718	6,044,988	79,270	3,944,840	2,020,878
Primavera	7,687,366	7,836,662	149,296	5,151,700	2,535,667
Verano	7,648,064	7,743,420	95,356	5,090,762	2,557,302
Otoño	3,854,275	3,627,647	-226,628	2,388,312	1,465,962
<b>Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>25,155,423</b>	<b>25,252,717</b>	<b>97,294</b>	<b>16,575,614</b>	<b>8,579,809</b>

(b)

Temporada	Situación Actual	Sub-escenario			
		Cítricos y Melón c/ Gravedad		50% Cítricos c/ Microasp. 50% Melón c/ Goteo	
		R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Ahorro (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )
Invierno	7,768,278	7,727,664	40,614	5,078,767	2,689,511
Primavera	9,807,080	9,864,871	-57,791	6,481,876	3,325,204
Verano	9,742,365	9,761,024	-18,660	6,413,877	3,328,488
Otoño	5,852,903	5,606,261	246,642	3,686,674	2,166,230
<b>Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>33,170,626</b>	<b>32,959,820</b>	<b>210,806</b>	<b>21,661,193</b>	<b>11,509,433</b>

**2.3.3. Sub-Escenarios Riego de Superficie Citrícola con Riego en Producción bajo Diferentes Modalidades con Reconversión Productiva del 50% de las Huertas a Sandía**

Con base en el comparativo entre el consumo mínimo bruto total de agua de riego de cítricos con riego en producción y los valores de  $R_{b\ tot}$  calculados para cada uno de los sub-escenarios modelados, los mayores ahorros potenciales de agua de riego en los municipios de Hualahuises y Linares se logran utilizando la combinación de sistemas de riego por goteo para las huertas de sandía y microaspersión para las huertas de cítricos, mientras que los menores ahorros se obtienen mediante riego por gravedad de las huertas de cítricos y sandía.

La combinación de riego por microaspersión y goteo logra ahorros potenciales de 8,364,8650 m<sup>3</sup>, equivalentes al 33.25% del consumo mínimo bruto total de agua de riego de cítricos en Hualahuises y un ahorro de 11,257,001 m<sup>3</sup>, equivalentes al 33.94% del consumo mínimo bruto total en Linares. El riego por gravedad de las huertas de cítricos y melón implica la aplicación de 384,947 m<sup>3</sup> adicionales al consumo mínimo bruto total de agua de riego de cítricos en Hualahuises y 180,464 m<sup>3</sup> adicionales al consumo mínimo bruto total de agua de riego de cítricos en Linares (Tabla 43).

**Tabla 43.** Excedentes/ahorros de agua de riego de huertas de cítricos/ sandía utilizando sistemas por gravedad y microaspersión/goteo. (a) Hualahuises, (b) Linares.

(a)

Temporada	Situación Actual	Sub-escenario			
		Cítricos y Sandía c/ Gravedad		50% Cítricos c/ Microasp. 50% Sandía c/ Goteo	
		$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )	Excedente (m <sup>3</sup> )	$R_{b\ tot}$ (m <sup>3</sup> )
Invierno	5,965,718	6,012,022	46,304	3,953,572	2,012,147
Primavera	7,687,366	7,954,157	266,790	5,227,510	2,459,857
Verano	7,648,064	7,917,753	269,689	5,203,235	2,444,830
Otoño	3,854,275	3,655,439	-198,836	2,406,243	1,448,032
<b>Total (m<sup>3</sup>/año)</b>	<b>25,155,423</b>	<b>25,539,371</b>	<b>383,947</b>	<b>16,790,559</b>	<b>8,364,865</b>

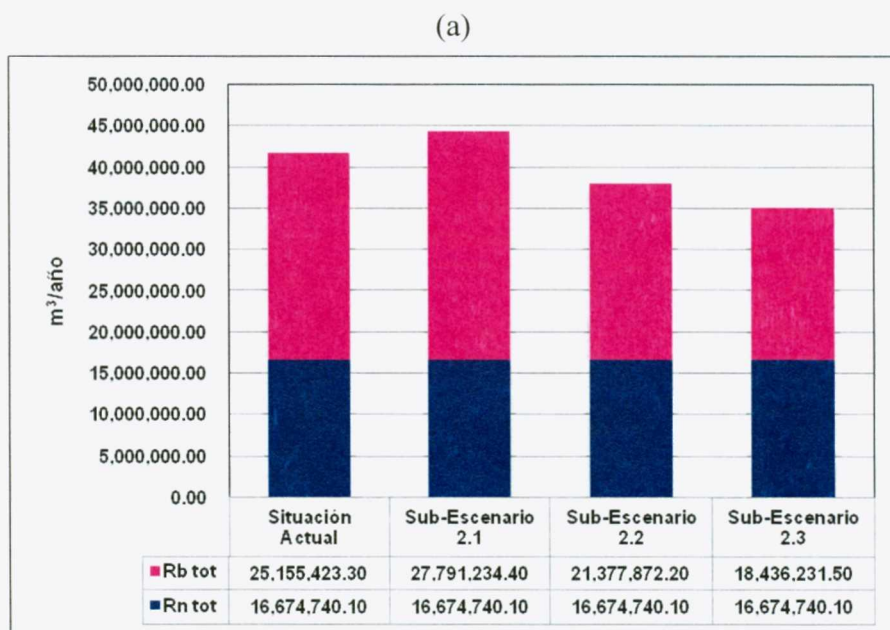
(b)

Temporada	Situación Actual	Sub-escenario	
		Cítricos y Sandía c/	50% Cítricos c/ Microasp.

	Gravedad			50% Sandía c/ Goteo	
	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Excedente (m <sup>3</sup> )	R <sub>b tot</sub> (m <sup>3</sup> )	Ahorro (m <sup>3</sup> )
Invierno	7,768,278	7,686,938	-81,340	5,052,492	2,715,786
Primavera	9,807,080	10,023,077	215,997	6,583,944	3,223,136
Verano	9,742,365	9,993,272	250,907	6,563,714	3,178,651
Otoño	5,852,903	5,647,803	-205,100	3,713,475	2,139,428
<b>Total</b> (m <sup>3</sup> /año)	<b>33,170,626</b>	<b>33,351,090</b>	<b>180,464</b>	<b>21,913,625</b>	<b>11,257,001</b>

#### 2.4. Escenarios Óptimos de Riego de Superficie Citrícola

La Figura 53 presenta el comparativo entre los consumos netos y consumos mínimos brutos totales de agua de riego de la superficie citrícola con riego en producción y los requerimientos netos y brutos mínimos totales de agua de riego calculados para los diferentes sub-escenarios que consideran riego por gravedad o por presurizado de la totalidad de la superficie citrícola con riego en producción en los municipios de Hualahuises y Linares.





Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey



**30002007319205**

<http://biblioteca.mty.itesm.mx>