



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ciencias Biológicas



**“MODELADO PARA PRESENTAR UN BUEN MANEJO DEL AGUA,
EVITAR ANEGAMIENTO PROLONGADO E INUNDACIÓN EN
LA REGIÓN DEL CUXCUCHAPA, TABASCO, MÉXICO”.**

Trabajo recepcional bajo la modalidad de:

Tesis de Maestría

Para obtener el título en:

Maestro en Ingeniería y Protección Ambiental

Presenta:

Ing. Rosa Esther Hernández Jiménez

Director:

Dr. Emmanuel Munguía Balvanera



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

MARZO 07 DE 2018

**C. ROSA ESTHER HERNÁNDEZ JIMÉNEZ
PAS. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y PROTECCIÓN
AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental titulado: **"MODELADO PARA PRESENTAR UN BUEN MANEJO DEL AGUA, EVITAR ANEGAMIENTO PROLONGADO E INUNDACIÓN EN LA REGIÓN DEL CUXCUCHAPA, TABASCO, MÉXICO"**, asesorado por el Dr. Emmanuel Munguía Balvanera sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Randy Howard Adams Schroeder, M. en C. Eduardo Javier Moguel Ordoñez, Dr. Emmanuel Munguía Balvanera, Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez y Dr. Raúl German Bautista Margulis.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTORA

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

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

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“MODELADO PARA PRESENTAR UN BUEN MANEJO DEL AGUA, EVITAR ANEGAMIENTO PROLONGADO E INUNDACIÓN EN LA REGIÓN DEL CUXCUCHAPA, TABASCO, MÉXICO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 07 de Marzo de 2018.

AUTORIZO



ROSA ESTHER HERNÁNDEZ JIMÉNEZ

Agradecimientos

Antes de iniciar y al terminar este documento son muchas las instituciones y personas que han participado directa e indirectamente en este trabajo, para ellos mi gratitud por el apoyo y la confianza que me han depositado.

No puedo olvidar a mis compañeros y amigos con los cuales he compartido incontables horas de trabajo. Gracias por los buenos y malos momentos, por aguantarme y por escucharme. Gracias Gerardo, Patricia, Lilitiana y Gabriela por su amistad y ayuda que no tiene precio.

Agradezco muy especialmente a mi director de tesis al Dr. Emmanuel Munguía Balvanera, por su gran apoyo, confianza, cariño, motivación, consejos, paciencia y su dedicación a lo largo de la realización de este trabajo.

Así mismo a los integrantes del jurado: Dr. Randy Howard Adams Schroeder, M.C Eduardo Javier Moquel Ordoñez, Dra. Verónica I. Domínguez Rodríguez, Dr. Raúl Germán Bautista Margulís, quienes también fueron parte fundamental en la realización de este trabajo; agradezco su valiosa colaboración en la revisión tan exhaustiva que hicieron del documento preliminar, así como por todas las observaciones y sugerencias que me hicieron para mejorarlo.

Todo esto nunca hubiera sido posible sin el amparo incondicional de mi familia.

Dedicatoría

A:

A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el período de estudio.

A mis padres Asunción y Luisa, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora.

A mis hermanos Ana, Ángel y Asunción por estar conmigo y apoyarme siempre, por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar, los quiero mucho.

A mis familiares y amigos que tuvieron una palabra de apoyo para mí durante mis estudios.

Contenido

Índice de figuras	3
Índice de cuadros	4
Resumen	5
Abstract	5
1 Introducción	6
2 Antecedentes	7
2.1 Los principios de las retículas de canales	7
2.2 Humedales en América precolombina	8
2.3 Las chinampas, un sistema sustentable	11
2.4 El sistema de los aztecas y su retícula de canales	12
2.5 Sistema Pólder, Holanda	12
2.6 Recuperación de Humedales, España	14
2.7 Beneficios de los camellones chontales (Chinampas)	16
2.8 Estrategias para mitigar el riesgo de inundación	16
2.9 Distribución del agua de lluvia	17
2.9.1 Aprovechamiento del agua de lluvia	19
2.10 Captación del agua de lluvia	19
2.11 Suelo Saturado	20
2.12 Aspectos fisiográficos de la zona de estudio	21
2.13 Mapa de localización	21
2.13.1 Subregión de la Chontalpa	22
2.13.2 Hidrografía	23
2.13.3 Dimensiones del proyecto (área y perímetro) y Orografía	24
2.13.4 Características y Usos del Suelo	25
2.13.5 Clima	25
2.13.6 Sector productivo	26
2.13.7 Flora	27
2.13.8 Fauna	27
3 Justificación	28
4 Objetivos	29
4.1 Objetivo general	29
4.2 Objetivos específicos	29

5	Metodología	29
5.1	Método para generar el modelo digital de elevaciones (MDE).....	30
5.2	Gastos utilizados para la zona de estudio calculados por periodos de retorno.....	36
5.3	Aporte de áreas aledañas a la zona de estudio.....	37
5.4	Levantamiento batimétrico y condiciones actuales de los drenes	41
5.5	Elección de lluvia	43
5.6	Simulación de lluvias en terreno natural con malla RTIN	46
5.6.1	Mallado de la zona de estudio con RTIN.....	46
5.7	Trazo de la propuesta de canales en la zona de estudio por periodos de retorno y con canales de 3 metros de profundidad	48
5.7.1	Pre-proceso de la zona de estudio con escurrimientos por periodos de retorno y con canales de 3 metros de profundidad	49
5.8	Simulación de lluvias en la retícula de canales	53
6	Resultados	54
6.1	Resultados de simulación de lluvias en terreno natural con malla RTIN.....	54
6.1.1	Asignación de condiciones de contorno y Datos del problema	54
6.2	Resultado de simulación en la retícula canales por periodos de retorno.....	56
6.2.1	Asignación de condiciones de contorno y Datos del problema	56
6.3	Resultado de la simulación de lluvias en la retícula de canales	59
6.3.1	Asignación de condiciones de contorno y Datos del problema	59
7	Conclusiones y Recomendaciones	62
8	Referencias bibliográficas	64
9	Anexos.....	67
9.1	Anexo 1. Glosario.....	67
9.2	Anexo 2. Simbología de clima	70

Índice de figuras

<i>Figura 1. Arreglo de los camellones en las ciudades mesoamericanas (Moreno & Infante, 2010).</i>	7
<i>Figura 2. La ciudad de México en 1519. La figura muestra los canales y las chinamas construidos por los mexicas (Carrera, 2017).</i>	8
<i>Figura 3. Distribución de los antiguos canales en el valle de México (León Portilla, 1992).</i>	9
<i>Figura 4. Ubicación Pólder de Beemster, en Holanda, creado en 1612 y aún productivo, izq. su estado actual. Derecha, imagen del mapa original de 1612. Fuente:Google earth. Editada en QGIS.</i>	13
<i>Figura 5. Canales y drenes en Veta la Palma (Google Earth).</i>	14
<i>Figura 6. Canales y drenes en la Veta la Palma (Veta La Palma, Parque Natural, 2010).</i>	15
<i>Figura 7. Retener, guardar y trasladar el agua como estrategia contra inundaciones según Holanda (Water Board De Dommel).</i>	17
<i>Figura 8. Los destinos del agua de lluvia. Con base en la FAO (Shaxson & Barber, 2005).</i>	18
<i>Figura 9. Ubicación de la zona de estudio. Google earth. Editada.</i>	22
<i>Figura 10. Elevación de la zona de estudio.</i>	24
<i>Figura 11. Edafología 1:250000 – 1:1000000. Instituto nacional de investigaciones forestales y agropecuarias y la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.INIFA-CONABIO, 1995.</i>	25
<i>Figura 12. Diagrama de flujo.</i>	30
<i>Figura 13. Claves de las Cartas Topográficas que proporciona el INEGI. Fuente:INEGI</i>	31
<i>Figura 14. Coordenadas UTM de (INEGI, 2011) Coordenadas horizontales UTM y la tercera columna contiene los datos de elevación del terreno.</i>	32
<i>Figura 15. Modelo Digital de Terreno de 37 archivos del INEGI mencionados en el Cuadro 2</i>	33
<i>Figura 16. Modelo Digital de Elevaciones de Superficie de 37 archivos del INEGI mencionados en el Cuadro 2.</i>	34
<i>Figura 17. Colocación de la zona comprendida entre los drenes Cuxcuchapa y Cunduacán en el MDE.</i>	35
<i>Figura 18. Recorte del MDE por medio de QGIS.</i>	36
<i>Figura 19. Zona de estudio y localización de ríos y drenes principales (Ojeda A, 2016).</i>	38
<i>Figura 20. Mapas de inundación o de máximos calados (tirantes).</i>	40
<i>Figura 21. Levantamiento batimétrico y situación actual de los drenes.</i>	42
<i>Figura 22. Curvas de nivel del dren Veladero en la entrada y en isométrico. Derecha su representación total en CAD.</i>	42
<i>Figura 23. Ubicación de la estación 49 Samaria.</i>	44
<i>Figura 24. Hietograma de lluvia en el año 2016 (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017).</i>	45
<i>Figura 25. Hietograma de lluvia del año 2017 hasta la actualidad (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017).</i>	45
<i>Figura 26. Malla en formato TIN obtenida en GIS.</i>	47
<i>Figura 27. Ajuste de las salidas de los drenes al MDE, ajustando la malla.</i>	47
<i>Figura 28. Superficies Nurbs de la zona de estudio. Para facilitar la creación de superficies se dividieron algunos polígonos.</i>	50
<i>Figura 29. Gráficas de calidad de forma generadas en iber.</i>	51

<i>Figura 30. Mallado en Iber de las superficies Nurbs. Mallado de los canales de 20 unidades y fuera de ellos de 120 unidades.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31. A): entrada de agua del canal Veladero ,del canal W15. B) Salida del canal veladero, salida del W15.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32. Nivelación del terreno para realizar las simulaciones lo más cercana a las modificaciones de la topografía por los canales.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 33. Derecha Hietograma de lluvia de 39 h. Izquierda Hietograma de lluvia de 5 h... </i>	<i>54</i>
<i>Figura 34. Resultado de simulación de lluvia de 3 h en Iber.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35. Resultado de simulación de lluvia de 39 h.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36. Resultados de los calados de la zona de estudio para un periodo de retorno de 5 años.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 37. Resultados de los tirantes máximos de la zona de estudio para un periodo de retorno de 1 000 años.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 38. Resultados de simulación de lluvia de 5 h (131 mm).</i>	<i>60</i>
<i>Figura 39. Resultados de simulación de lluvia de 39 h (53.7 mm).</i>	<i>61</i>
<i>Figura 40. Imagen de un ráster</i>	<i>69</i>
<i>Figura 41. Combinación(es) autorizada(s) de valores de atributos. Fuente: Fuente: INEGI: Base de datos geográficos, INEGI. Diccionario de datos geográficos 1:250 000 y 1:1000000</i>	<i>75</i>

Índice de cuadros

<i>Cuadro 1. Fauna en Cunduacán, Tabasco (ONUDI, 2010).</i>	<i>27</i>
<i>Cuadro 2. MDT y MDE según claves del INEGI y pertenecientes a la zona de estudio.</i>	<i>31</i>
<i>Cuadro 3. Gastos máximos considerados en cada una de las entradas de agua con sus correspondientes periodos de retorno, en cada uno de los experimentos numéricos realizados.</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 4. Tirante máximo que ocurre en la zona de estudio.</i>	<i>39</i>
<i>Cuadro 5. Registro de la base (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017). Estación 49 Samaria, iniciando el 11 nov 2016 al 12 nov 2016. Se muestra el inicio del hietograma. Un total de 53.7 mm de lluvia y 39 horas de registro.</i>	<i>45</i>
<i>Cuadro 6 . Registro de la base (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017). Estación 49 Samaria, iniciando el 16 mayo 2017. Se muestra el inicio del hietograma. Un total de 131 mm de lluvia y 5 horas de registro.</i>	<i>46</i>
<i>Cuadro 7. Resultados de calados de los periodo de retorno.</i>	<i>57</i>

Resumen

El propósito de este trabajo es optimizar la capacidad de campo mediante el manejo del agua. Se planteó la hipótesis que, con base en las propiedades hidrodinámicas de la retícula de canales, se puede elaborar una propuesta óptima en campo con cierta geometría para minimizar los efectos de la turbulencia y contar con un tirante constante manejando de esta forma el agua. Para realizar la propuesta se modeló la zona del Cuxcuchapa, Tabasco, tomando como base mediciones de lluvia en tiempo real, y escurrimientos por periodos de retorno.

Mediante simulaciones con base en las ecuaciones de Saint-Venant en 2D, se comprobó que las retículas de canales, cuando forma parcelas cuadradas, el tirante tiende a ser constante y con poca turbulencia; además, al aumentar el gasto el tirante no se incrementa significativamente, propiedades que ayudan a el manejo de la cantidad de agua en la retícula. Quedando pendiente modelar compuertas para un manejo óptimo del agua.

Palabras claves: Aprovechamiento del agua, Iber, Inundación, Modelado de canales, Modelación de lluvia.

Abstract

The purpose of this work is to optimize field capacity through water management. It was hypothesized that, based on the hydrodynamic properties of grid-shape water channel, an optimum proposal can be made *in situ* with certain geometry to minimize the effects of turbulence and have a constant depth of water to manage. To make the proposal, the area of Cuxcuchapa, Tabasco was modeled, based on real-time rainfall measurements and runoff for return periods.

Using simulations based on the Saint-Venant equations in 2D, it was found that grid-shape channels, when forming square plots, the depth tends to be constant and with little turbulence; In addition, when increasing the water flow the depth does not increase significantly, properties that help to manage the amount of water in the grid. It is still pending to model floodgates for optimal water management.

Keywords: Water management, Iber, Flood, Modeling of channels, Modeling of rain.

1 Introducción

En este documento se analizan propuestas históricas y mundiales sobre el aprovechamiento del agua, principalmente la de lluvia. Se estudian los métodos prehispánicos, los antiguos y presentes pólderes y las modernas técnicas en España. Se presentan como un método de rescatar humedales y de obtención de beneficios para el hombre. Se propone almacenar en los canales, principalmente, el agua de lluvia.

Se muestran las características de la zona de estudio como una zona tropical, y que cubre una superficie de 1'049,000 hectáreas. Se plantea como, aunque poco aprovechados, se ha hecho una propuesta de camellones en la zona de Nacajuca Tabasco. Se caracteriza la zona como del trópico húmedo y planicie costera. Se plantea un diseño para el manejo de agua mediante canales parecido al pólder o chinampa, con la finalidad de obtener en el suelo su capacidad de campo óptima en la zona del Cuxcuchapa y lograr hacer más productiva la zona.

En Metodología se describe como se realizó la propuesta, está basada principalmente mediante experimentos o simulación. Se mencionan las variables independientes y las dependientes, así como los parámetros de cada simulación efectuada. Se hicieron experimentos proponiendo diferentes opciones con la finalidad de lograr tirantes y escurrimientos óptimos. Se definieron como variables independientes la lluvia y los gastos de diferentes periodos de retornos. Como variables dependientes se obtienen los resultados de calado y de escurrimiento de la simulación, principalmente en sus formas gráficas.

En Resultados se plantean las imágenes de lo obtenido en las simulaciones. Así, el lector encontrará resultados de escurrimientos de agua en canales y en la zona de estudio, simulaciones de una tormenta idealizada y de carácter de intensa lluvia.

En Conclusiones y Recomendaciones se hace hincapié que esta propuesta es un primer paso. Se requiere de más estudios, de una participación institucional y de una colaboración de la población mediante el sistema de gobernanza. Además, de un vínculo internacional con organizaciones holandesas o vinculadas con la Organización de las Naciones Unidas.

2 Antecedentes

2.1 Los principios de las retículas de canales

Los canales fueron muy usados antes de que se extrajera el agua del subsuelo. Con el invento del tubo y la bomba es fácil obtener agua de los acuíferos; pero se ha generado un problema a nivel mundial, la recarga de los acuíferos es muy lenta, podría decirse que tarda inclusive siglos en la mayoría de los casos. Por ello, es necesario estudiar el uso del agua como se hacía antes del tubo y la bomba. Muchas culturas retenían el agua en cuerpos de agua, la guardaban en pozos y zanjas y la trasladaban mediante drenes. Esta estrategia para manejar el agua fue usada por las más antiguas civilizaciones humanas, desde la Mesopotamia hasta en la actualidad con los pólderes holandeses. Las construcciones más avanzadas para el aprovechamiento hídrico fueron los canales formados mediante una cierta forma o arreglos con cierta disposición.

Lo primero que se visualiza es una geometría que se utiliza en repetidas civilizaciones y que tiene como consecuencia el mejor aprovechamiento del agua, se puede decir que con los canales formaban retículas para distribuir el agua entre las parcelas. Esta geometría, la técnica de retículas de canales, se sigue usando en Europa. Se puede observar en la Figura 1 y Figura 2 el arreglo de los canales, siempre es perpendicular en sus cruces formando así una retícula. Este arreglo se observa en varias civilizaciones antes de la conquista de los españoles en Latinoamérica (Morehart, 2012), y en la actualidad en los países que aprovechan el agua como forma de riego por optimización de la capacidad de campo, muy típico en Holanda (Breen, 1658), o como medida para salinizar o desalinizar humedales costeros como el caso de España (OCEANA, 2010).

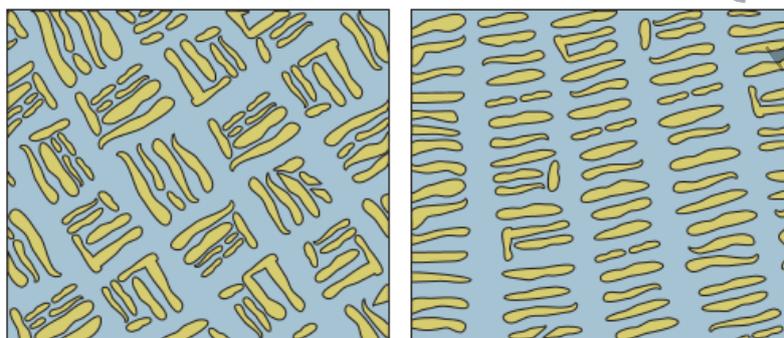


Figura 1. Arreglo de los camellones en las ciudades mesoamericanas (Moreno & Infante, 2010).

2.2 Humedales en América precolombina

Los mexicas crearon la infraestructura para el uso y manejo del agua. Las obras hidráulicas para el control de los niveles de agua en zonas lacustres, pantanosas e inundables son admirables. La cuenca de México, antes de la llegada de los aztecas estaba formada por 5 lagos: Xaltocan, Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Chalco (ver Figura 3). La mayoría de ellos de poca profundidad, por ello, en ciertas épocas algunos lagos se desecaban, en otras, de abundante lluvia se llegaban a juntar sus aguas. Para enfrentar la desecación-exceso de agua, vinculada con los cambios de clima y las fluctuaciones en las estaciones mismas, los aztecas realizaron varias construcciones. La fundación de Tenochtitlan en plena zona lacustre y su ascenso político influyeron de manera directa en el proceso de transformación ambiental con un mínimo impacto. Un primer paso fue retener el agua mediante diques (conocidos también como albarradas o albarradones), calzadas que también tenían la función de diques, además que funcionaban para la comunicación y manejo del agua, canales de navegación, riego y drenaje de distintas dimensiones y formas y de diversos materiales, presas de almacenamiento y derivación, cajas de agua, puentes de entarimado, compuertas y embarcaderos, entre muchas construcciones más. Los diques contaban con compuertas para el control de los niveles de agua de los diferentes lagos. Todo ello para permitir una vida urbana, comunicación y la interconexión entre el interior y el exterior de la isla-chinampa (CONAGUA, 2009).

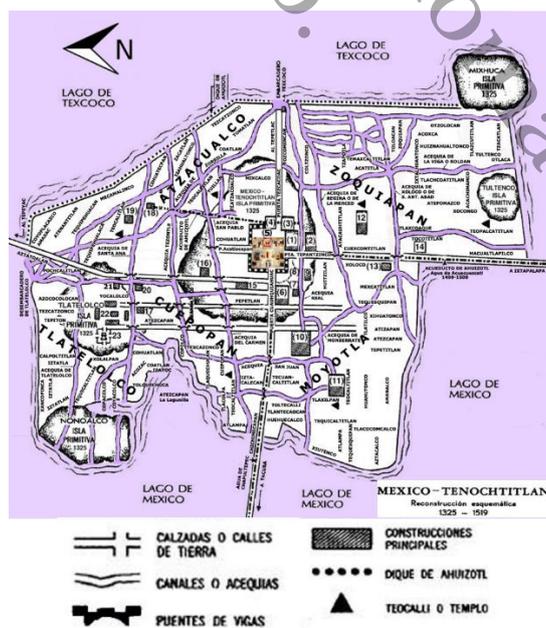


Figura 2. La ciudad de México en 1519. La figura muestra los canales y las chinamas construidos por los mexicas (Carrera, 2017).

Pero no solo los aztecas utilizaban la retícula de canales. Ahora se conocen la construcción de parcelas artificiales en Mesoamérica. Según Denevan (1970) existieron construcciones donde se formaban retículas de canales con parcelas, además de México, en Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Surinam. Además, que se extendieron por casi todo el territorio mexicano.

Como síntesis la autora Teresa Rojas Rabiela comenta (CONAGUA, 2009) que el agua se retuvo (uniendo los lagos) y se separó en compartimentos con diques (separando el agua salada de la dulce) y, simultáneamente, se canalizó y drenó por medio de alcantarillas y compuertas. Con obras hidráulicas se conseguía el control de los niveles en lagos y humedales y lograr el cultivo, la navegación, el acceso a agua para beber y la producción de peces. Con ello se garantizó la vida urbana durante muchos años.



Figura 3. Distribución de los antiguos canales en el valle de México (León Portilla, 1992).

En México varias culturas guardaron una estrecha relación con los humedales. Los olmecas surgieron en las planicies costeras inundables del sur de Veracruz y Tabasco, zona intensamente irrigada por los numerosos afluentes de los ríos Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá; y Tabasco por los ríos Grijalva y Usumacinta. También hay copiosos reportes de la presencia de canales en la zona maya, lo cual implica un manejo de los humedales. Ciudades como Zempoala, en la costa de Veracruz, surgieron a orillas de ríos y en el momento del contacto con los españoles tenían una población entre 80 y 120 mil habitantes. Durante la época de la Colonia se registró que se tomaba agua para uso doméstico y para riego de huertos del río Actopan. Su sistema amurallado le permitía contener las inundaciones y evitar que la ciudad quedara anegada. Además, contaba con un complejo sistema de drenaje para dar salida al agua de lluvia, que a su vez era utilizada para riego. Algunas culturas mesoamericanas llegaron a desarrollar un uso ecológico muy sofisticado de los humedales, como son las chinampas y los campos de cultivo elevados (terrazas elevadas). Otras culturas crearon depósitos de agua pluvial muy elaborados con recubrimientos de basalto en las paredes como los encontrados en la Huasteca meridional de Veracruz, en la Mesa de Cacahuatenco. Con el paso del tiempo han caído en desuso y ahora albergan plantas características de humedales (Moreno & Infante, 2010).

Cabe mencionar que las chinampas y campos drenados prehispánicos se han logrado identificar en diversas partes de México: Valle de Teotihuacán, río Lerma, desembocadura del río Nautla, río San Juan, llanura aluvial del río Candelaria y región del río Bec, además del Petén en Guatemala y del río Motagua y Ulúa en Guatemala y Honduras. Con base en un análisis de la literatura y de los mapas generados por geógrafos, diversos autores concluyen que fue una práctica común la construcción de terrazas elevadas para desarrollar agricultura en humedales en aquellos sitios en los que había núcleos de población y una hidrología adecuada (ver Figura 1). Se considera que el surgimiento de una agricultura intensiva en humedales se interrelacionó ecológicamente con el terraceo, la irrigación de canales y los agro ecosistemas intensivos. Un paso importante en la agricultura intensiva consistió en el control del agua, a través de una canalización sistemática. Se construyeron concentraciones artificiales de tierra, rodeadas y limitadas por canales de agua y situadas en márgenes de ríos y pantanos. Este sistema de producción agrícola aseguraba una cantidad suficiente de tierra fértil bien irrigada, de manera que no era necesario el barbecho en el trabajo de los campos, obteniéndose una producción abundante para alimentar a los ocupantes de los grandes núcleos urbanos. La agricultura intensiva en humedales fue una práctica productiva y sustentable en Mesoamérica (Moreno & Infante, 2010).

2.3 Las chinampas, un sistema sustentable

Según González (2014) las chinampas son el ejemplo representativo de un sistema de producción ingenioso y de particular creatividad práctica, que muestra el alto desarrollo tecnológico-agrícola alcanzado en épocas de los aztecas y, en la actualidad representa un modelo de producción sustentable.

Las chinampas existieron como un sistema sostenible. En forma simple se atribuye a lo que permite aumentar continuamente la producción para satisfacer una demanda creciente, pero sin sacrificar el patrimonio de las generaciones futuras. En suma: producción y conservación son los aspectos centrales del desarrollo sustentable.

Con relación a las contribuciones de las chinampas permiten el aumento de la biodiversidad no solo porque se rescatan las especies endémicas si no porque en éstas se asientan diversas especies migratoria. Los espacios chinamperos se convierten en espacios y estrategias de aprendizaje para una cultura, por eso se le considera como laboratorio de conocimientos para los diversos niveles de formación educativo ambiental. También se les asume como tecnologías limpias y renovables; ya que ayudan a mantener el cuidado de la biodiversidad, así como de las condiciones de vida; asimismo representan un ejemplo de zonas de mitigación puesto que recargan los mantos acuíferos e inhiben las inundaciones aguas abajo, igualmente actúan como amortiguadora a los impactos ambientales. Por ello se reconoce que posibilita el desarrollo local y cultural, así como del rescate de los recursos que fluyen en este ecosistema. En tal sentido se les califica como espacios que mitigan el colapso local, regional y global. Por ello se considera que las chinampas son sistemas productivos sustentables (González Carmona & Torres Valladares, 2014).

Las chinampas de Xochimilco y Tláhuac constituyen un ejemplo de sistema sustentable. Impresiona que hayan estado funcionando ininterrumpidamente en la misma zona, durante varios siglos y en la misma forma. Evidentemente que cambiaron las condiciones ambientales durante tanto tiempo. Sin embargo, un poco de observación de las características chinamperas puede aclarar el misterio de su conservación aun cuando cambien el medio ambiente. Primero, los elementos agrónomos: son sistemas de arquitectura plana, que reduce al mínimo el riesgo de erosión. Segundo, es un sistema intensivo que puede ocupar lo mismo mucha mano de obra que poca, sin que la producción se vea reducida drásticamente. Tercero y muy importante: los

chinamperos tienen el control de todos los recursos que ocupan: agua (con riego selectivo), suelo (con lodo y abono orgánico), cultivo (con almácigos y chapines), microclima (con los sauces rompe-vientos o ahuejotes) y espacio (con siembras asociadas) (Stephan, 1997).

2.4 El sistema de los aztecas y su retícula de canales

Los biólogos se preocupan por la conservación, mantenimiento o creación de humedales como una respuesta a la conservación de agua dulce y a su purificación (Rusi & ten Brink, 2013). En el valle de México existió una tecnología agrícola ideada por los mexicas y aztecas llamada chinampas, técnica ancestral utilizada para disminuir el riesgo de inundaciones y aprovechar el agua dulce para el cultivo (Morehart, 2012). En el Simposio-Taller Internacional sobre Camellones y Chinampas Tropicales (Jiménez Osorio & Rorive, 1991) se intentó llamar la atención sobre estas técnicas observadas en las antiguas civilizaciones mexicas. Dentro de las conclusiones del Simposio una de las inquietudes planteadas fue estudiar la hidráulica interna del sistema de chinampas, cuáles serían las mejores opciones para los canales y la profundidad de los mismos, entre muchas otras preocupaciones.

Los aztecas, desde su fundación en 1325, lograron expandirse, desde una pequeña isla, hasta edificar su ciudad, creciendo poco a poco por medio de la construcción de chinampas, que son parcelas de cultivo ancladas con palos y rellenas con yescas y suelo extraído, la mayoría, del fondo de los canales (ver Figura 2). La obra hidráulica mexicana incluía separación de agua dulce y salada entre los diferentes lagos de su territorio, así como el trasvase de líquido entre otros lagos, estos trasvases son con la finalidad de extraer agua cuando escaseaba o verterla cuando la había en exceso. El método de las chinampas cubría una extensión estimada de 120 km² (Pérez Sánchez, 2007). Se puede observar que el trazo de la geometría de los canales es retícula con parcelas cuadradas (ver Figura 2).

2.5 Sistema Pólder, Holanda

Pólder se asocia a terreno ganado al mar, sin embargo, esta palabra engloba otros aspectos. La estructura de un pólder incluye campos, caminos, canales, diques y poblados, planificados en forma óptima. El pólder de Beemster data de principios del siglo XVII, fue inaugurado el 19 de mayo de 1612, el más antiguos de Holanda. (UNESCO, 2010). En este pólder se aprecian las características tradicionales de la filosofía de los pólderes. La creación de este pólder marca un

importante paso entre la relación humana con el agua. El concepto es sencillo: retener el agua de lluvia en el lago Markermeer, guardarla en los canales y, cuando hay exceso, trasladarla por medio de bombeo o drenes a otros lugares o al mar.

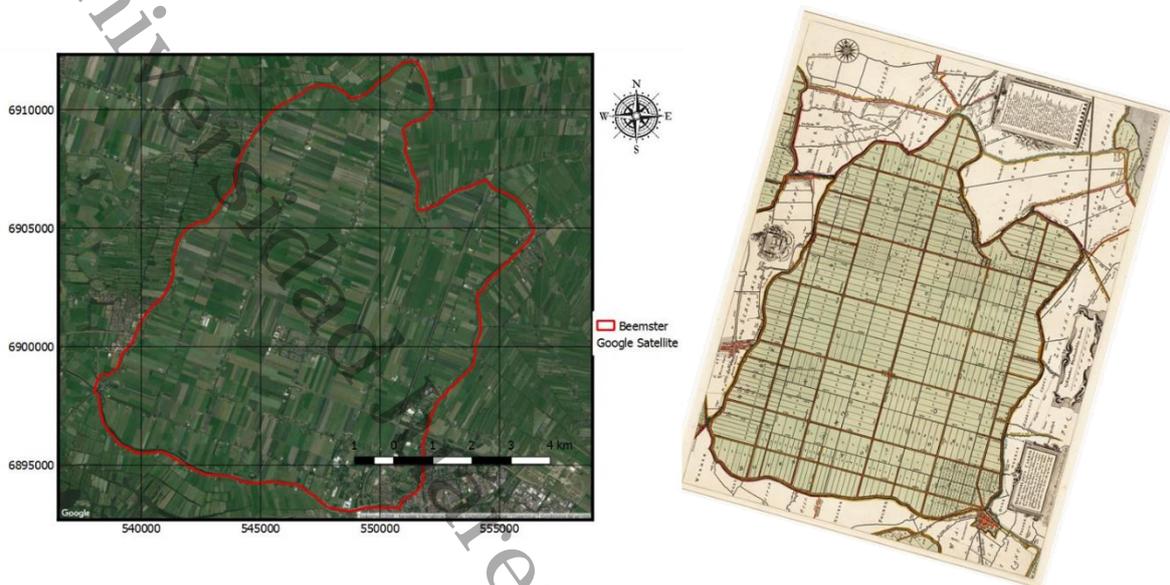


Figura 4. Ubicación Pólder de Beemster, en Holanda, creado en 1612 y aún productivo, izq. su estado actual. Derecha, imagen del mapa original de 1612. Fuente: Google earth. Editada en QGIS.

En la Figura 4 en la imagen superior se observa el lago de Markermeer, allí se indica una cortina que divide el lago, la parte alta es agua salada y la parte baja agua dulce. Alrededor del pólder, en línea gruesa, se indica el canal que contiene agua dulce del lago Markermeer, este canal es más elevado (canal primario) que los canales de las parcelas del pólder con la finalidad de lograr riego por gravedad al pólder, además de darle carga hidráulica y contar con una cortina de agua dulce para contener la penetración salina. Como se aprecia en la Figura 4 abajo a la izquierda, el poder sigue siendo productivo. Al principio, cuando se construyó el pólder el bombeo se realizaba por medio de molinos utilizando energía eólica, actualmente existe un sistema de bombeo actualizado. De esta forma, el agua se retiene en el lago Markermeer, se guarda en los canales y se trasvasa mediante bombeo, a los pólderes vecinos o al mar.

El sistema pólder tiene la estrategia de aprovechar el agua de lluvia, al tiempo que previene problemas de contaminación por sal y, actualmente, darle espacio a los ríos recuperando cuerpos de agua históricos. Los países que sobresalen en la aplicación de esta técnica son los costeros del mar del norte.

El pólder de Beemster presenta parcelas con un patrón geométrico racional de rectángulo áureo, con relación de sus lados de 2:3 así, las dimensiones de un lote típico con perímetro de canales

principales son de 900 por 1,456 metros, este lote se divide en parcelas más pequeñas rectangulares de 100 metros de ancho (UNESCO, 2010). Un conjunto de estos lotes crea una unidad mayor llamado el Pólder. Aunque pueden existir modificaciones en las medidas, el patrón es muy similar. Los lotes son casi paralelos a la línea de costa.

2.6 Recuperación de Humedales, España

Existe, en España, un área rescatada de un negativo impacto ambiental. Es conocida como la finca Veta la Palma, de más de 10 mil hectáreas circundada por el río Guadianar. Esta zona ha sufrido un largo proceso histórico de transformación. Durante los años cuarenta y cincuenta fue cultivada con arroz, posteriormente la ganadería extensiva, que aún sigue siendo una de las actividades de la zona. Pero en la actualidad es transformada en actividad acuícola con la empresa Pesquerías Isla Mayor, S.A. (PIMSA). Esta empresa pone en marcha la actividad acuícola en la finca a partir de 600 hectáreas, hasta conformar actualmente una zona de 3,200 hectáreas inundadas con agua de buena calidad, que alberga una población de peces y crustáceos que son la base de los cultivos acuícolas. Además, 3,100 hectáreas están dedicadas actualmente a agricultura de secano y 400 hectáreas al cultivo del arroz, mientras que las restantes 4.600 conservan el biotopo original de la marisma (Veta La Palma, Parque Natural, 2010)(ver Figura 5).

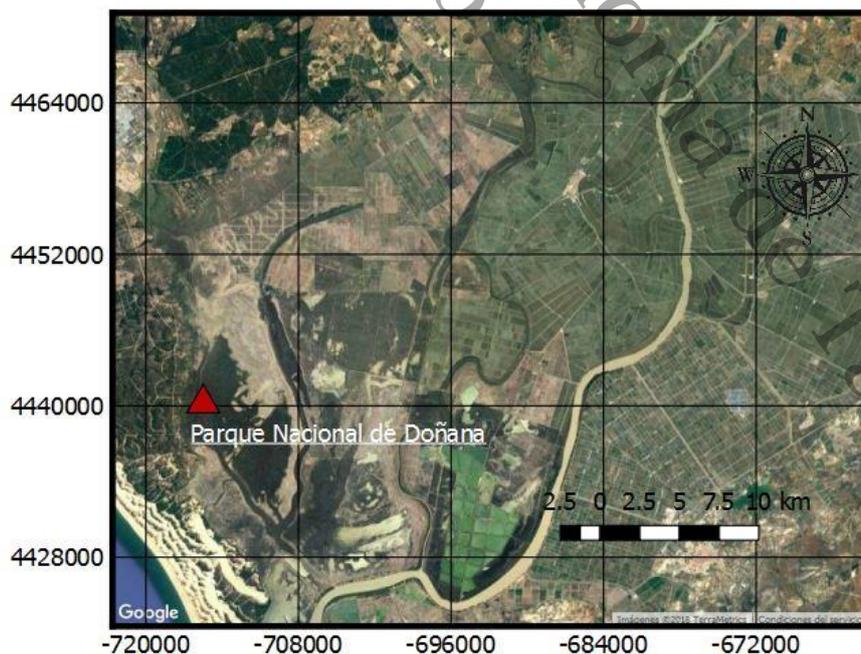


Figura 5. Canales y drenes en Veta la Palma (Google Earth).

La acuicultura ha favorecido la presencia de especies nidificantes y migratorias. La población total de aves en Veta la Palma alcanza los 600.000 individuos e incluye casi 250 especies. El humedal artificial de esta finca juega un papel primordial para la conservación de las aves europeas, asegurando el alimento tanto a las especies que completan su ciclo de desarrollo juvenil y pueden luego migrar, como a aquellas que, estando ya en migración entre África y Europa, se instalan temporalmente allí para obtener alimento. En un estudio realizado por la Estación Biológica de la zona, se señala que “...para mantener la abundancia y diversidad de aves acuáticas en la región, es evidente la necesidad de gestionar zonas como Veta la Palma para que proporcionen una alta biomasa de alimento (invertebrados y macrófitos) para las aves”. Veta la Palma está dentro de la Reserva de la Biosfera de Doñana y de la Red Natura 2000, y es un Humedal RAMSAR de Importancia Internacional (Veta La Palma, Parque Natural, 2010).



Figura 6. Canales y drenes en la Veta la Palma (Veta La Palma, Parque Natural, 2010).

Los canales de la Figura 6 en ocasiones conducen agua, en otras son drenajes; también las terrazas no tienen el mismo nivel. Para el arroz son fácilmente inundables, es decir, según el cultivo se controlan los tirantes por medio de compuertas y drenes. Las funciones de los canales contemplan también el control de la salinidad del agua, entre el agua dulce del río y la del mar. Se piensa que la disminución de la contaminación del río es debida a la gran cantidad de aves, ellas al alimentarse de plantas y animales dispersan los contaminantes a metros, e inclusive a kilómetros. La Finca es una muestra del manejo sistémico y sostenible.

2.7 Beneficios de los camellones chontales (Chinampas)

Los camellones chontales en la tucta Nacajuca, actualmente, hay en ellos una diversidad de cultivos que van de granos a frutos, plantas comestibles, entre las que destacan por su importancia: maíz, frijol, calabaza y cañita. La cañita (*Cyperus sp.*) es una planta que se cultiva en los camellones para elaborar petates y artesanías. En los camellones existen una variedad de árboles y plantas frutales como: plátano, naranja, limón, capulín, cañita, hoja blanca, algunos son exclusivamente para alimento, otros tanto para consumo no alimenticio como para su venta.

El manejo de los camellones se ha modificado con la introducción de nuevas plantas como la caoba, el cedro, el café y el cacao. La gente buscó la forma de aprovechar el terreno, con el transcurso de los años han plantado otras especies para diferentes usos, principalmente maderables como: caoba (*Swietenia macrophylla*), cedro rojo (*Cedrela mexicana*), tatuán (*Columbrina ferruginosa*) y guatope (*Inga fissicalix*).

La variedad de especies que se crían en los camellones son: pejelagarto (*Atractosteus tropicus*), una tortuga conocida localmente con el nombre de pochitoque (*Kinosternom leucostomun*), mojarra (*Cichlasoma fenestratum*), tenguayaca (*Petenia splendida*), entre otras especies como las tortugas hicotea (*Trachemys scripta*) y castarrica (*Cichlasoma urophthalmus*).

El sistema de camellones en la Tucta ha permitido una relación estrecha entre la gente y los recursos, por un lado con el conocimiento que tienen los indígenas del ambiente (flora, fauna, clima) deciden qué plantas cultivar, en sus inicios se habían recomendado plantas poco familiares para los parceleros (Pérez Sánchez, 2007).

2.8 Estrategias para mitigar el riesgo de inundación

Dos aspectos se deben de considerar para mitigar el riesgo por inundación, la velocidad del flujo y el tirante elevado del caudal. La aceleración del flujo es producto de la gravedad y su deceleración se puede realizar aumentando la fricción o reteniendo parcialmente el flujo. La superficie pavimentada no tiene el suficiente coeficiente de Manning para disminuir la velocidad del flujo como lo puede hacer con vegetación o inclusive zanjas. La estrategia entonces, es retener el agua lo más posible y permitir, en la retención, que se infiltre en el subsuelo (Water Board De Dommel, 2016).

El agua de lluvia sobre la superficie de la tierra cae con gran energía. Es necesaria que sea detenida para disipar la energía cinética que pudiese expresar haciéndolo posible, la mayor de las veces, mediante estructuras que no modifiquen el medio ambiente (ver Figura 7). En las partes de su recorrido puede retenerse mediante bosques, cuerpos de agua, canales para la agricultura, humedales, entre otros. De preferencia que sea retenida por vegetación natural más que por campos de cultivo. Los suelos con vegetación natural por lo general exhiben una alta porosidad a causa de la intensa actividad biológica y la falta de interferencia por el ser humano. Por lo tanto, tienen cualidades físicas superiores, comparándolos con los suelos usados para los cultivos o para pastoreo (Shaxson & Barber, 2005). El agua en su ciclo puede tener muchas rutas, todas ellas importantes.

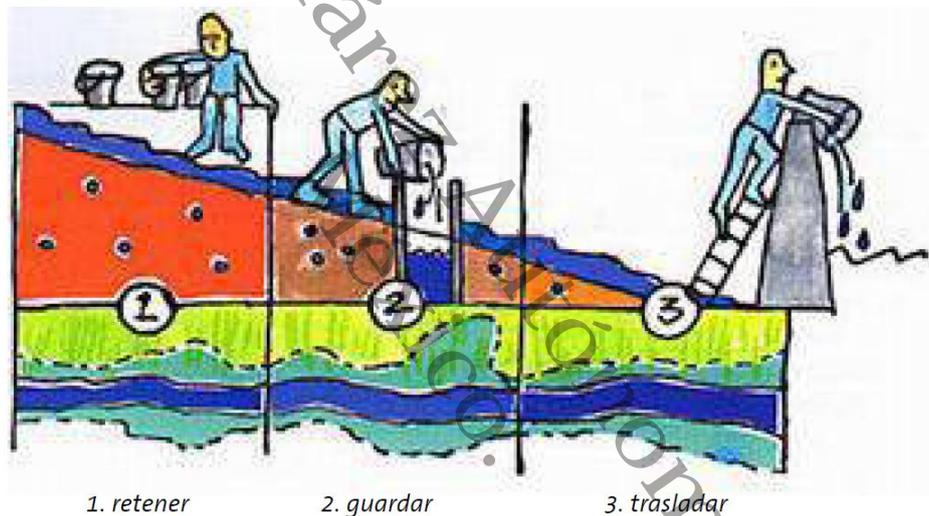
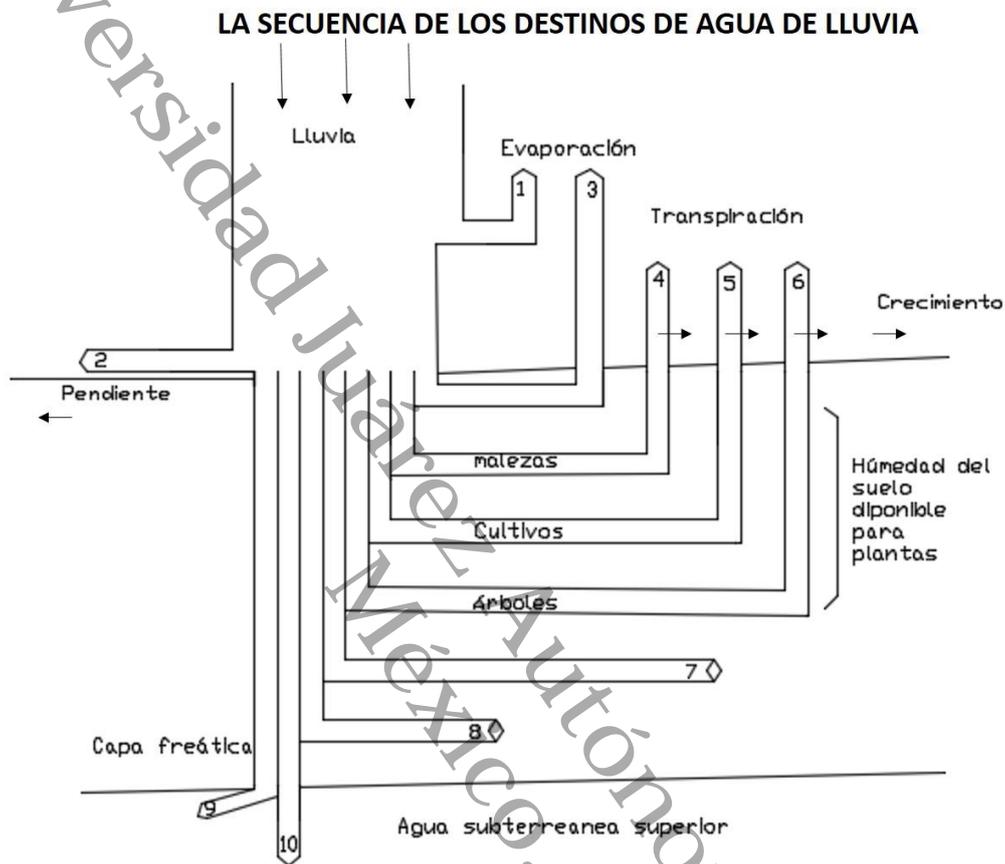


Figura 7. Retener, guardar y trasladar el agua como estrategia contra inundaciones según Holanda (Water Board De Dommel).

2.9 Distribución del agua de lluvia

El agua de lluvia tiene varios destinos como lo muestra la Figura 8. Poco puede hacerse para incrementar o disminuir la lluvia o el número de eventos de lluvia. Se entiende por la agricultura de secano a la agricultura de temporal, para mejorar las cosechas se requiere de retener lo mayor posible la lluvia en el suelo, los esfuerzos deben ser concentrados en el incremento de la proporción de agua que entra en el suelo (infiltración), minimizando la pérdida de humedad por escurrimiento y evaporación, y mejorando la disponibilidad de agua del suelo y la eficiencia

del uso del agua mediante el mejor manejo del suelo. Pero en el caso de Tabasco y de gran parte de su territorio un objetivo viable es proponer un sistema de riego para garantizar su Capacidad de Campo todo el año (Shaxson & Barber, 2005).



1. Evaporación directa de las superficies húmedas de las hojas.
2. Escorrentía superficial/ tormentas.
3. Evaporación directa de la superficie del suelo.
- 4, 5, 6. Humedad el suelo disponible para las plantas al alcance de las raíces de las malezas, cultivos, arboles existentes.
7. Humedad del suelo retenida a cualquier tensión, pero debajo de las raíces de plantas existentes.
9. Agua no capturada por las raíces y los poros pequeños moviéndose a agua subterránea y flujo de corrientes.
10. Lixiviación a agua subterránea debajo del piso de captura.

Figura 8. Los destinos del agua de lluvia. Con base en la FAO (Shaxson & Barber, 2005)

2.9.1 Aprovechamiento del agua de lluvia

Las características del agua de lluvia la hacen perfectamente utilizable para usos doméstico e industrial. Es un agua que cae de forma gratuita, y que es conducida sistemáticamente al alcantarillado y, posiblemente, desperdiciada.

Hay países pioneros en sistemas para contener el agua de lluvia, como Alemania, donde algunos distritos incluso, financian estas instalaciones, ya que la oferta de agua no crece al ritmo de las aglomeraciones urbanas. La captación y aprovechamiento del agua de lluvia representa una opción real para abastecer con agua, en cantidad, calidad y de manera constante a las personas que no cuentan con este vital líquido; y puede constituirse en un importante aliado para el abasto de agua potable en situaciones de emergencia. Actualmente, al agua de lluvia se le ve como un recurso natural no aprovechable para consumo y uso doméstico, cuando en realidad representa una de las soluciones más viables y económicas para abastecer con agua a flora y fauna, sobre todo en aquellas regiones donde las fuentes superficiales de agua y los mantos acuíferos están contaminados y se encuentran sobreexplotados (Mezansa, 2011).

Diferentes formas de captación de agua de lluvia se han utilizado tradicionalmente a través de la historia de las civilizaciones; pero estas tecnologías sólo se han comenzado a estudiar y publicar recientemente. Con base en la distribución de restos de estructuras de captación de agua de lluvia en el mundo y el continuo uso de estas obras en la historia, se puede concluir que las técnicas de captación de agua de lluvia cumplen un papel importante en la producción agrícola (Ballén, 2006).

2.10 Captación del agua de lluvia

La opción para la retención del agua de lluvia es a través de cuerpos de agua y se puede aplicar en combinación con otras medidas de restauración construidas. Por ejemplo, mediante canales primarios, y tratando de respetar los conductos naturales, conducir el agua a depósitos con la finalidad de almacenarla y disipar la energía cinética. Se pueden construir canales secundarios para conducir el agua a retícula de canales y utilizarla en la agricultura o, en el caso de ciudades, como la creación de un ambiente natural en la urbe urbana. que tiene el objetivo de desalojar aguas, convirtiéndolo en un canal primario y formando, de esa manera, redes de almacenamiento y distribución de agua. La restauración de ex-meandros o cursos de agua naturales son los primeros que hay que contemplar, con la intención de restaurar la morfología natural y lograr una conectividad lateral para el guardado y distribución del agua; estas acciones

también aumentan el área de infiltración para la recarga de los acuíferos y el aumento del nivel de aguas freáticas. Algunas técnicas para mejorar la retención de agua son (Peterson & Kwak, 2010): 1) Evitar los cambios en el uso del suelo y evitar los cambios de los escurrimientos naturales. 2) Mejorar la gestión de las aguas pluviales. 3) Reducir y limitar la cantidad de superficies impermeables en la cuenca. 4) Evitar las prácticas de uso de la tierra que se intenten desecar y un reglamento para limitar el porcentaje permitido de superficie impermeable en la cuenca. 5) Desmantelar algunas carreteras. 6) Usar las opciones de pavimento permeable cuando sea posible. 7) Restaurar las conexiones de flujo de las llanuras de inundación. 8) Crear canales laterales a los ríos o drenes. 9) Ampliar los cursos de agua, aumentar el área y la profundidad de las zonas inundables. 10) Eliminar las estructuras de ingeniería que impiden conectividad lateral. 11) Situar canales a lo largo de los terraplenes. 12) Regenerar con vegetación nativa áreas desnudas dentro de la cuenca.

El caudal medio anual de los cauces se incrementa como resultado de un mayor escurrimiento debido a la cuasi-impermeabilización de la superficie y la urbanización. Las acciones positivas son proteger, restaurar y crear humedales y otras zonas de infiltración, aprovechar remansos, conectarlos con cuerpos de agua y humedales. Sintetizando, la estrategia es hidratar el delta de Tabasco con tendencia a adquirir sus condiciones naturales.

2.11 Suelo Saturado

Un suelo está constituido por fases, la intersticial y la mineral. La intersticial se compone, a la vez, en aire y agua. Cuando la fase intersticial está constituida por solo agua se dice que el suelo está saturado. Así, después de una lluvia abundante el agua llega a ocupar todos los poros del suelo, se dice entonces que el suelo está saturado (AgroEs, 2016). Así:

$$S = \frac{V_w}{V_v} 100\% \quad \text{Ec. 1}$$

Donde V_w es el volumen de agua de una porción de suelo y

V_v es el volumen de vacíos de la misma porción

S , grado de saturación del suelo expresado en porcentaje

Una causa importante de la baja producción y del fracaso de los cultivos en la agricultura en los trópicos es la lluvia escasa y errática. Sin embargo, en muchas áreas el manejo de tierras y

cultivos no favorece el flujo del agua en la zona radical del cultivo. Por ello, los rendimientos pobres están relacionados con una insuficiencia de la humedad del suelo más que con una insuficiencia de la lluvia. La agricultura tropical y subtropical, dependen de un adecuado suministro de agua en la zona radical del suelo. Se ha estimado que el agua del suelo limita la producción de los cultivos en aproximadamente tres cuartas partes de los suelos cultivables del mundo y es el principal factor responsable de los bajos rendimientos en las temporadas secas y en los trópicos y subtrópicos semiáridos (FAO, 2006).

2.12 Aspectos fisiográficos de la zona de estudio

2.13 Mapa de localización

La zona de estudio abarca los escurrimientos de tres ríos (actualmente sin corriente): Cuxcuchapa, Seco y Cunduacán. Se consideró esta zona porque es parte de la cuenca del río Carrizal, el cual aguas arriba es la continuación del río Grijalva, nombrado así por el estado de Chiapas y cambiando su nombre al ingresar a Tabasco como río Mezcalapa. A la zona de estudio se puede acceder por la carretera 180 Coatzacoalcos-Villahermosa, Esta carretera hace borde con la zona de estudio hacia el sur. La carretera 187 Cárdenas-Comalcalco por la parte Oeste; y la carretera La Isla-Cunduacán-Comalcalco por la parte Este; como se muestra en la Figura 9.

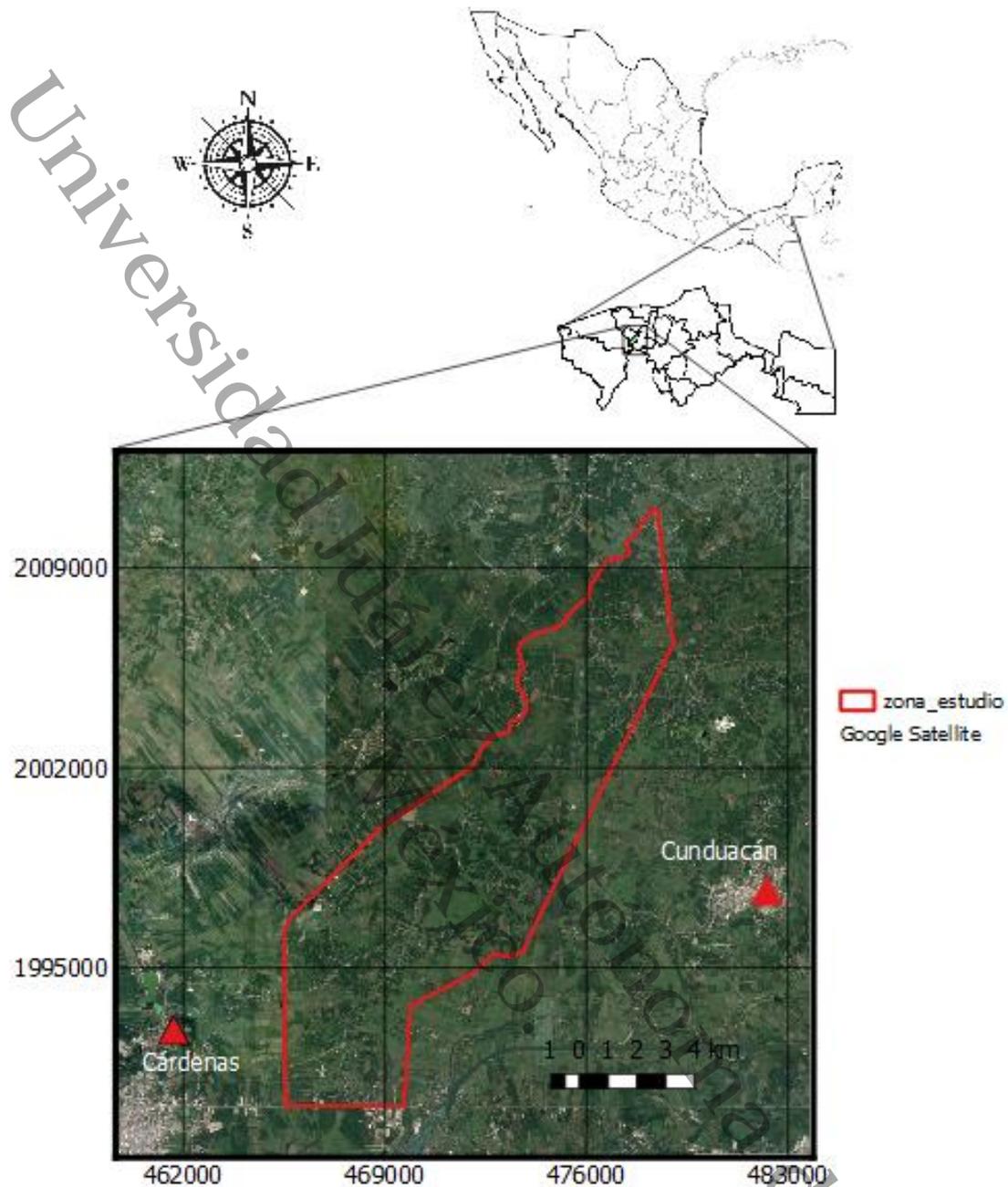


Figura 9. Ubicación de la zona de estudio. Google earth. Editada.

2.13.1 Subregión de la Chontalpa

El área de estudio del río Seco está contenida en dos Regiones Hidrológicas: RH-29 Coatzacoalcos y RH-30 Grijalva–Usumacinta. En la región RH29 la cuenca: Río Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona drena a la zona centro y oeste del área, y se subdivide en las sub-cuencas a) Laguna del Carmen y Machona, b) Río Santa Ana, c) Río Tonalá, d) Río Tancochapa Bajo, e) Río Tancochapa y f) Río Zanapa.

La Subregión Chontalpa es, territorialmente hablando, la segunda en extensión de las que constituyen el Estado, ya que ocupa 7,482 km², es decir, la tercera parte del territorio tabasqueño. Cuenta con 881879 habitantes (INEGI, 2015). Está conformada por cinco municipios: Cunduacán, Cárdenas, Comalcalco, Huimanguillo y Paraíso. La zona de estudio se encuentra en esta sub-región, por ello la importancia de describirla.

2.13.2 Hidrografía

El Estado es de las regiones de mayor precipitación pluvial en América. Limitado al sur por las cordilleras de la cuenca del Grijalva. La frecuencia de los vientos monzones, Nortes y Alisios, así como la abundancia de vegetación y la temperatura alta, han sido condiciones únicas para originar alta precipitación. Tabasco tiene tres sistemas hidrológicos importantes: fluvial, afluentes y litoral.

La infraestructura carretera aumenta el desorden de los escurrimientos, modificando el terreno y desecando algunas zonas e inundando otras; de forma tal que las sub-cuencas se ven modificadas. Del 20 al 25% de la región padece inundación la mayor parte del año y aproximadamente cada media década se inunda más de la mitad del territorio. Esto debido a la poca elevación que tiene el territorio con respecto al nivel del mar (CONAGUA, 2013).

Los ríos de la planicie tabasqueña y sus afluentes, y antes de su desembocadura con el Golfo de México, provocan en períodos álgidos inundaciones, ocasionadas tanto por la lluvia local como por el desbordamiento de los ríos. Uno de los eventos más severos, social y económicamente hablando, son las inundaciones. Se han elaborado propuestas de planes contra inundaciones sin un éxito contundente.

La zona de estudio se eligió para representar varios de los problemas que existen en la cuenca baja del Grijalva-Usumacinta. Se hace notar que una propuesta consistente tiene que abarcar toda la Cuenca dada las interacciones que existen en los escurrimientos. Por ello, este estudio es limitado, pero no menos importante; dado que los problemas y soluciones de la zona de estudio se presentan en varias partes de la Cuenca Baja.

La distribución aparentemente desordenada de los escurrimientos superficiales obedece a lechos de ríos muy amplios, que no es posible observar sin tener una mirada amplia de la geología y de la hidrología de la cuenca baja del Grijalva. La desecación de la planicie tabasqueña ha dado lugar a la formación de cuerpos de agua aislados y de variadas dimensiones,

aunado a ello la extracción de arena en diversos bancos forma cuerpos de agua, la mayoría no tiene circulación del agua, terminando con una carga orgánica indeseable o eutrofia.

La zona de estudio incluye parte de las cuencas del río Cuxcuchapa (RH30-Dz) y del río Cunduacán (RH30-Dw). Actualmente, los caminos construidos y que se siguen construyendo modifican los escurrimientos, aunado a que se ha desecado lo que antes eran zonas de humedales, provocando dicha desecación cambios ambientales y sociales. La zona de estudio se eligió con la finalidad de proponer la recuperación de causas ecológicas en la zona de la Chontalpa y zonas cercanas mediante una propuesta pertinente.

2.13.3 Dimensiones del proyecto (área y perímetro) y Orografía

Las dimensiones de la zona de estudio es un área de 104.90 km². Perímetro 56.60 km.

La topografía del área de estudio es casi plana con ligeras pendientes en dirección a la costa y escasas elevaciones que no sobrepasan los 40 msnm (ver Figura 10).

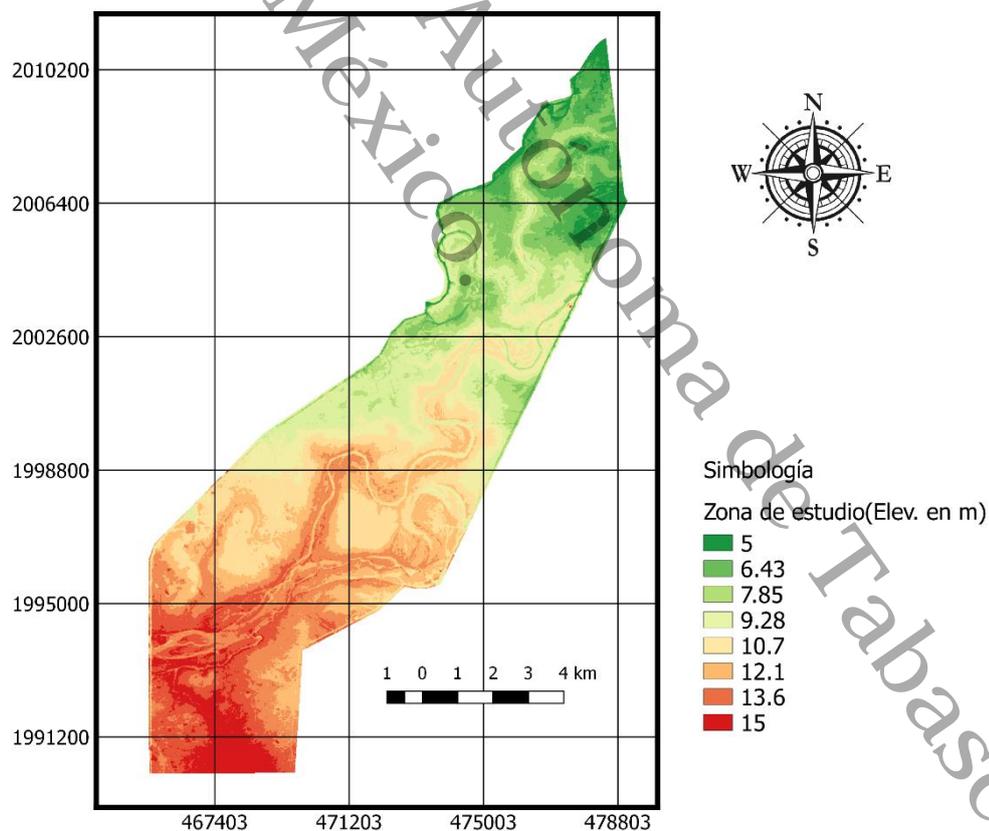


Figura 10. Elevación de la zona de estudio.

2.13.4 Características y Usos del Suelo

Los suelos dominantes en la zona de estudio son el Gleysol molico y Gleysol vertico como se puede observar en la Figura 11.

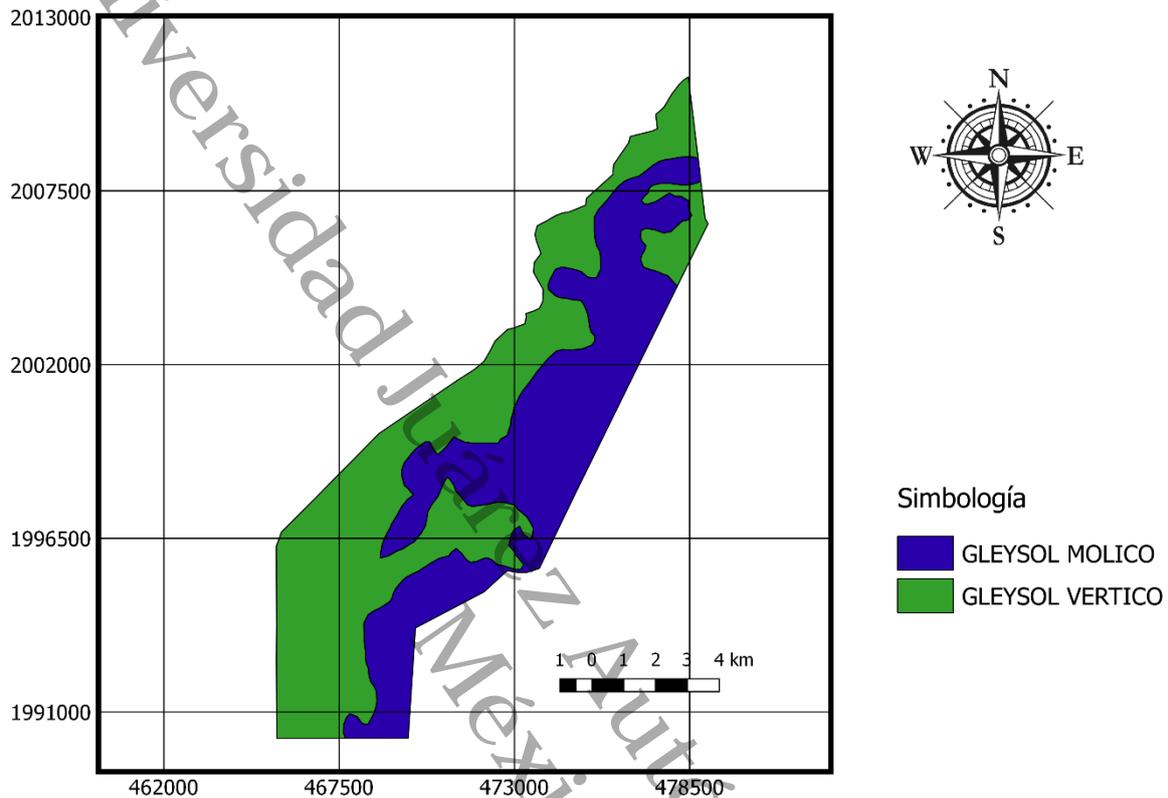


Figura 11. Edafología 1:250000 – 1:1000000. Instituto nacional de investigaciones forestales y agropecuarias y la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México. INIFA-CONABIO, 1995.

El uso del suelo se divide en la siguiente forma: el 35% es agrícola, el 57% es pecuario, el 1% forestal, el 7% para áreas urbanas, cuerpos de agua y áreas improductivas (ONUDI, 2010).

2.13.5 Clima

El Estado se caracteriza por un clima cálido húmedo con influencia marina, con temperaturas promedio elevadas y que varían poco a lo largo del año (entre 24° y 28°C). Esto se debe a que se ubica en la zona tropical, y que su terreno tiene poca elevación con respecto al nivel del mar. Por su cercanía al Mar de las Antillas, zona donde se generan los ciclones tropicales (García de Miranda, 1986), los vientos azotan las costas de Tabasco.

El estado de Tabasco tiene tres tipos de clima, dos de ellos cubren más del 95 % del territorio: cálido húmedo con lluvias todo el año Af (m)¹ y cálido húmedo con lluvias abundantes en verano Am(w). El primero de ellos Af(m) está distribuido en las áreas montañosas correspondientes a la provincia Sierra de Chiapas y Guatemala. Esto permite la distribución de especies de selva húmeda o selva alta perennifolia. El segundo tipo de clima Am(w) está distribuido en la gran planicie de la llanura del Golfo, y al igual que el clima anterior presenta periodos marcados de precipitación y sequía (García, 2004)

En la zona de estudio el territorio tiene un clima Am(f), el cual es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% con respecto a la anual, es muy característico de los lugares húmedos situados al sur del Trópico de Cáncer en los que la variación de la temperatura es moderada a lo largo del año. Su temperatura máxima promedio mensual es de 33.6° C en el mes de mayo y la mínima promedio mensual de 21.7° C en los meses de diciembre y enero. Tiene una precipitación pluvial anual de 2,237 mm, siendo el mes de septiembre el más lluvioso y el mes de abril el que registra menor precipitación.

Los vientos dominantes son en dirección del noroeste los cuales generalmente van acompañados de lluvias continuas a las que se les da el nombre de nortes, éstos se producen, predominantemente, en los meses de octubre hasta marzo. El régimen de precipitaciones tiene un promedio máximo mensual de 342 ml en el mes de septiembre y una mínima mensual de 6 mm en el mes de abril.

Las mayores velocidades del viento se concentran en los meses de noviembre y diciembre con velocidades que alcanzan los 30 km/h. presentándose en junio las menores, con velocidades de 18 km/h. La humedad relativa promedio anual se estima en 82%, con máxima 86% en enero y febrero y desciende hasta 77% en el mes de mayo.

2.13.6 Sector productivo

El municipio, y por inclusión la zona de estudio, es uno de los principales productores de cacao en el Estado, ocupando el 2°. lugar estatal en cuanto a superficie cultivada y volumen de producción; también se cultiva plátano, caña de azúcar; pimienta, coco, maíz, frijol y naranja, y en menor escala sandía y melón. En 1997 la superficie sembrada fue de 22,005 ha, de ello, la actividad cacaotera ocupó 11,457 ha, que representaron el 52.06%; del total de la superficie

¹ Nota: Para mayor entendimiento de las siglas de acuerdo al clima ver el anexo 2

agrícola municipal; el maíz con 4,346 ha ocupó el 19.75%; dedicándose 3,150 hectáreas al plátano que representó 14.31%; 1,888 hectáreas de caña de azúcar que representó el 8.57% de la superficie y los frutales con 708 ha representado el 3.22% del total de la superficie agrícola municipal (ONUFI, 2010).

2.13.7 Flora

La zona de estudio no presenta áreas con vegetación original, con excepción de una pequeña porción de selva media perennifolia colindante con el municipio de Cárdenas. En la actualidad, los principales ecosistemas lo conforman tulares, popales y zonas ribereñas. La laguna Chibirital poblada por abundante flora hidrófita, es considerada reserva ecológica.

2.13.8 Fauna

Gran parte de la fauna en este municipio se encuentra en amenaza de extinción:

Cuadro 1. Fauna en Cunduacán, Tabasco (ONUFI, 2010).

Nombre Común	Nombre Científico Mamíferos	Status actual
Tlacuache	<i>Didelphis marsupialis</i>	Amenazada
Mapache	<i>Procyon lotor</i>	
Aves		
Zanate	<i>Cassidix mexicanus</i>	No Amenazada
Pijije	<i>Dendrocygna autumnalis</i>	Amenazada
Garza Blanca	<i>Casmerodiis albus</i>	No Amenazada
Pea	<i>Pisilorhinus mono</i>	Amenazada
paloma	<i>Columba livia</i>	Amenazada
Chachalaca	<i>Ortalis vetula</i>	Amenazada
Toloque	<i>Basicus vuttatus</i>	Amenazada
Nauyaca	<i>Bothrops sp</i>	Amenazada
Garrobo	<i>Ctenosaura similis</i>	Amenazada
Iguana	<i>Iguana iguana</i>	Amenazada
Lagarto	<i>Lacertilia</i>	Amenazada
Sauyan	<i>Boa constrictor</i>	Amenazada
Pochitoque	<i>Kinosternon acutum</i>	Amenazada
Tortuga (hicotea)	<i>Trachemys scripta</i>	Amenazada

3 Justificación

El problema a resolver es la factibilidad de utilizar el riego para optimizar la capacidad de campo en la zona del Cuxcuchapa por medio de una retícula de canales. Para el recurso agua se pretende retener el agua de lluvia, guardarla en canales y trasladarla en caso de exceso. En caso de sequía utilizar el agua del río Mezcalapa para mantener la capacidad de campo. Como efectos colaterales se pretende resolver problemas como: salinización del suelo, subsidencia, riesgos por inundación, baja productividad agrícola, entre otros, beneficiando así a la población.

Con base en el Simposio-Taller Internacional sobre Camellones y Chinampas Tropicales (Jiménez Osorio & Rorive, 1991) se concluye que los camellones chontales son un modelo alternativo para el manejo agropecuario que debe considerarse en el futuro diseño de sistemas de producción sostenible para el trópico mexicano. Así como hacer planes de investigación, considerando estos elementos:

- Agua: estudiar la hidráulica del sistema ¿cómo se mueve el agua en los diferentes lugares?, ¿Cuál sería la mejor opción?, ¿Cómo afecta la profundidad de los canales en la producción del sistema?
- Suelo: hacer un manejo de los bordes de los camellones. Y cómo se puede mejorar la fertilidad del suelo.

En las últimas investigaciones se ha visto que la propuesta de las chinampas fue la técnica utilizada por los prehispánicos mesoamericanos mexicanos. En las investigaciones de Morehart se estudia la alta productividad de la agricultura por medio de chinampas en Xaltocan, México, mostrando que existían excedentes en la producción de maíz de la misma cantidad de la producción necesaria para sus pobladores. Por lo que actualmente es una buena solución para los problemas de producción sostenible.

Desde décadas se ha visto la urgente atención en auxilio del estado de Tabasco, tanto por razones patrióticas, como por conveniencia para el país entero (Echeagaray Bablot, 1955). Su riqueza petrolera y el bioma son importantes para el país, sin embargo, no siempre se observó dicho valor. Mucho de su bioma nativa está en peligro de extinción. Tabasco es comparable a Holanda, desde cierto punto de vista. Los problemas de las inundaciones, el drenaje y los suelos de Tabasco, son mucho menos difíciles de resolver que los de Holanda.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Plantear un diseño para el manejo de agua mediante canales tipo pólder con la finalidad de optimizar la capacidad de campo en la zona del Cuxcuchapa.

4.2 Objetivos específicos

- Demostrar, mediante simulaciones en los canales primarios (el dren W15 y el Veladero) un arreglo de acequias tipo pólder para el manejo del agua, o modelaje de retícula de canales.
- Modelar canales secundarios para la distribución del agua en canales terciarios.
- Simular la lluvia en tiempo real como dato para aprovechar el agua de lluvia.

5 Metodología

En la Figura 12 se muestra el diagrama de flujo para llevar a cabo el proyecto como resumen de la metodología. 1) Para la zona de estudio se propone una retícula de canales según se ha comentado en párrafos anteriores. 2) Para ello es necesario conocer la topografía de la zona de estudio mediante un raster² con la suficiente calidad para determinar, en 2 dimensiones, los escurrimientos. 3) Para el estado de Tabasco INEGI ofrece la topografía según el Lidar en puntos (x, y, z), pero la cartografía puede ser extensa, por lo que es necesario recortar la zona de interés. El recorte queda representado numéricamente en una matriz rectangular que contiene las elevaciones, a su representación raster se le llama Modelo Digital de Elevaciones (MDE). 4) El Lidar no contiene la profundidad de los cuerpos de agua o batimetría, por lo general la batimetría está en curvas de nivel, ésta se debe incorporar a la matriz del raster. Para ello, se desarrolló un procedimiento para incorporar la información batimétrica a la matriz del Lidar. 5) Para el estado de Tabasco existe el portal (Portal Juchimán, 2017) creado para disponer de los datos de lluvia de las estaciones automatizadas de la Comisión respectiva (CONAGUA). De los histogramas generados por el portal se elige la estación meteorológica más cercana para determinar la lluvia más abundante de la zona de estudio. 6) Con base en el MDE se elabora una triangulación en QGIS llamada RTIN. Esta triangulación es la base para el mallado en Iber, RTIN es una forma rápida de elaborar una malla que se adapte a la topografía y sus variaciones,

² Nota: Para términos desconocidos ver el anexo 1.

y de fácil lectura por Iber. 7) Una vez mallado el terreno de la zona de estudio se puede simular la lluvia, previamente obtenido el hietograma del punto (5). 8) La modelación de los drenes por periodos de retorno se refiere a los gastos calculados para los diferentes periodos de retorno, que van desde 5 a 1,000 años. 9) Posteriormente, se elabora en si la propuesta, se trazan los canales para diseñar la retícula formando parcelas lo más cerca a cuadrados que se logre, según lo permita el terreno y la infraestructura que lo contenga. 10) Las parcelas han sido modificadas por los campesinos y diferentes obras realizadas, por ello, se deben hacer pequeñas modificaciones para que el agua circule en forma óptima a los canales, según la conveniencia de los agricultores. 11) Ahora, se simula la lluvia en las parcelas niveladas para ver el comportamiento de los escurrimientos con lluvia, observando tiempos y tirantes de inundación.

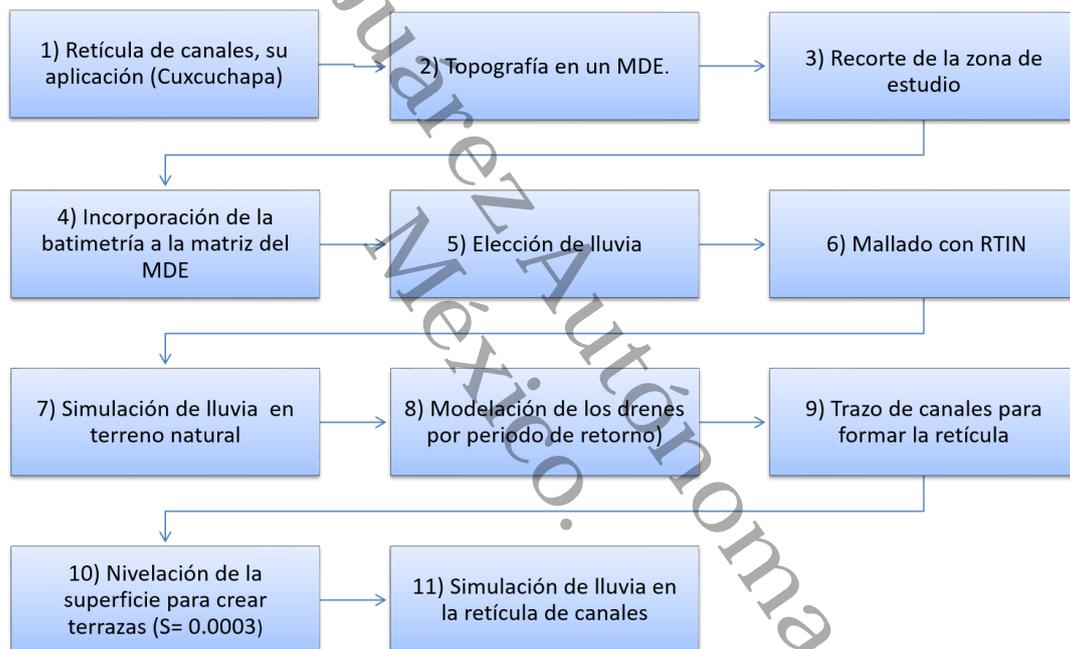


Figura 12. Diagrama de flujo.

5.1 Método para generar el modelo digital de elevaciones (MDE)

Para realizar las simulaciones es necesario que la topografía (MDE) sea de una malla lo suficiente cerrada y precisa para determinar con mayor precisión los escurrimientos. INEGI (2011) cuenta con información Lidar para el Estado (ver Figura 13). La malla ofrece una altura por cada cuadrado de 5 metros en toda la superficie del estado de Tabasco. Esta información se da en varios formatos. El formato que se desea para generar los escurrimientos hidrológicos es el de los datos de los puntos x, y, z.

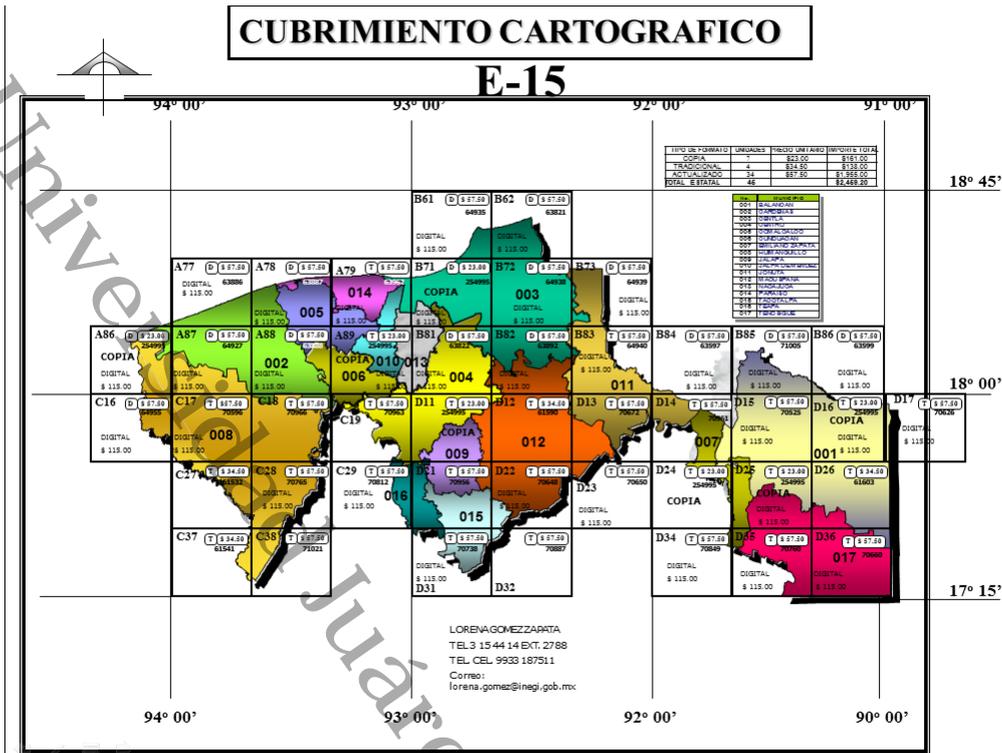


Figura 13. Claves de las Cartas Topográficas que proporciona el INEGI. Fuente: INEGI

Las carpetas necesarias de la zona de estudio se muestran en el Cuadro 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** De ellos se extrae la información de la topografía.

Cuadro 2. MDT y MDE según claves del INEGI y pertenecientes a la zona de estudio.

			E15A79D4	E15A79E3		
E15A88C1	E15A88C2	E15A89A1	E15A89A2	E15A89B1	E15A89B2	E15A89C1
E15A88C3	E15A88C4	E15A89A3	E15A89A4	E15A89B3	E15A89B4	E15A89C3
E15A88F1	E15A88F2	E15A89D1	E15A89D2	E15A89E1	E15A89E2	E15A89F1
E15A88F3	E15A88F4	E15A89D3	E15A89D4	E15A89E3	E15A89E4	E15A89F3
E15C18C1	E15C18C2	E15C19A1	E15C19A2	E15C19B1	E15C19B2	E15C19C1

Después de extraerse del portal del INEGI, los archivos E15, que contienen la zona de estudio, se advierte que se dispone de 3 carpetas llamadas:

MT_Auxiliares: contiene información auxiliar y características del MDE.

MT_Metadatos: almacena un archivo en formato HTML el cual menciona información complementaria y explica de manera breve lo relacionado a los MDE que provee el INEGI.

MT_XYZ: contiene el archivo en formato XYZ, también conocido como archivo binario crudo y el cual es generado a partir de la nube de puntos ajustada al terreno. En el contenido del

archivo pueden observarse tres columnas, en las cuales la primera y segunda columna contiene los datos de sus coordenadas horizontales UTM y la tercera columna contiene los datos de elevación del terreno (ver Figura 14).

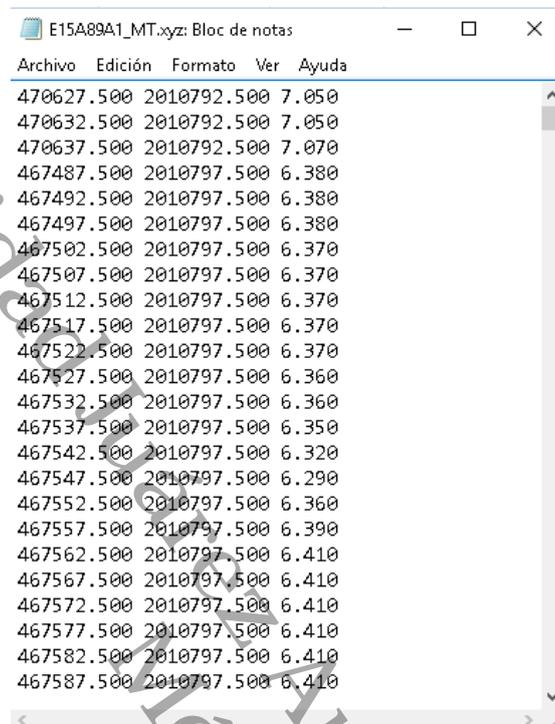


Figura 14. Coordenadas UTM de (INEGI, 2011)

Coordenadas horizontales UTM y la tercera columna contiene los datos de elevación del terreno.

Con los datos de los puntos es necesario crear un arreglo numérico, matriz, que contenga solo las alturas de la superficie a estudiar. Ello es con la finalidad de limitar la información a solo lo indispensable para que la simulación hidrológica sea más eficiente.

Para ello se diseñó un programa en el software MatLab de modo tal que colocará en dicho arreglo matricial las alturas en la matriz según correspondiera a las coordenadas (x, y).

Al terminar de llenar la información de la matriz MDE es necesario colocar el encabezado para que el software pueda leer las alturas y representar la topografía de la zona georreferenciada.

El encabezado se coloca al inicio de la MDE y este consta de las siguientes partes:

ncols → Número de columnas

nrows → Número de renglones

xllcorner → Coordenada E mínima

yllcorner → Coordenada N mínimo

cellsize

NODATA_value

Para nuestro caso el valor de la variable cellsize es de 5, para una altura por cada cuadro de 5 por 5 metros. Los valores NODATA son de -9999. ncols y nrows son el número de renglones y de columnas de la matriz creada respectivamente; xllcorner y yllcorner son la coordenada mínima de todas las abscisas y ordenadas mínima respectivamente. El programa en MatLab, además de colocar las alturas en la matriz, guarda cuales son las coordenadas mínimas. La matriz es rectangular, para el caso de la Figura 15 las zonas en blanco son celdas nulas. Con dichos datos se cubren 1,523 km², con un perímetro de 166 km (ver Figura 15).

La misma metodología se sigue para obtener el modelo de superficie (MDS). Este modelo es la capa alta de la zona, incluye edificios y la altura de los árboles; también proporcionado por el INEGI con los mismos formatos anteriores.

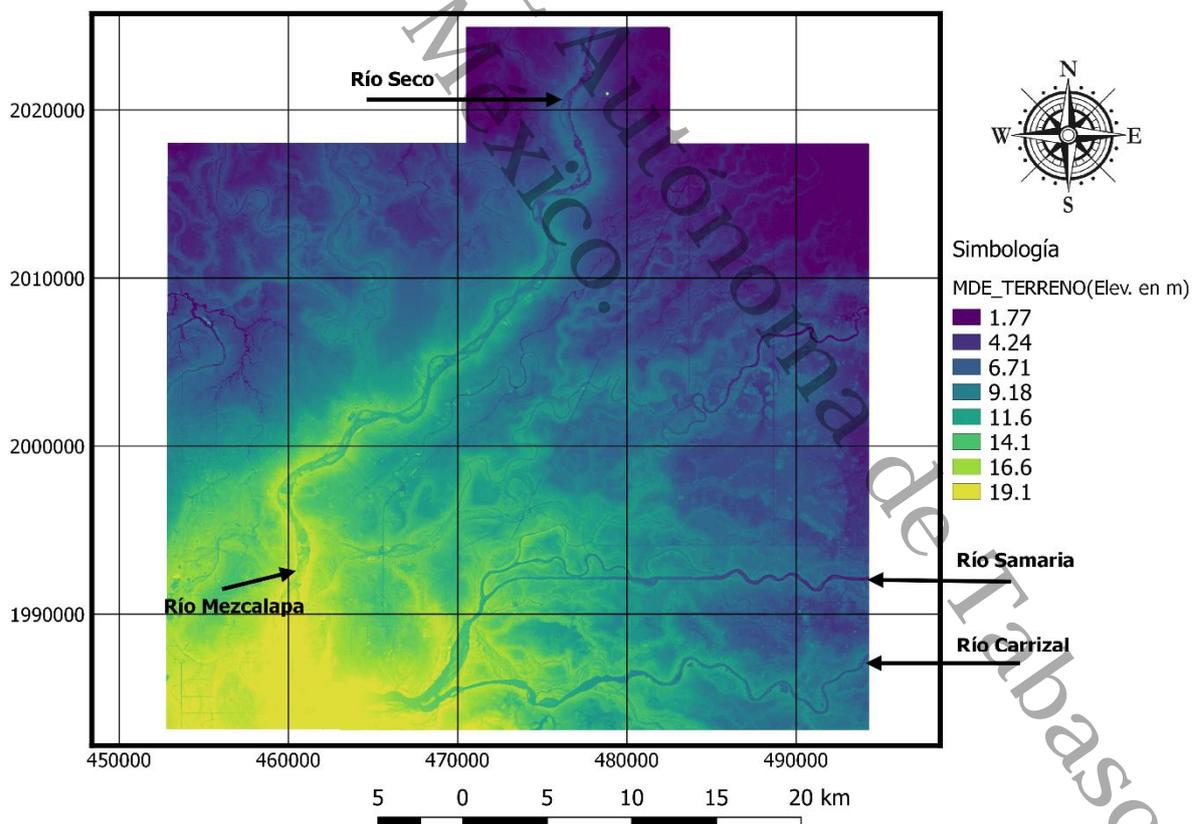


Figura 15. Modelo Digital de Terreno de 37 archivos del INEGI mencionados en el Cuadro 2.

Para estudiar una parte de la hidrología de la zona Chontalpa de Tabasco se utilizaron los MDT y MDE proporcionados por el INEGI y que aparecen en el Cuadro 2. La matriz de elevaciones de los modelos anteriores se muestra en la Figura 15 y Figura 16.

Se observa que el valle aluvial del río Mezcalapa es de fondo plano y amplio, constituidos por depósitos aluviales entre los cuales puede divagar el curso de agua. Esta divagación es muy extensa y definida por el INEGI como la cuenca del Cuxcuchapa, se puede decir que por lo menos está entre el río Seco y el río Carrizal. Esto se corrobora con el MDE en la Figura 16.

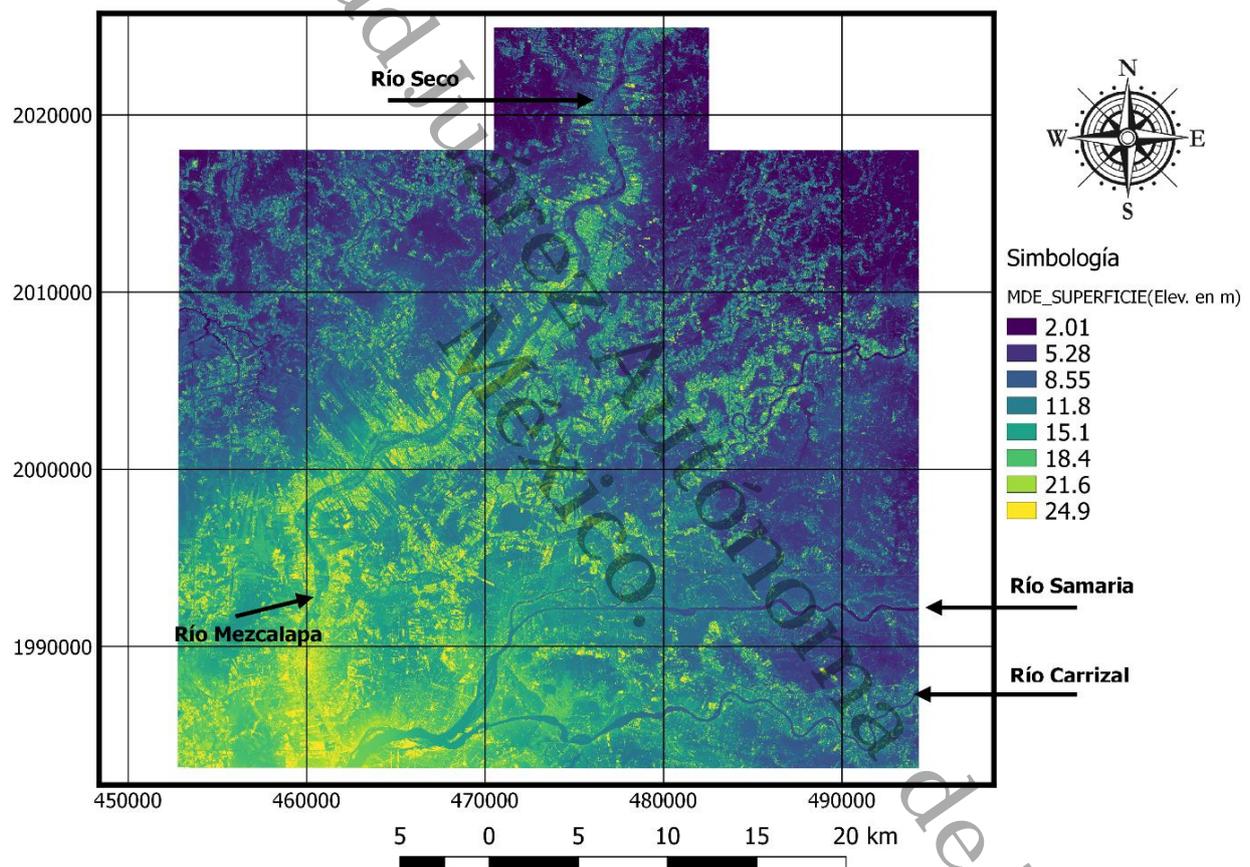


Figura 16. Modelo Digital de Elevaciones de Superficie de 37 archivos del INEGI mencionados en el Cuadro 2.

Se estudió la región para proponer la distribución geométrica de los canales. Se eligió la región comprendida entre los canales drenes Veladero y W15 (ver Figura 17).

Con base en Munguía (2016) se observa que la retícula de canales debe proponerse con intersecciones perpendiculares, o intentar las conexiones de canales con tendencia a los 90°.

Se determinó la zona de estudio de modo tal que parte de su perímetro sean los canales existentes, y carretera por sus otros costados. En cualquier caso, se desea que la propuesta de los canales se extienda en todo el territorio de la planicie. De esa forma se aprovecharía el territorio permitiendo trasvasar el agua cuando en alguna zona exista en exceso. Una vez obtenida la zona de estudio de interés se realiza el recorte al raster, este procedimiento se llevó a cabo en QGIS (ver Figura 18).

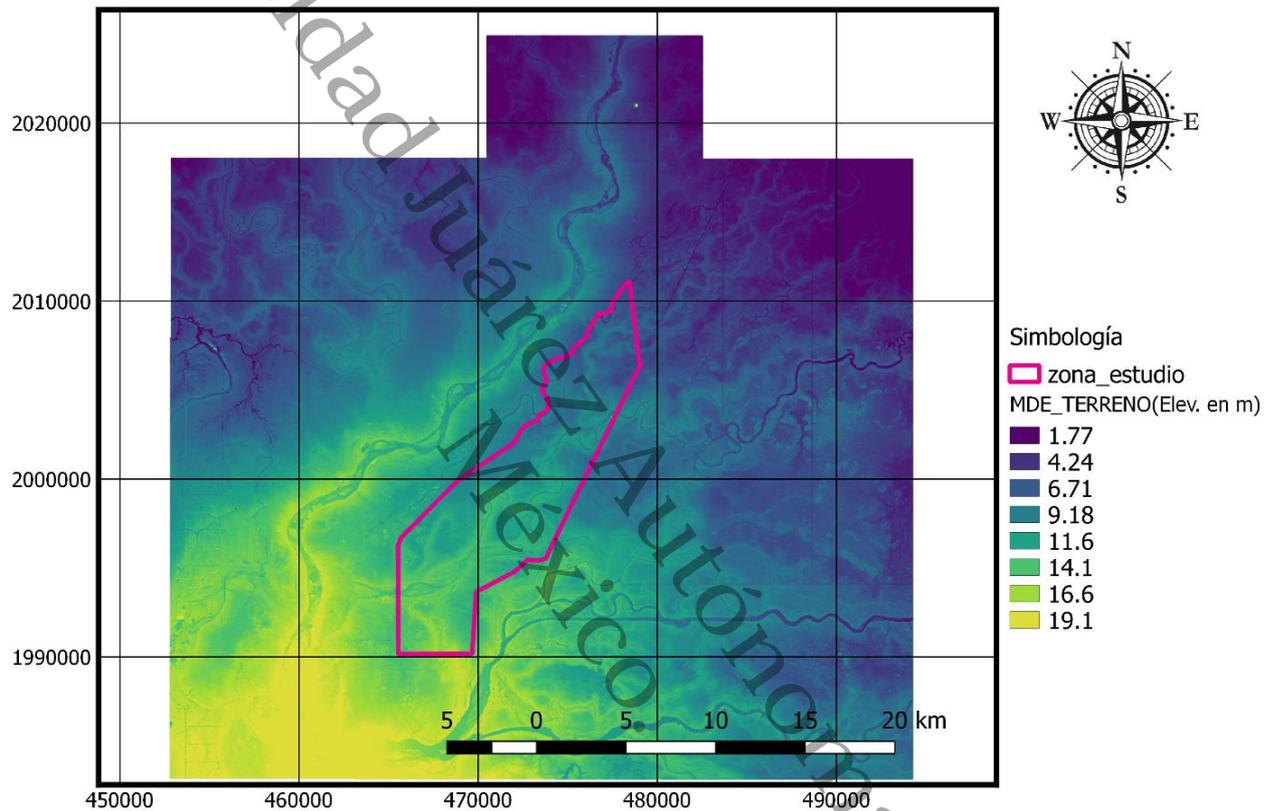


Figura 17. Colocación de la zona comprendida entre los drenes Cuxcuchapa y Cunduacán en el MDE.

Queda el recorte como se muestra en la Figura 18, y preparado para realizar las simulaciones.

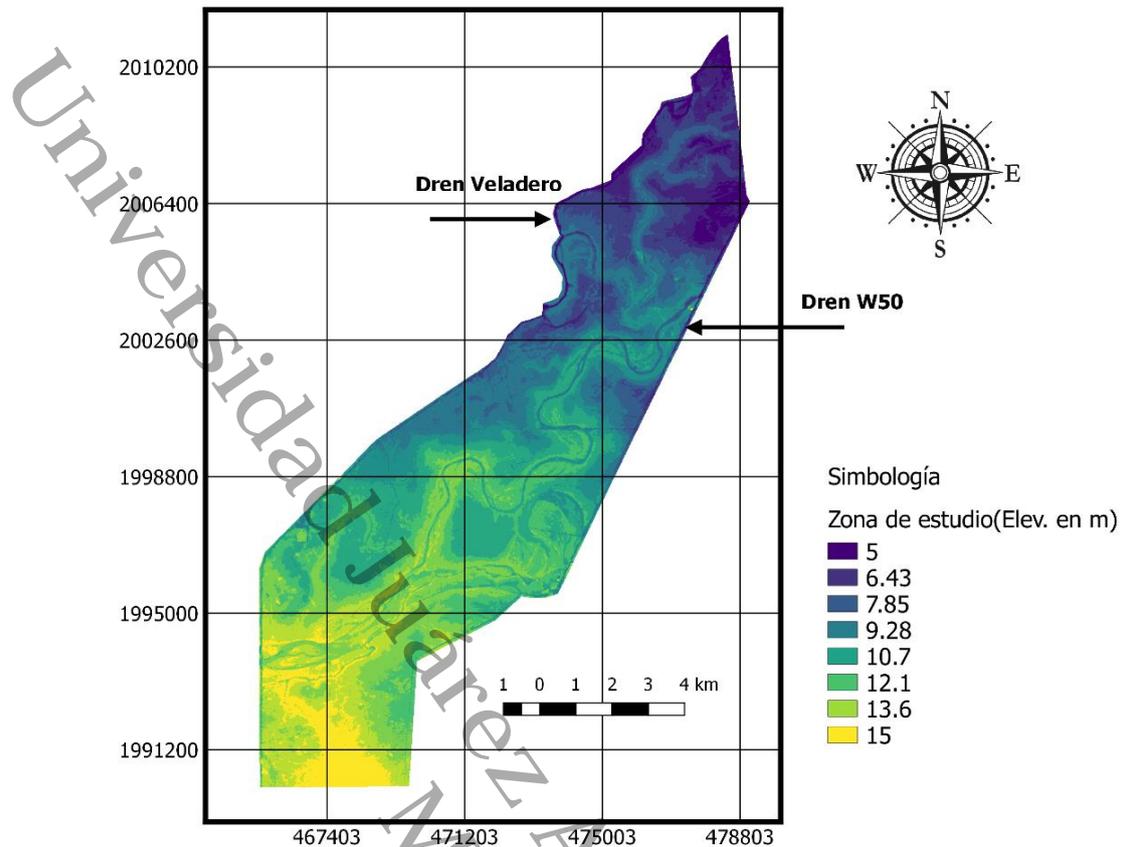


Figura 18. Recorte del MDE por medio de QGIS.

5.2 Gastos utilizados para la zona de estudio calculados por periodos de retorno

Se recopiló la información necesaria para determinar los gastos de operación de los drenes para diversos periodos de retorno. Con base en la información climatológica, topográfica, cobertura vegetal, características del suelo y su uso. La información recabada consistió en 2 estaciones climatológicas de mayor influencia sobre la cuenca, mismas que están a cargo de la CONAGUA. La estación Tulipán (clave 27051) y Paso de Cunduacán.

La información recopilada de la estación Tulipán se analizó ajustando las distribuciones de probabilidad recomendadas cuando se estudian registros de lluvias; se emplearon tres distribuciones cuyos resultados se revisaron mediante la aplicación de una prueba de ajuste para determinar a cuál se adaptan mejor los valores reales, posteriormente se determinó el gasto de diseño por el método U.S. Soil Conservation Service. Las distribuciones que se emplearon fueron Log-Pearson Tipo III, Gumbel, doble Gumbell 2p y Galton (Log- Normal)[ver (PEMEX-CONAGUA, 2013)]. Los resultados se expresan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Gastos máximos considerados en cada una de las entradas de agua con sus correspondientes periodos de retorno, en cada uno de los experimentos numéricos realizados.

Exp.	T _r (años)	Entradas de agua		
		El Veladero Q (m ³ /s)	W15 Q (m ³ /s)	Q _T (m ³ /s)
1	5	40	20	60
2	50	80	40	120
3	100	94	47	141
4	500	126	66	192
5	1000	141	74	215

5.3 Aporte de áreas aledañas a la zona de estudio

Es importante considerar el aporte de aguas aledañas a la zona de estudio. En un trabajo anterior se estudió parte de la zona de estudio. En ella se modelaron la escorrentía superficial con escenarios de inundación.

La delimitación para llevar a cabo la modelación se basó tomando en cuenta el borde derecho de las principales carreteras que se han construido en la región, es decir las principales carreteras son la frontera artificial de la zona de estudio (ver Figura 19).

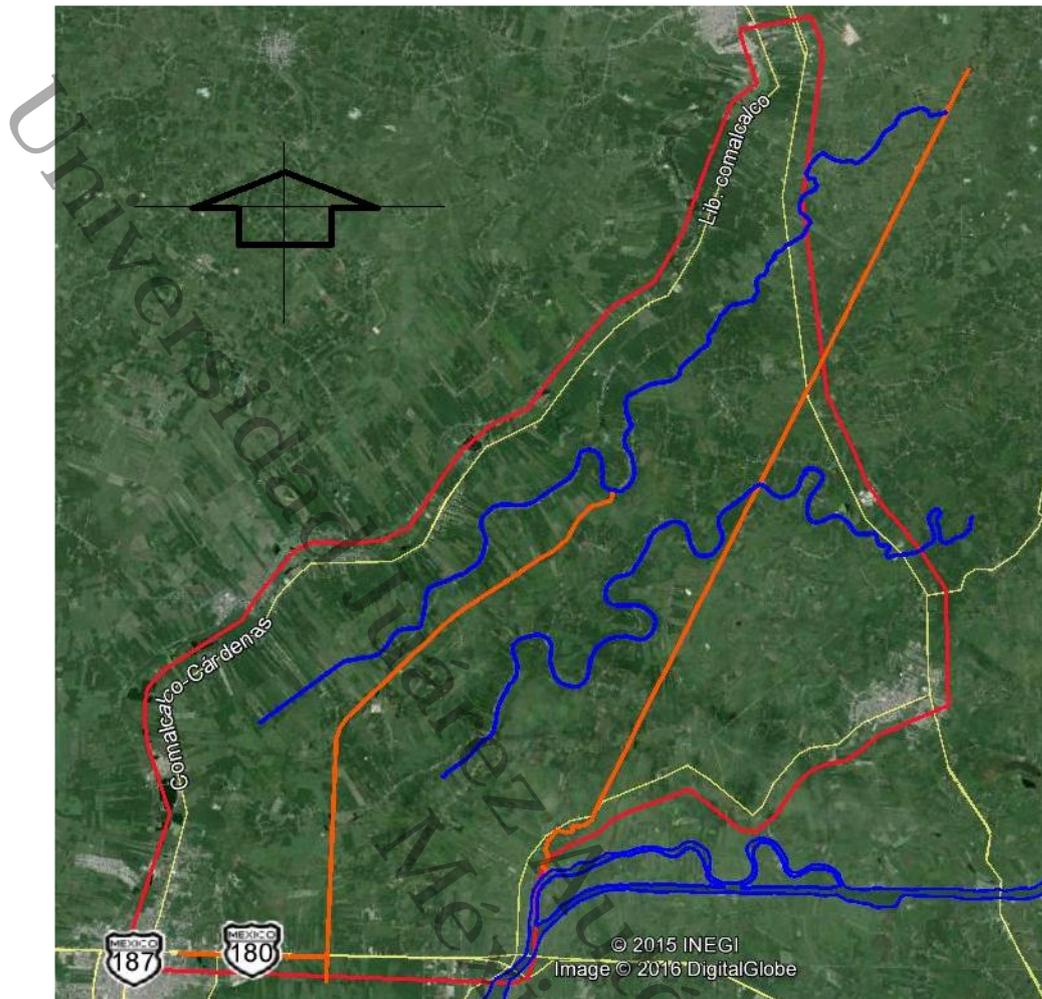


Figura 19. Zona de estudio y localización de ríos y drenes principales (Ojeda A, 2016).

Para estudiar el comportamiento hidrográfico de la zona de estudio se hizo fluir el agua en el canal el Veladero y en el dren W15, y se analizaron sus desbordamientos en las llanuras de inundación. La cantidad de agua que entra en la zona se determinó en función de la cantidad de agua que fluye por el río samaria, y los gastos estimados que aportan en la zona las estaciones climatológicas Tulipán y Paso de Cunduacán. (Ojeda A, 2016). Se realizó una simulación por cada periodo de retorno del Cuadro 3.

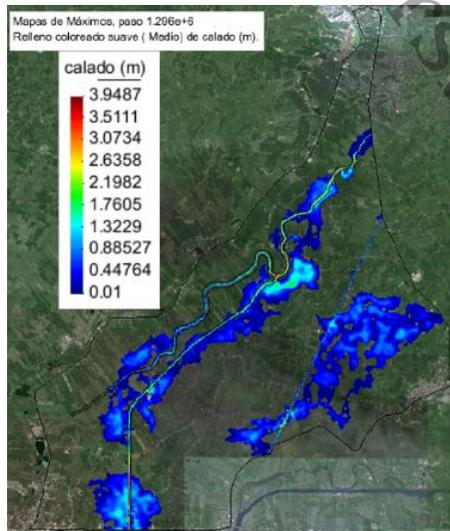
Los resultados fueron los siguientes. En la Figura 20 se muestran los mapas de inundación que ocurren en la zona de estudio de acuerdo con los resultados numéricos de cada experimento. En el Cuadro 4 se reporta el tirante máximo que se alcanza en cada experimento, por ejemplo, la inundación que ocurre con un periodo de retorno de 5 años alcanza un tirante máximo de 3:95 m, y la inundación con un periodo de retorno de 50 años el tirante máximo se incrementa en 48 cm y esto ocasiona un incremento considerable del área inundada como se puede observar en la Figura 20 (b) comprada con la Figura 20 (a). El incremento del tirante entre la inundación

con un periodo de retorno de 1000 con respecto a la inundación con un periodo de retorno de 50 años es de 21 cm y esto provoca también un incremento considerable del área inundada como se puede observar en la Figura 20 (e).

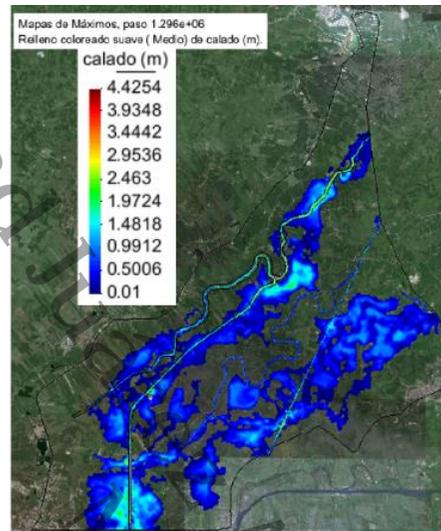
Cuadro 4. Tirante máximo que ocurre en la zona de estudio.

Experimento	Tr (años)	Tirante
1	5	3.95
2	50	4.43
3	1100	4.50
4	500	4.61
5	1000	4.64

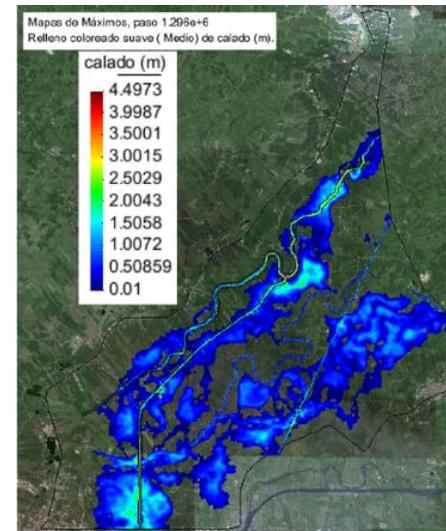
Las zonas donde el tirante es mayor que 1 m para una avenida de 100 años de periodo retorno, de acuerdo con la Normatividad Española se consideran zonas de alta peligrosidad en el entendido de que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes. En cada uno de los mapas de la Figura 20, se pueden observar las zonas donde el tirante es superior a 1 m.



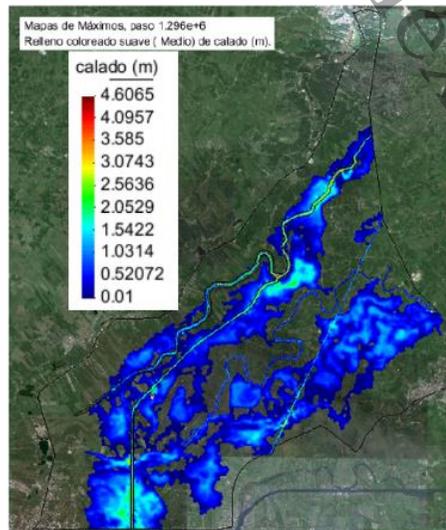
(a) Tr = 5 años.



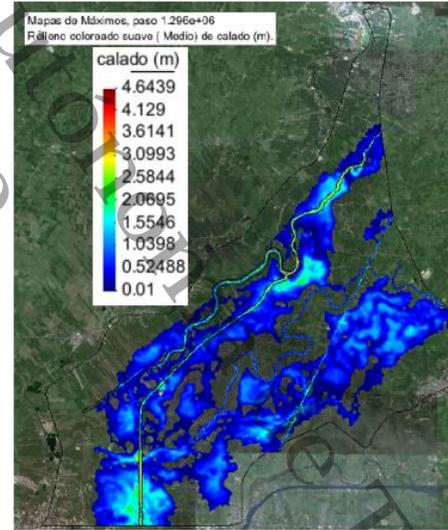
(b) Tr = 50 años.



(c) Tr = 100 años.



(d) Tr = 500 años.



(e) Tr = 1000 años.

Figura 20. Mapas de inundación o de máximos calados (tirantes).

La conclusión principal de Ojeda (2016) es que el agua fluye muy lentamente en toda la zona de estudio y que el tirante crece rápidamente, por lo que el tirante es la variable que influye significativamente en la peligrosidad de la zona.

5.4 Levantamiento batimétrico y condiciones actuales de los drenes

Se realizó el levantamiento de las batimetrías de los drenes para su simulación hidrodinámica. La situación actual de los drenes se muestra por medio de las fotografías (ver Figura 21). Las letras (a-h-e) pertenecen al dren Veladero y las letras (b-c-d) al dren W15. Las entradas a los drenes están indicadas en las letras (a) y (b), en la entrada (a) se observa una alta contaminación producto de aguas usadas de la ciudad vecina de Cárdenas, inexplicablemente cerca de donde pasa el dren existe una laguna de oxidación, sin embargo, el municipio de Cárdenas prefiere verter las aguas domésticas a este dren. La entrada (b) en apariencia no se ve contaminada, pero es esa zona se acostumbra sembrar plátano, es posible que el fertilizante y/o plaguicidas usado se disuelva y contamine las aguas. En el transcurso del dren Veladero la profundidad puede llegar a más de 5 metros, mostrando también en sus taludes una vegetación de pastizales y lirios y cañales en la lámina de agua. Casi a todo lo largo del dren la profundidad del agua no fue mayor de medio metro. La salida del dren Veladero es la letra (e), en dicha salida se nota un agua transparente y prácticamente limpia por la vegetación a su paso. Y es el mismo caso para el dren W15. Las figuras (g) y (f) muestran la situación entre los meses de septiembre a noviembre. Es la época de lluvias del norte y la temporada de huracanes. Los campesinos están acostumbrados a estar bajo una pequeña inundación (por lo general de 20 centímetros en promedio) durante varios días, puede llegar a semanas si las lluvias no cesan y se empalman nortes con huracanes. En algunas zonas como la ilustración (g) muestra zonas donde el tirante de la inundación puede llegar a dos metros.

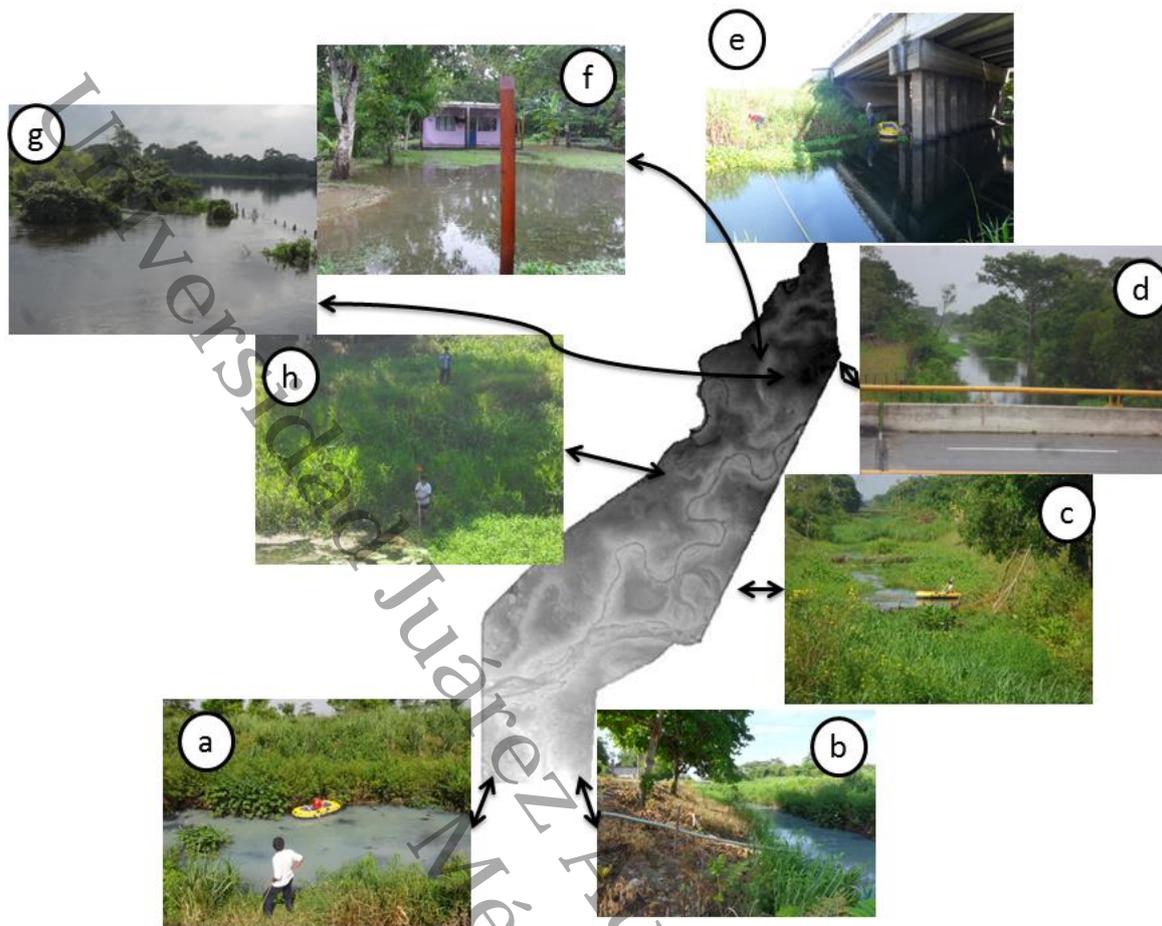


Figura 21. Levantamiento batimétrico y situación actual de los drenes.

Se observó que los campesinos construyen drenes menores para que escurra el agua a los drenes W15 y Veladero, sin embargo, estos se saturan y el agua fluye con lentitud.



Figura 22. Curvas de nivel del dren Veladero en la entrada y en isométrico. Derecha su representación total en CAD.

La construcción de las batimetrías fue realizado el dibujo en CAD, se corrigen los errores de líneas y puntos sobrepuestos en el dibujo y se revisa para que al momento de exportar no cause ningún error. La Figura 22 muestra las curvas de nivel del dren Veladero.

5.5 Elección de lluvia

Para resolver la falta de información relacionada con las tormentas y niveles de desbordamiento de los ríos se implementó un portal, en coordinación con la CONAGUA y un trabajo colaborativo con el CINVESTAV y la UJAT (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017) para monitorear las estaciones automatizadas de la cuenca Grijalva-Usumacinta y los niveles de los ríos del estado de Tabasco. El sitio web ayuda a contar con una base de información actualizada y oportuna.

Para este caso se buscan tormentas registradas en expedientes. Para monitorear la lluvia se tomó de la base de datos del portal de monitoreo de lluvia en tiempo real y que se puede consultar en la dirección IP: <http://juchiman.tabasco.gob.mx>. El portal generó información desde agosto del año 2016 a la fecha, las lluvias se guardan en una base de datos en extensión .csv, con base en esta información se determinó cual lluvia fue la más abundante en todo el periodo de monitoreo de la estación más cercana a la zona de estudio, para este caso la estación más cercana fue la estación 49 (estación samaria) que está ubicada en la zona 15 y coordenadas al este UTM 470828.37 m, y al norte 1989869.16 m (ver Figura 23)

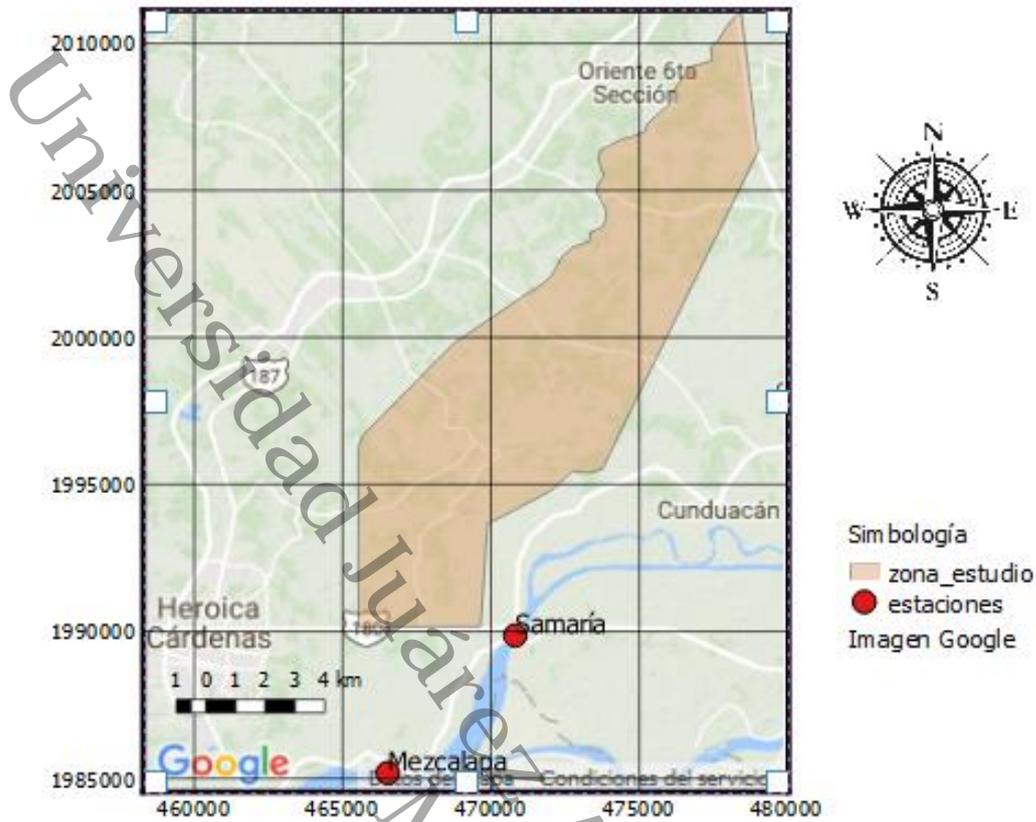


Figura 23. Ubicación de la estación 49 Samaria.

La Figura 24 y Figura 25 muestran el periodo de lluvias de Nortes en la estación 49. De dicha Figura se tomó el periodo más abundante de lluvia En el año del 2016, como se observa en la Figura 24 sobresale la barra de 18 mm de lluvia sobre todas las demás barras, sin embargo, es solo una tormenta. Mientras que el año del 2017 a la fecha sobresale la barra de 67.5 mm como lo muestra la Figura 25.



Figura 24. Hietograma de lluvia en el año 2016 (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017).

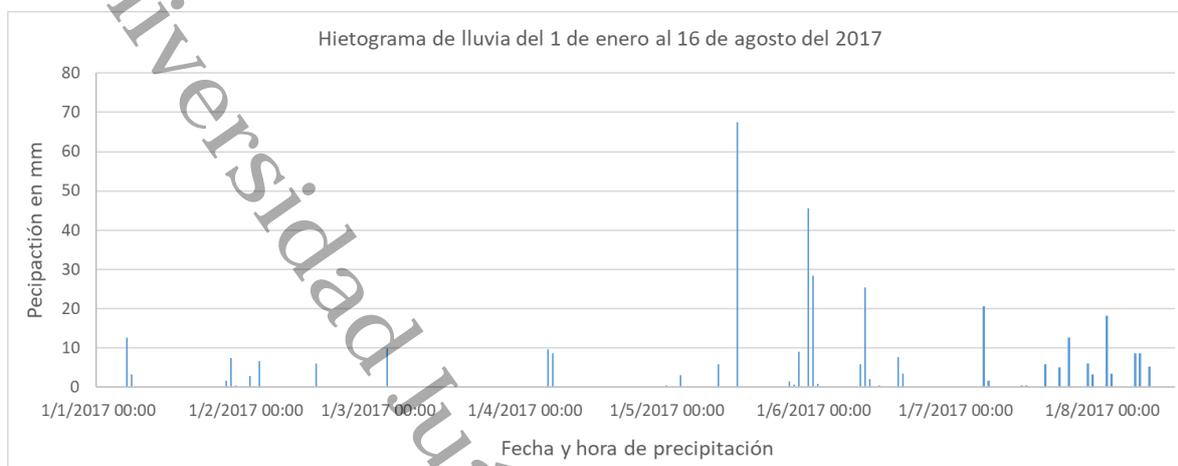


Figura 25. Hietograma de lluvia del año 2017 hasta la actualidad (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017).

Para modelar la lluvia en la zona de estudio, de la base de datos se seleccionó dos tipos de lluvias, la primera como lo muestra en el Cuadro 5, considerada como la más abundante del año 2016, se determinó por la acumulación de lluvia en relación con el periodo de tiempo.

Cuadro 5. Registro de la base (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017).

Estación 49 Samaria, iniciando el 11 nov 2016 al 12 nov 2016. Se muestra el inicio del hietograma.

Un total de 53.7 mm de lluvia y 39 horas de registro.

Fecha/Hora	mm	Fecha/Hora	mm	Fecha/hora	mm
11/11/2016 03:50	0.3	11/11/2016 16:50	0	12/11/2016 05:50	1.2
11/11/2016 04:50	2.7	11/11/2016 17:50	0	12/11/2016 06:50	1.6
11/11/2016 05:50	0.5	11/11/2016 18:50	1.8	12/11/2016 07:50	0.8
11/11/2016 06:50	1.1	11/11/2016 19:50	0	12/11/2016 08:50	0.2
11/11/2016 07:50	6.2	11/11/2016 20:50	1.1	12/11/2016 09:50	0
11/11/2016 08:50	3.2	11/11/2016 21:50	0.1	12/11/2016 12:50	0
11/11/2016 09:50	3.9	11/11/2016 22:50	0	12/11/2016 13:50	2.6
11/11/2016 10:50	8.8	11/11/2016 23:50	0	12/11/2016 14:50	0
11/11/2016 11:50	7.2	12/11/2016 00:50	0	12/11/2016 15:50	6.7
11/11/2016 12:50	1	12/11/2016 01:50	0	12/11/2016 16:50	0.2
11/11/2016 13:50	0	12/11/2016 02:50	0.1	12/11/2016 17:50	0.6
11/11/2016 14:50	0.3	12/11/2016 03:50	0.3	12/11/2016 18:50	1.2
11/11/2016 15:50	0	12/11/2016 04:50	0	12/11/2016 19:50	0

La segunda lluvia se seleccionó la más abundante como lo muestra el Cuadro 6 sin tomar en cuenta el tiempo de lluvia, esta se registró en mayo del 2017 .

Cabe mencionar que no existen registros públicos sobre lluvia por periodo de tiempo en intervalos de hora, a excepción de lluvia diaria.

Cuadro 6 . Registro de la base (López Broca, Munguía Balvanera, & de la Cruz Burelo, 2017). Estación 49 Samaria, iniciando el 16 mayo 2017. Se muestra el inicio del hietograma. Un total de 131 mm de lluvia y 5 horas de registro.

Fecha/hora	mm
16/5/2017 14:50	0
16/5/2017 15:50	67.5
16/5/2017 16:50	20.4
16/5/2017 17:50	43.1
16/5/2017 18:50	0

5.6 Simulación de lluvias en terreno natural con malla RTIN

5.6.1 Mallado de la zona de estudio con RTIN

Se desea conocer el comportamiento de lluvia en el terreno natural para saber cómo se comporta el escurrimiento en zona de estudio y así obtener una propuesta de red óptima. Para esto se realizaron dos simulaciones, una para cada lluvia. El pre-proceso de la simulación consiste en preparar el modelo para llevar a cabo la simulación.

Para importar la geometría de esta zona de estudio del MDT a Iber, se realiza por medio de una red de triángulos irregulares o TIN, este consiste en importar la triangulación generada con GIS; y exportada como shapefile. Para ello es recomendable que la TIN se haya realizado previamente a partir de una capa raster (y no por ejemplo a partir de curvas de nivel u otras entidades), esto ayuda para asegurar que los triángulos resultantes no tengan lados demasiado pequeños.

Universidad

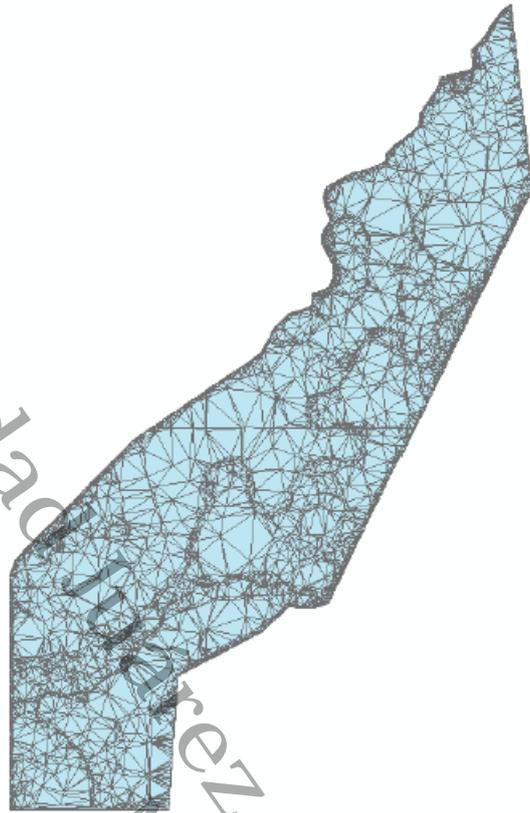


Figura 26. Malla en formato TIN obtenida en GIS.

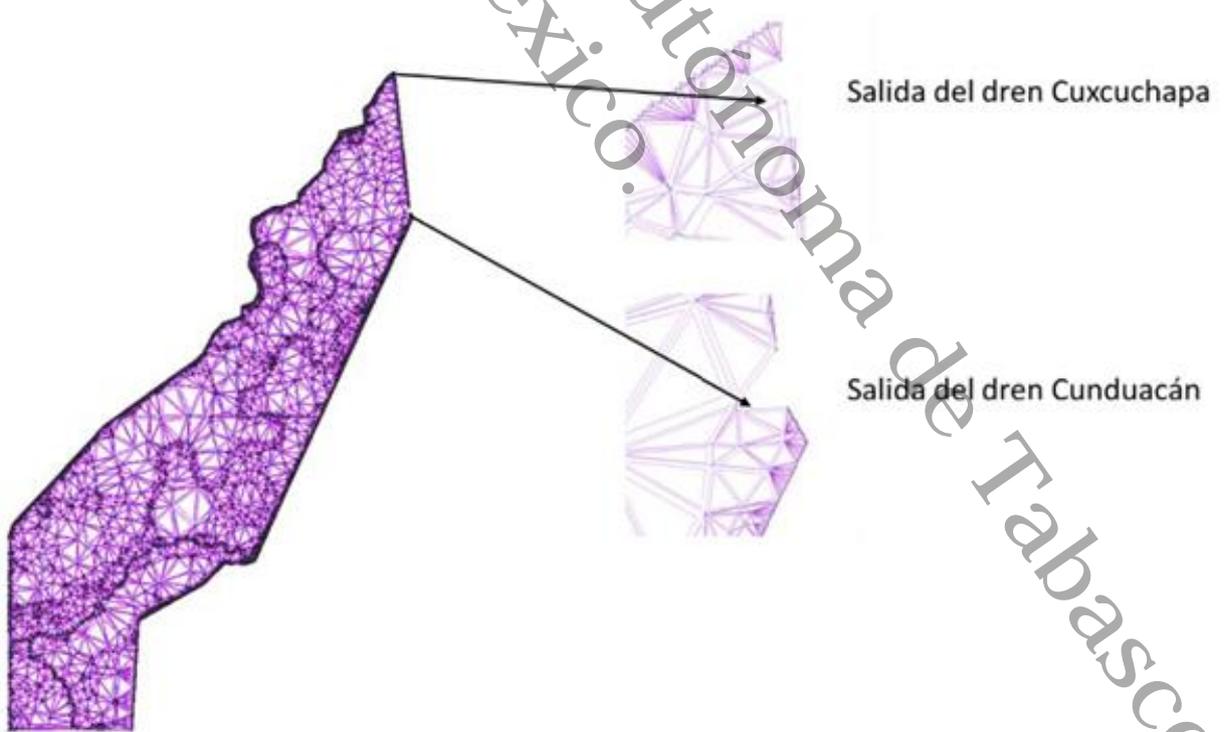


Figura 27. Ajuste de las salidas de los drenes al MDE, ajustando la malla.

La Figura 26 generada en GIS se lee en Iber, se asignan las salidas del agua como se muestra en la Figura 27. Nótese que no hay cambios de la malla generada en GIS con la malla en Iber

5.7 Trazo de la propuesta de canales en la zona de estudio por periodos de retorno y con canales de 3 metros de profundidad

Por último, con las investigaciones antes realizadas se elaboró una propuesta de aplicación en la región del Cuxcuchapa, zona de la Chontalpa en Tabasco, México. Se quiso aprovechar dos drenes existentes en esta región (ver Figura 21). Estos drenes tienen la finalidad de retirar el agua cuando las lluvias son copiosas, su finalidad es la de evitar inundaciones del territorio. Esta estrategia de desecar zonas que antes estaban destinadas a inundación con las crecientes de los ríos ha propiciado algunos problemas de cambio en ecosistemas y propiciando la modificación de la flora y fauna del lugar. Esta zona es reconocida como el valle del río Mezcalapa, este río tiene un amplio valle como es común en los ríos en las zonas de planicie costeras. La región es parcialmente rural, y la propuesta de obtener riego por saturación de suelos es un intento por aplicar las estrategias que tiene Holanda en su territorio. Para tal caso se hizo el estudio en la zona del Cuxcuchapa entre los drenes construidos. La zona es típica de varios lugares de la Chontalpa, se estudió esta zona para determinar las dificultades y oportunidades que se presentan al construir canales para riego optimizando la capacidad de campo. Las dificultades fueron las siguientes:

La zona está poblada, aunque según la estrategia holandesa los canales tienen prioridad sobre las construcciones, se optó por intentar hacer un trazo de canales donde se afectará lo menos posible a las casas de los poblados, aumentando así la factibilidad de su construcción.

Se recomienda hacer un trazado de los canales a mano alzada a nivel de croquis, con la finalidad de dibujar cuadrados, empezando con los cuadros mayores y posteriormente los menores. Se trazaron con cuidado los canales en los lugares de modo que no dañe, o con bajo impacto, las propiedades existentes, además de tratar cierta configuración, hasta donde sea posible, de la tenencia de la tierra; de esta manera poder aprovechar el agua de lluvia de una manera conciliada con los propietarios y obtener el mayor provecho de la propuesta.

Una vez realizado el trazo a lápiz se sobreponen las capas del MDE a un raster, puede ser en Google y se dibujan ahora en CAD los trazos hechos a mano alzada mediante líneas. Se tiene

cuidado de cruzar lo menos posible caminos, poblados o cualquier infraestructura importante, pero hay que recordar que los canales tienen importancia prioritaria al igual que las líneas eléctricas o los ductos de petróleo. Los cruces deben procurarse perpendiculares; se permiten intersecciones a 120° en caso de ser necesario. Trazados los ejes de los canales se da anchura para este estudio el ancho se propone de 40 metros

5.7.1 Pre-proceso de la zona de estudio con escurrimientos por periodos de retorno y con canales de 3 metros de profundidad

Para el trazo de los canales se manejan tres tipos de canales que son: primarios que son los drenes w15 y el Veladero para fines de esta propuesta su función es de recoger y evacuar rápidamente las aguas provenientes de los canales secundarios y terciarios, secundario estos constituyen la base del sistema de drenaje su frecuencia está determinada por la topografía del terreno. y terciarios que depositan sus aguas a los secundarios estos sirven para mantener el nivel freático a una profundidad adecuada.

En la propuesta no se dibujaron canales terciarios, pues antes de realizar una obra de tal magnitud son necesarios varios estudios de factibilidad y acercamientos a una concepción más exacta, fuera del alcance de este trabajo. Esto no quiere decir que en esta propuesta se haga solo un esquema. Es intención de la autora su utilización en un futuro próximo, por ello se desea tener una mayor aproximación y realmente sean construidos en un futuro a mediano plazo para aprovechar el recurso del agua. Para el trazo de canales se retomó la geometría cuadrada de los ancestros prehispánicos, de otras civilizaciones y de los holandeses. Sin embargo, en el territorio del Cuxcuchapa ya existen varias construcciones e infraestructura, por lo cual se decidió trazar los canales intentando respetar una cuadrícula adaptándola al territorio. Por ello se puede apreciar que algunas intersecciones de canales no están precisamente a 90° , pero se buscó la mayor aproximación posible. En caso de que hubiera cruces de tres canales se procuró que estos cumplieran con ángulos tendientes a 120° .

Posteriormente en CAD se hizo el trazado de los canales y se le asignó una profundidad de tres metros a los canales. Una vez que se obtuvo la geometría en CAD se exportó a Iber y se crearon las superficies Nurbs (ver Figura 28) y se asignaron los coeficientes de escurrimiento de Manning. Posteriormente se malla. Después de varios estudios de diferentes medidas de mallas,

se llegó a la conclusión, entre un balance de tiempo de cómputo y exactitud, una malla de los canales de 20 unidades y fuera de ellos de 120 unidades (ver Figura 29).

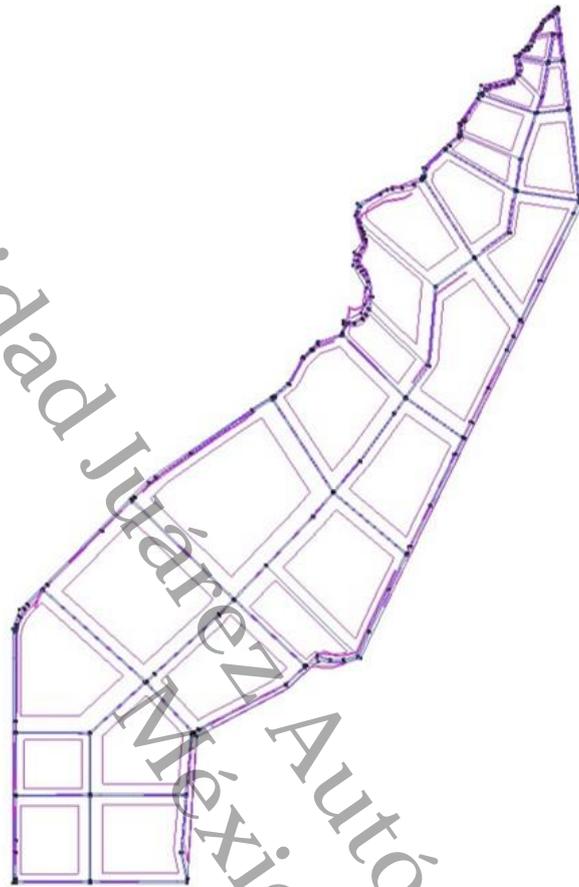


Figura 28. Superficies Nurbs de la zona de estudio. Para facilitar la creación de superficies se dividieron algunos polígonos.

Una vez obtenidas las superficies Nurbs se proponen mallas. Malla más fina para los canales y de mayor tamaño para las superficies planas. La malla óptima se escoge según recomendaciones de Iber y expuestas en los ejercicios de Hernández y Cáliz (2014).

Para mallar es necesario hacer varias propuestas y, dentro de ellas, elegir la más recomendable para optimizar resultados y tiempo de cómputo. El comparativo del mallado de la zona de estudio depende del tamaño de los lados de los elementos en los drenes y llanuras que el usuario elija. Las gráficas generadas por Iber (Calidad vs Número de Elementos) (ver Figura 29) muestran la calidad de la forma del mallado.

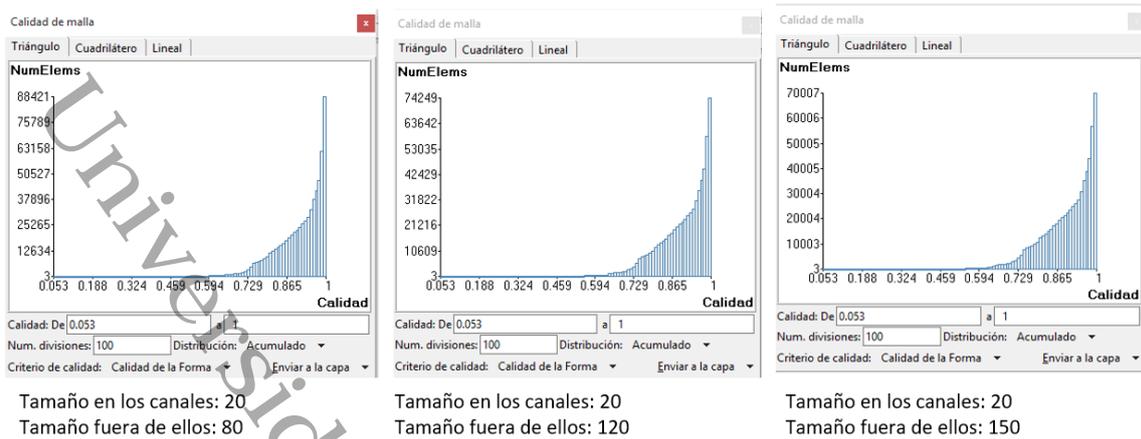


Figura 29. Gráficas de calidad de forma generadas en iber.

La Figura 30 se elige por la gráfica óptima que propone Iber y el usuario. Llegando así, a una conciliación óptima, es decir: Mallado de los canales de 20 unidades y fuera de ellos de 120 unidades.

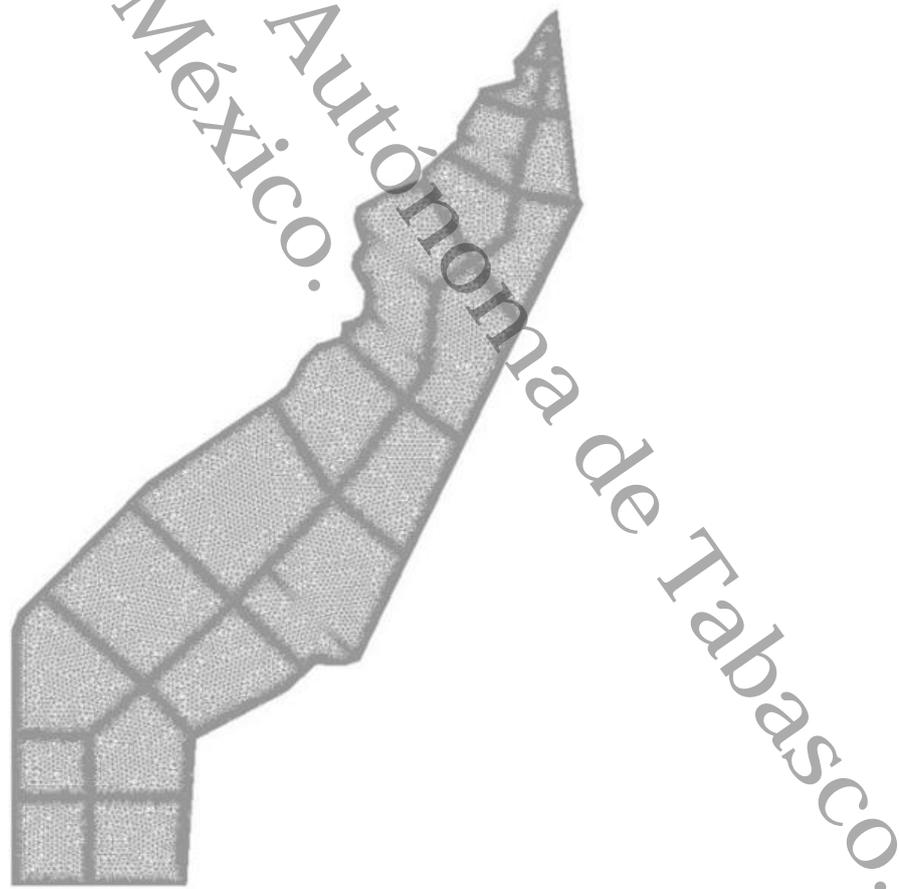


Figura 30. Mallado en Iber de las superficies Nurbs. Mallado de los canales de 20 unidades y fuera de ellos de 120 unidades.

En la Figura 31 se muestra la entrada de los drenes. Los gastos de entrada del dren Veladero y W15 se asignaron dependiendo del periodo de retorno Cuadro 3. Como se trata de una planicie con poca pendiente, se ha considerado el tipo de régimen crítico/ subcrítico en las dos entradas.

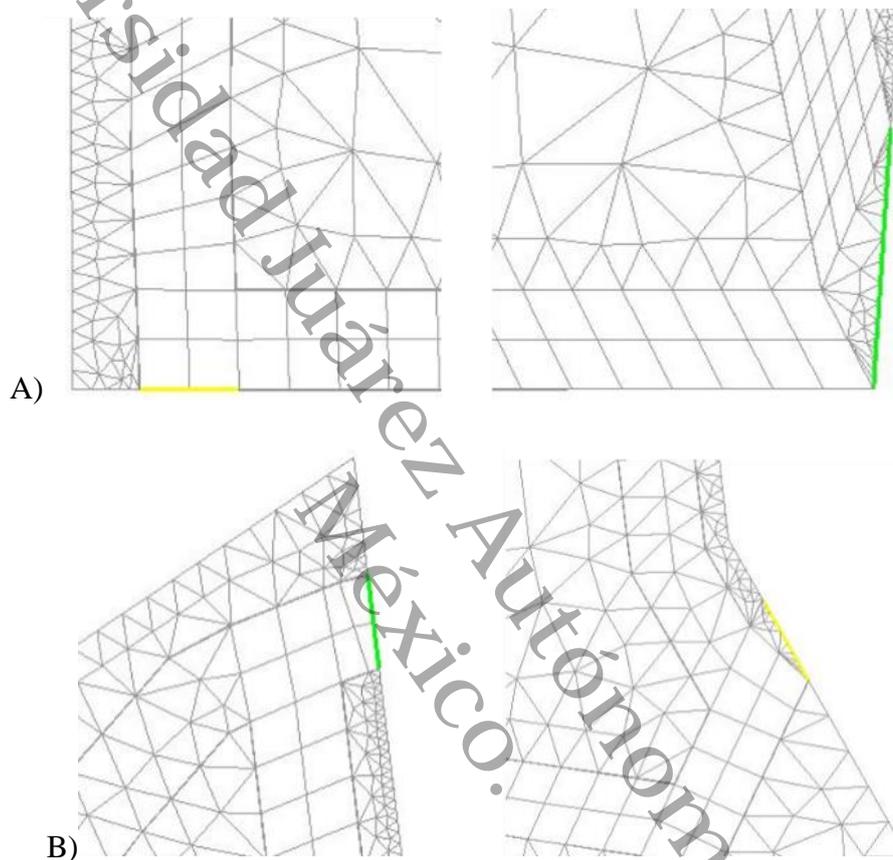


Figura 31. A): entrada de agua del canal Veladero ,del canal W15. B) Salida del canal veladero, salida del W15.

En la actualidad en la zona de estudio el terreno está adaptado para retirar el agua a los drenes mencionados. Es menester que el cambio de visión de retener el agua en canales modificaría el enfoque actual. Por ello, si se implementan los canales tipo chinampas los drenes actuales se modificarían y se rectificarían las tierras para adaptarlas a los escurrimientos a los canales. Por ello, no se consideró la topografía del MDE, sino se estableció como si esta ya estuviera preparada para acumular el agua en los canales. Para las simulaciones solo se consideró la pendiente del terreno en las esquinas superior e inferior (ver Figura 32).

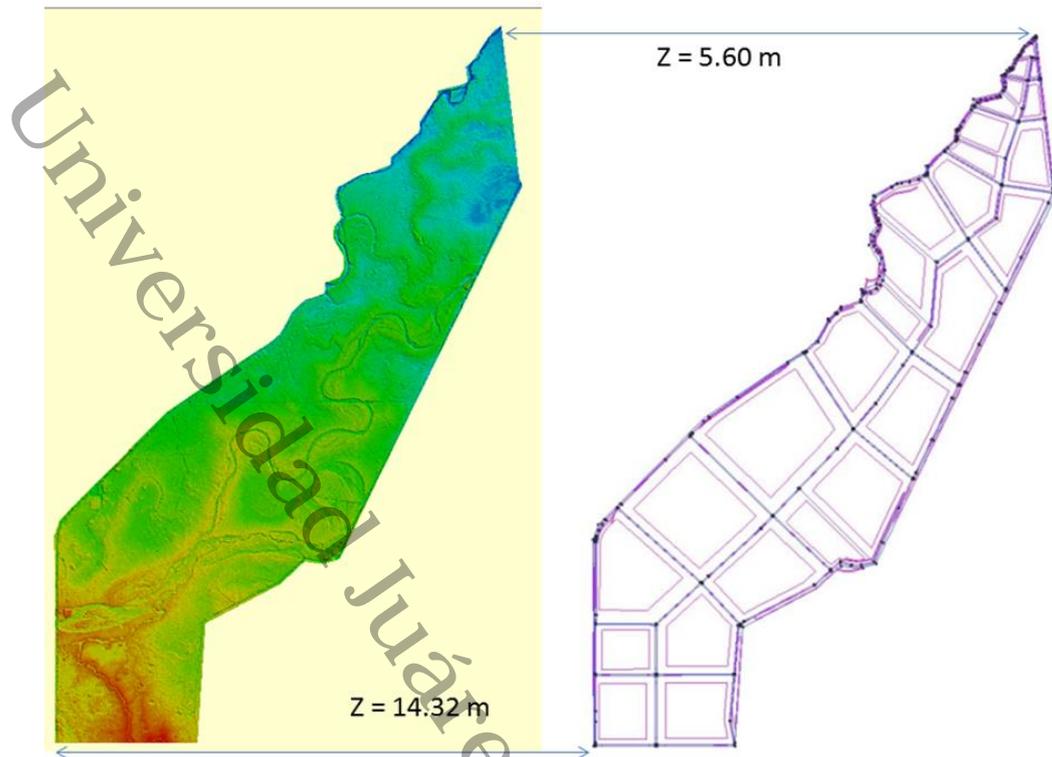


Figura 32. Nivelación del terreno para realizar las simulaciones lo más cercana a las modificaciones de la topografía por los canales.

5.8 Simulación de lluvias en la retícula de canales

Se realizaron dos simulaciones de lluvia de 39 h y 5 h posteriormente en la zona de estudio con los canales propuestos. Para analizar las ventajas de la implementación de los canales en la zona de estudio.

6 Resultados

6.1 Resultados de simulación de lluvias en terreno natural con malla RTIN

6.1.1 Asignación de condiciones de contorno y Datos del problema

Se asignan los datos de contorno y condiciones iniciales. Las variables independientes o los datos del pre-proceso para Iber son los siguientes:

Salida: critica.

Condiciones iniciales: 0 (seco).

Rugosidad: vegetación densa.

Malla no estructurada: núm. De divisiones (1 para generar la malla a partir de la Figura 27).

Tiempo de simulación: 200000 s. Para lluvia de 39 h y para la simulación de 5 h de lluvia: 43200 s.

Intervalo de resultados: 3600 s.

Limite seco-mojado: (0.001).

Los datos de lluvia se aplicaron con base en el hidrograma (ver Figura 33) obtenido del Cuadro 5 y Cuadro 6. Las variables dependientes consideradas en este estudio es el escurrimiento hidrológico expresado por el tirante de la zona de estudio.

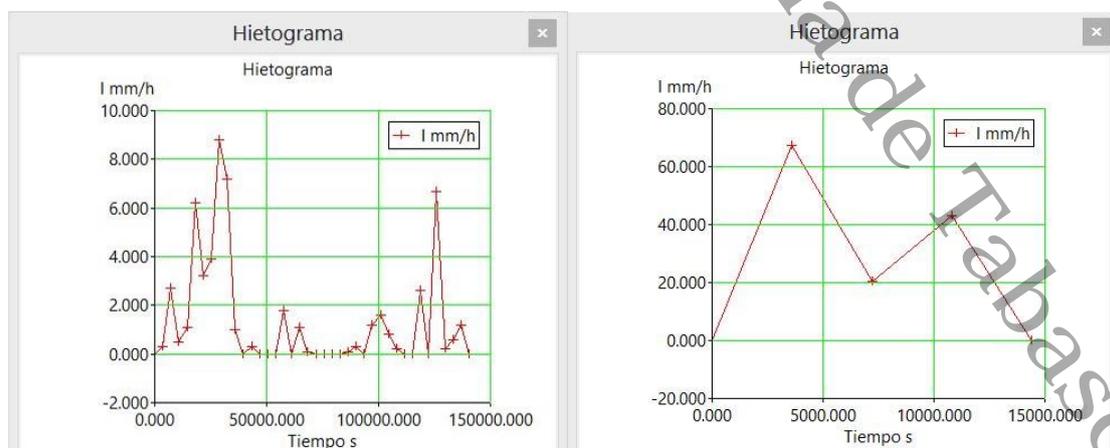


Figura 33. Derecha Hietograma de lluvia de 39 h. Izquierda Hietograma de lluvia de 5 h.

Con base en la Figura 26 y para simular una tormenta para la zona de estudio se requieren de datos en el pre-proceso indicados con anterioridad. Ver Cuadro 5 y Cuadro 6. Datos del hietograma para la simulación.

Para el primer intento de la simulación los resultados no fueron satisfactorios, la simulación no arrojaba datos en la superficie. El factor que impedía los resultados fue el parámetro de seco-mojado. Debido a que en la simulación anterior no se apreció el escurrimiento de lluvia, se realizó la siguiente modificación de Límite seco-mojado (0.1).

El resultado de la lluvia de 5 h que en total son 131 mm se muestra en la Figura 34. Se aprecia en dicha figura como el nivel del agua en promedio en la zona es 32 cm.

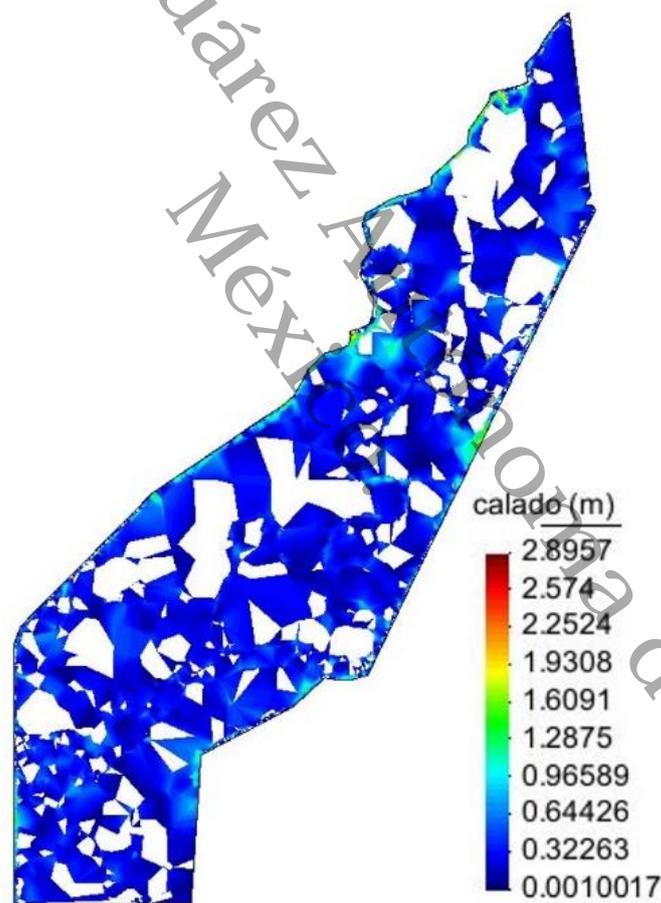


Figura 34. Resultado de simulación de lluvia de 3 h en Iber.

Mientras que la lluvia más prolongada de 39 h de 53.7 mm, el nivel de agua promedio en la zona de estudio es de 20 cm como se aprecia en la Figura 34. El escurrimiento a los drenes es muy lento dada la distancia que existe entre ellos y es probable que si llegase a caer una lluvia de esas dimensiones tardaría varios días en bajar el nivel. Aunque no se considera un nivel de

peligrosidad (igual o mayor a 1 metro) si es incómodo y con afectaciones a la productividad en la zona.

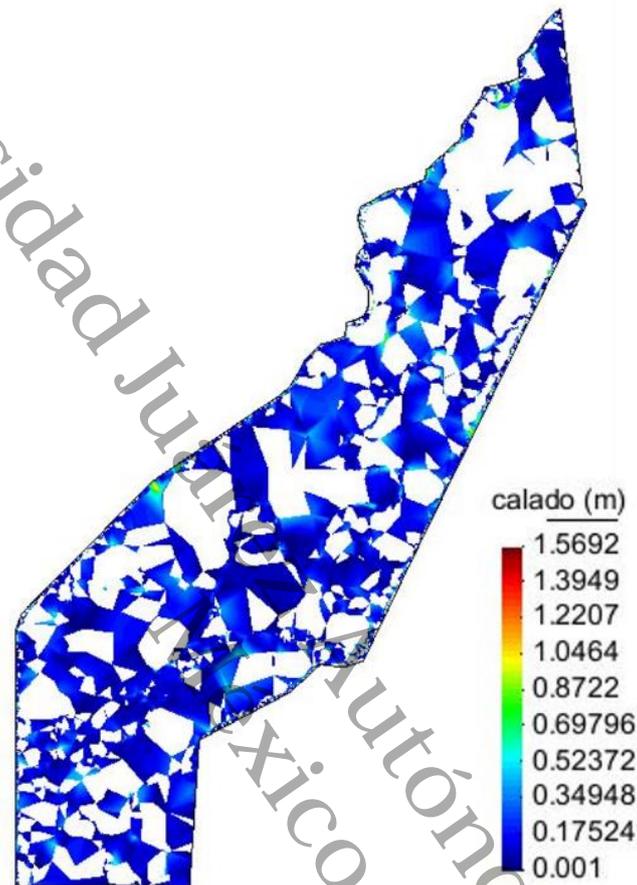


Figura 35. Resultado de simulación de lluvia de 39 h.

6.2 Resultado de simulación en la red de canales por periodos de retorno

6.2.1 Asignación de condiciones de contorno y Datos del problema

Se asignan los datos de contorno y condiciones iniciales. Las variables independientes o los datos del pre-proceso para Iber son los siguientes:

Entrada: Según el Cuadro 3.

Salida: crítica.

Condiciones iniciales: 0 (seco).

Rugosidad: río.

Tiempo de simulación: 140000 s.

Intervalo de resultados: 1200 s.

El Cuadro 7 se muestra los tirantes máximos y mínimos de los cinco experimentos de periodos de retorno. Como muestra el Cuadro 7 el calado en la retícula significa que a partir de ese calado es el que predomina en la retícula hasta el calado máximo.

Cuadro 7. Resultados de calados de los periodo de retorno.

Experimento	Tr (años)	Calado máximo	Calado mínimo	Calado predominante
1	5	1.28	0.25	0.65
2	50	1.75	0.44	1.0
3	100	1.90	0.50	1.18
4	500	2.23	0.01	1.40
5	1000	2.36	0.70	1.90

Para el flujo de los drenes para diferentes periodos de retornos propuestos según el Cuadro 3 se observó un comportamiento similar en los 5 experimentos, se muestra que aumentando solo los tirantes en los drenes no se rebasa la distancia de 3 metros, aún para el periodo de retorno de 1,000 años. Se consideró como valor inicial que los canales no tenían agua. Como en cada experimento las condiciones fueron muy similares, se analizarán el experimento 1 de periodo de retorno de 5 años y el experimento 5 de periodo de retorno de 1000 años. Cabe mencionar que los calados máximos y mínimos se presenta casi en los mismos puntos.

1er experimento. Periodo de retorno de 5 años. En este experimento se hace notar que no se configura el mismo nivel en toda la retícula. En los lugares que los canales no son rectos (ver Figura 36) existen diferencia de tirantes o calados. La imagen aumentada de la derecha muestra el tirante más pequeño de toda la retícula; la imagen aumentada de la izquierda muestra una sección donde los tirantes son mayores. Como se puede apreciar en la Figura 26, si el canal es recto el tirante disminuye, contrario al detalle de la izquierda en donde el tirante aumenta por la configuración curva del canal.

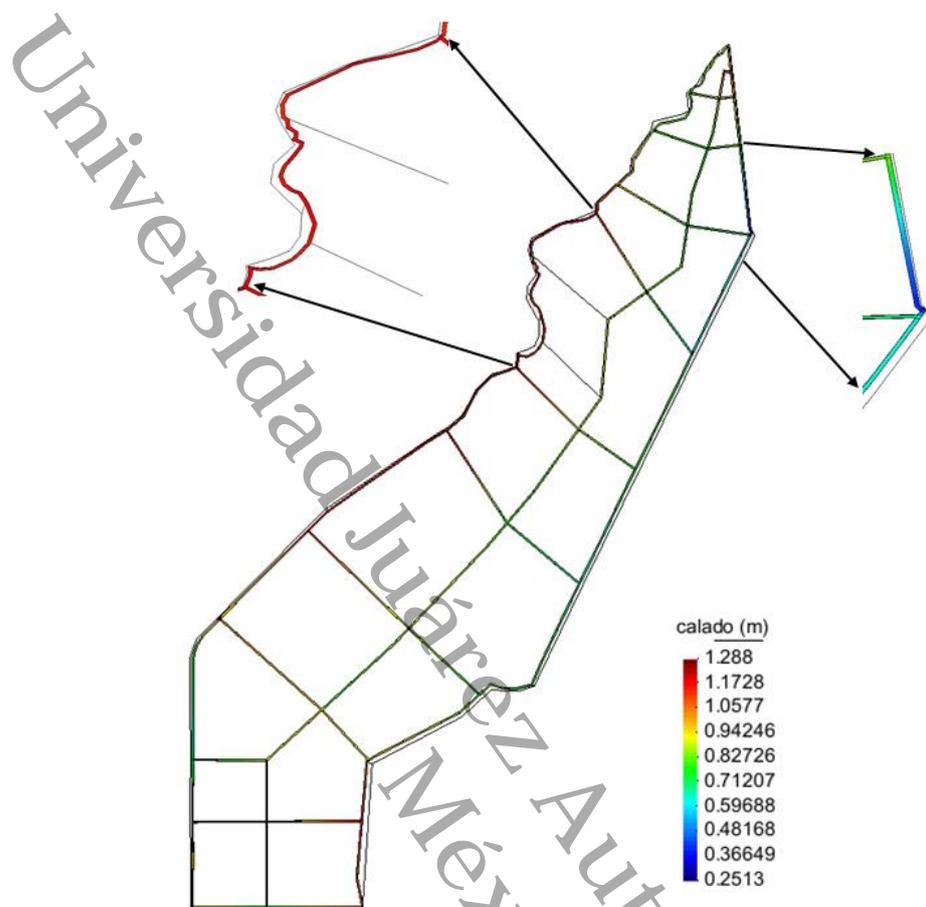


Figura 36. Resultados de los calados de la zona de estudio para un periodo de retorno de 5 años.

5° Experimento. Periodo de retorno de 1 000 años. Para este caso se analizan los calados máximos. Como se muestra en la Figura 37 el tirante máximo es de 2.36 m por lo que para un periodo de retorno de 1000 años el agua no desborda del canal. Es notorio como para los periodos de retorno entre 100 y 1000 años, solo hay un aumento que no llega al doble de diferencia.

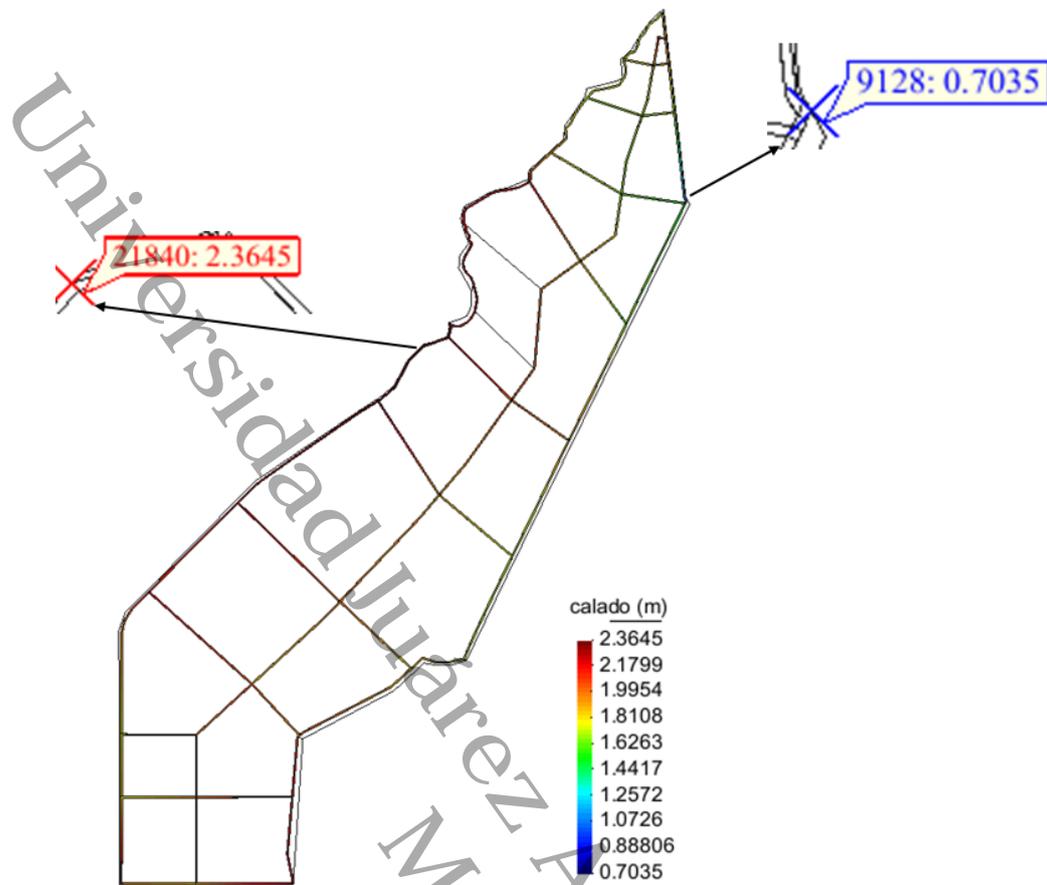


Figura 37. Resultados de los tirantes máximos de la zona de estudio para un periodo de retorno de 1 000 años.

6.3 Resultado de la simulación de lluvias en la retícula de canales

6.3.1 Asignación de condiciones de contorno y Datos del problema

Se asignan los datos de contorno y condiciones iniciales. Las variables independientes o los datos del pre-proceso para Iber son los siguientes:

Condiciones iniciales: 0 (seco).

Rugosidad: rio.

Tiempo de simulación: 200000 s. Para lluvia de 39 h y para la simulación de 5 h de lluvia: 43200 s.

Intervalo de resultados: 3600 s.

Limite seco-mojado: (0.001).

Los datos de lluvia se aplicaron con base en el hidrograma (ver Figura 33) obtenido del Cuadro 5 y Cuadro 6. Las variables dependientes consideradas en este estudio es el escurrimiento hidrológico expresado por el tirante de la zona de estudio.

Por último, se presentan las lluvias de 5 h y 39 h. La Figura 38 muestra la lluvia de 5 h, se observa como las celdas van conteniendo la lluvia, y como está escurriendo en las cercanías de los canales. El agua de lluvia se acumula en la parte más baja de la zona de estudio puesto que no tiene salida, alcanzando un desbordamiento de 1.7 m, como se pretende retener el agua de lluvia en los canales es recomendable el uso de compuertas para mantener el nivel de los canales para que este no se desborde.

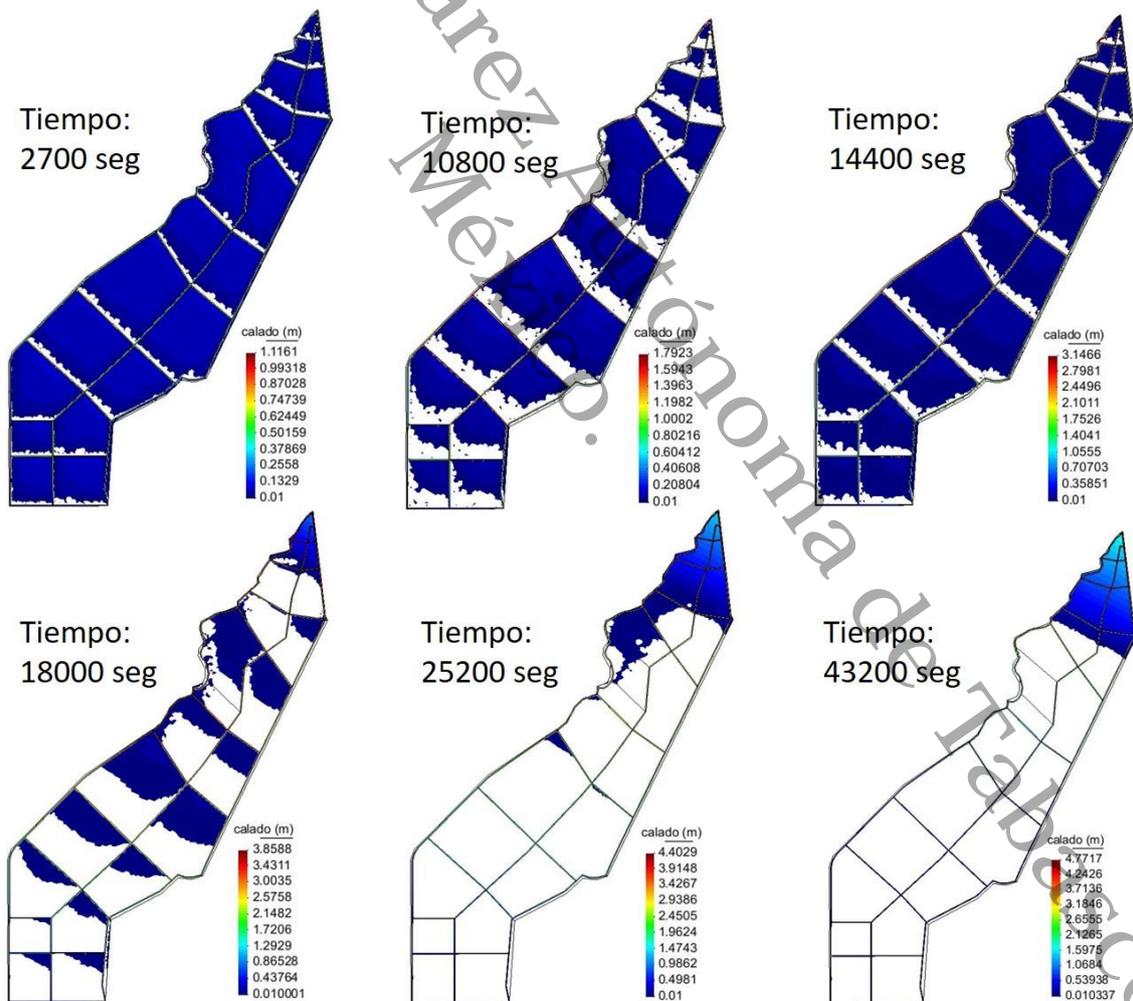


Figura 38. Resultados de simulación de lluvia de 5 h (131 mm).

La Figura 39 muestra la simulación de lluvia de 39 h. como se puede observar con esta lluvia alcanza un desbordamiento de 0.8 m, esto se debe a que el agua no tiene salida. Comparado con la Figura 38. Se observa como la lluvia mantiene latente alguna zona bajo el agua. Al intensificarse la lluvia algunas parcelas se vuelven a anegar de agua, pero rápidamente son drenadas.

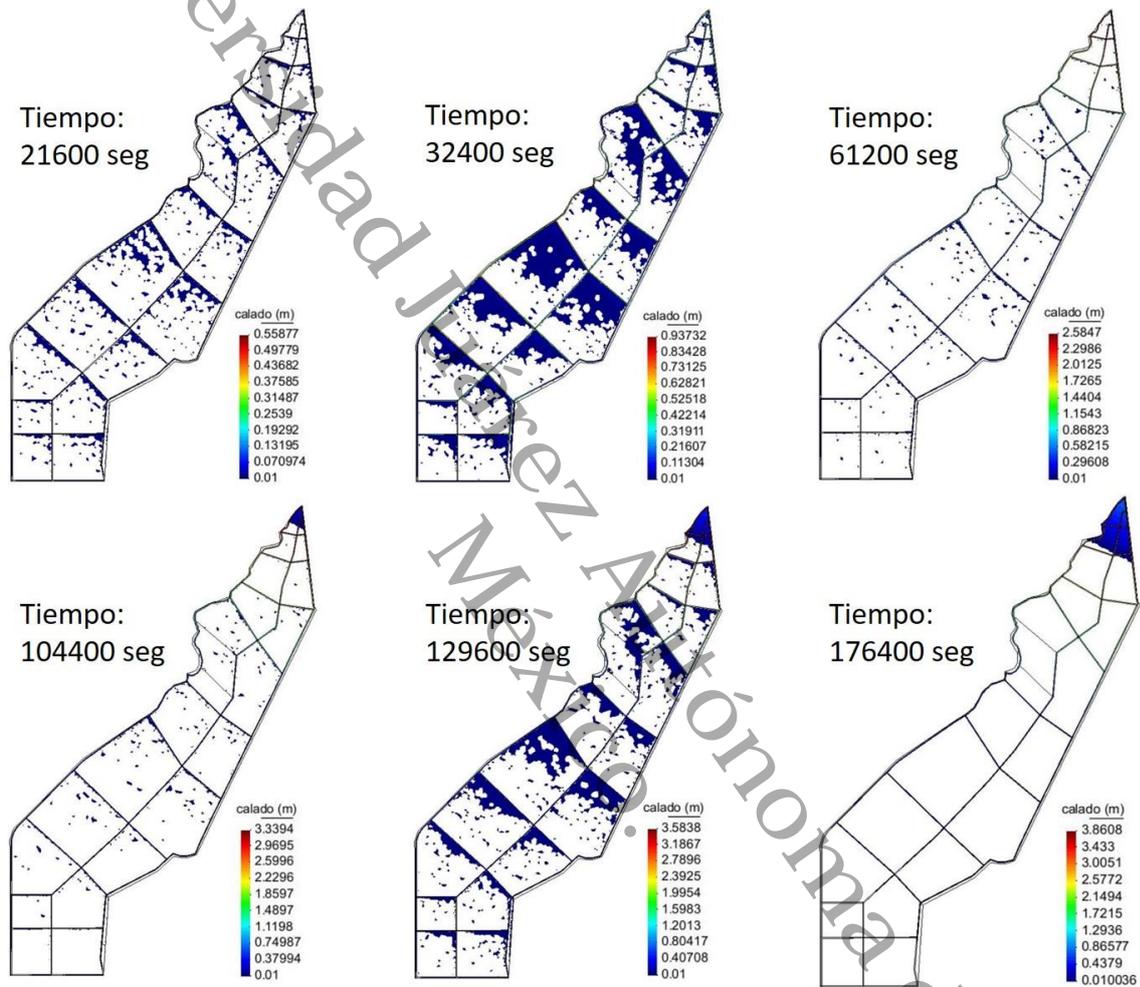


Figura 39. Resultados de simulación de lluvia de 39 h (53.7 mm).

7 Conclusiones y Recomendaciones

Como es conocido, la lluvia es el recurso de agua ideal para aprovechamiento por ser, en cuanto a demanda hídrica, una de las menos contaminada y fácil de retener mediante alguna obra civil. Lo que recomiendan los Países Bajos son los canales para guardarla. En Tabasco es fácil retenerla, almacenarla y trasvasarla mediante los canales, técnica que también civilizaciones diferentes lo realizaron para utilizar el agua en agricultura y uso humano (ver Introducción). Pero, en la época actual, se piensa en algunos casos que la lluvia ocasiona inundaciones, que los aguaceros deben drenarse lo más rápido posible al mar, cuando es lo contrario, su aprovechamiento, y la infraestructura para ello, permiten controlar las inundaciones de una forma efectiva; pueden controlarse tanto por desbordamiento de los ríos como por exceso de lluvia (ver Figura 34y Figura 38).

En el transcurso de esta investigación se resolvieron ecuaciones de Navier Stokes o las ecuaciones de flujo de agua somera; y se trabajó con software libre. Por ello se desarrollaron varias metodologías para lograr los objetivos planteados. El aprendizaje fue tan abundante que se puede seguir trabajando en: la optimización de las metodologías, optimización de las medidas de los canales (ancho, profundidad y longitud), propuestas para mapas de riesgo por inundación, propuesta de canales en ciudades, es decir, se abren campos de investigación para explorar una visión del agua acorde con las necesidades humanas y adaptación al cambio climático.

Además, con base en la metodología aplicada en este trabajo se pudo observar que la implementación de retículas de canales en la zona de estudio puede ser de gran utilidad para el manejo del agua. Con el control del agua se puede suministrar la cantidad necesaria para la producción agrícola, ya que el agua se administraría para cada parcela y lograr obtener la capacidad de campo por cultivo. La implementación de canales secundarios ayuda a esto; pero también ayuda a que el agua, en época de lluvias, no inunde el terreno o retenga en exceso el agua en las parcelas; con los canales secundarios el agua se drena rápido y la conduce a los primarios; con ello se puede tener el terreno disponible ideal para producción agrícola, como lo hacen en Holanda y en países de alta producción agrícola.

Se está seguro que la construcción de retículas de canales en Tabasco sería de un gran éxito para la sociedad tabasqueña y nacional, y de un gran impacto como modelo productivo y amable con la naturaleza. La implementación de retículas de canales para zonas de planicie costera, es ideal para retardar la subsidencia y evitar la contaminación de acuíferos por salinidad. Pero

también los canales recobran flora y fauna, purifican el agua, son altamente productivos y son generadores de empleos.

Aunado a la propuesta de las retículas de canales se puede utilizar la técnica de Holanda, alimentando la retícula con un canal elevado para sostener el nivel del agua en caso de pérdida por evaporación y evapo-transpiración. Así, se garantiza que los canales en la zona siempre estarían en su tirante ideal de agua para garantizar la capacidad de campo y recarga de los acuíferos. Su vaciado solo sería cuando se esperen lluvias torrenciales, y este será solo parcial. Los canales deben estar siempre al nivel favorable de su capacidad para conseguir la humedad óptima para las plantas.

La retícula de canales se debe proponer para todo el valle de un río, y no solo como en este trabajo que se realizó en forma parcial. Al abarcar todo el valle, o con otro enfoque en toda la cuenca, se lograría controlar de mejor manera las crecidas, además, se piensa que se puede recuperar, en parte, los ecosistemas que tenía el río antes de las modificaciones antropomórficas. Varios autores (Ecoagriculture Snapshot, 2010) muestran que es una forma efectiva de recuperar la biota.

8 Referencias bibliográficas

- AgroEs. (2016). *Capacidad de campo*. AgroEs.es. España.
<http://www.agroes.es/agricultura/el-suelo/147-capacidad-de-campo-del-suelo-agricultura>.
- Ballén, J. A. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia*. Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água, Brasil.
<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>
- Breen, D. v. (1658). *Historic map of beemster y netherlands*. Beemsterlants caerte, Holanda.
- CONAGUA. (2009). *Semblanza histórica del agua en México. Las obras hidráulicas en las épocas prehispánica y colonial*. México, DF. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2013). *Comisión Nacional del Agua*. México.
<http://www.conagua.gob.mx/>
- Denevan, W. (1970). *Aboriginal Drained-Field Cultivation in the Americas: Pre-Columbian reclamation of wet lands was widespread in the savannas and highlands of Latin America*. *Science*, 169, 647-654.
- Echeagaray Bablot, L. (1955). *Conceptos de la cuenca Grijalva - Usumacinta*. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D.F.
- Ecoagriculture Snapshot. (2010). *Biodiversity-friendly aquaculture on the Veta la Palma Estate, Spain*. Lingaleo. España.
http://www.ecoagriculture.org/case_study.php?id=77
- García de Miranda, E. (1986). *Apuntes de Climatología*. Talleres de Offset Larios S. A. México: 5ª. Edición.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de koppen*. México: Comisión Nacional para el estudio de la Biodiversidad (CONABIO).
- González Carmona, E., & Torres Valladares, C. (2014). *La sustentabilidad agrícola de las chinampas en el valle de México: caso xochimilco*. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 34, 699-709.
- Hernández J., R. E., & Calix G, C. N. (2014). *Manual de modelado hidráulico en dos dimensiones con software y validación en el laboratorio*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Cunduacan, Tabasco, México
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). *Datos relieve*. INEGI:
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Número de Habitantes*. INEGI.

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/Tab/Poblacion/default.aspx?tema=ME&e=27>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). *INEGI*. Recuperado el 21 de sep de 2014, de Zona Hidrogeológica. Llanura Costera Golfo Sur Parte Centro: www.inegi.org.mx
- Jiménez Osorio, J. J., & Rorive, V. M. (1991). Conclusiones de la Mesa 1: Aspectos Técnicos y Líneas de Investigación. En J. J. Jiménez Osorio, & V. M. Rorive, Los camellones chontales y chinampas tropicales. Memorias del Simposio-Taller Internacional sobre Camellones y Chinampas Tropicales. Universidad Autónoma de Yucatán. (pág. 335/346). Villahermosa, Tabasco
- León Portilla, M. (1992). *The Broken Spears: The Aztec Account of the Conquest of Mexico*. Princeton, New Jersey. Beacon Press.
- López Broca, G. L., Munguía Balvanera, E., & de la Cruz Burelo, E. (2017). *Portal Juchimán*. Alerta de semáforo. Villahermosa, Tabasco. <http://juchiman.tabasco.gob.mx>
- Mezansa, A. (2011). *Aprovechamiento de agua de lluvia*. ECOHABITAR. Valencia, España <http://www.ecohabitar.org/aprovechamiento-de-agua-de-lluvia/>
- Morehart, C. T. (2012). *Mapping ancient chinampa landscapes in the Basin of Mexico: a remote sensing and GIS approach*. Journal of archaeological science, 39(7), 2541-2551. doi:10.1016/j.jas.2012.03.001
- Moreno, P., & Infante, D. (2010). *Veracruz. Tierra de ciénagas y pantanos*. México D.F.: Offset Santiago. http://www1.inecol.edu.mx/costasustentable/esp/pdfs/Publicaciones/CienagasYPantanos/II_GenteYPueblosDeHumedales.pdf
- Munguía-Balvanera, E., Alavez-Ramirez, J., & Blanco-Piñon, A. (2016). Análisis hidrodinámico de rejas de canales mediante simulaciones numéricas bidimensionales. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), 73-92.
- OCEANA. (2010). *Doñana y el golfo de cádiz*. OCEANA. España. Imprenta Roal.
- Ojeda A, A. (2016). *Simulación bidimensional de la escorrentía superficial en la cuenca del río Cuxcuchapa*. Cunduacán, Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (2010). *Fortalecer la Gestión Efectiva y Democrática del Agua y Saneamiento en México para Apoyar el Logro de los Objetivos del Milenio*. Estado de Tabasco. FIODM.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2006). *Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible*. FAO: http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sm/soil_moisture.pdf
- PEMEX-CONAGUA. (2013). *Reporte: Análisis Hidrológico y Obtención de Gastos de Operación a Diversos Periodos de Retorno del Cruzamiento en el Río Cuxcuchapa del km-5+811.116 al km-5+825.290*. PEMEX-CONAGUA. Villahermosa, Tabasco:

- Pérez Sánchez, J. M. (2007). *El manejo se los recursos naturales bajo el modelo agrícola de camellones chontales en Tabasco*. Iberóforum. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana, II(4). Ciudad de México.
- Peterson, J. T., & Kwak, T. J. (2010). *Improve water retention*. REstoring rivers FOR effective catchment Management. Reform, 15-28. Europa.
- Russi D., Ten Brink P., Farmer A., Badura T., Coates D., Förster J., Kumar R. and Davidson N. (2013) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. IEEP, London and Brussels; Ramsar Secretariat, Gland.
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal*. Roma, Italia. Boletín de la FAO 79.
- Stephan, E. (1997). *Las chinampas y los canales de xochimilco y tláhuac*. Asamblea Legislativa del Distrito Federal. Tepepan, Xochimilco, México
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2010). *Patrimonio Mundial No. 56. Año internacional de la diversidad biológica; Sinergias y soluciones.*, Paris. UNESCO.
- Veta La Palma, Parque Natural. (2010). *Ecología*. Veta La Palma. Sevilla, España.
<http://www.vetalpalma.es/ecologia.asp?LG=1>
- Water Board De Dommel. (2016). *Beleidsregels voor waterkering, waterkwantiteit en grondwater Keur waterschap*. Waterschap De Dommel.
http://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/xhtmloutput/Historie/Waterschap%20De%20Dommel/448431/448431_2.html

9 Anexos

9.1 Anexo 1. Glosario

Calado

Calado o tirante es la profundidad del flujo.

Iber

Iber es un software bidimensional desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE).

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, la evaluación de zonas de riesgo, el cálculo de transporte de sedimentos, y el flujo de marea en estuarios.

Lidar

El lidar es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS). Para realizar este escaneado se combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner.

La nube de puntos es un conjunto de puntos con posición tridimensional X,Y,Z, obtenidos a través de tecnología Lidar. La nube de puntos se genera en archivos binarios en formato LAS, que corresponde a un estándar abierto para el intercambio de datos de LIDAR entre generadores y usuarios; es de tipo binario y su uso es alternativo a formatos de sistemas propietarios y genéricos de intercambio ASCII.

Estos datos del Lidar sirven para definir la superficie del terreno y generar Modelos Digitales de Elevación (MDE). El levantamiento Lidar tiene ventajas sobre la captura con métodos convencionales: requiere de mínimo control geodésico en tierra, los datos tienen una mayor densidad y una mayor precisión. La nube de puntos en formato LAS es útil para la generación de imágenes de intensidad; tiene una amplia utilidad para la clasificación y filtrado (automático y manual) de puntos del terreno y los ubicados por encima de éste.

MDE:

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Existen dos tipos de MDE: Modelo Digital de Superficie que se refiere a la superficie de la tierra e incluye todos los objetos que esta contiene. Y el segundo Modelo Digital de Terreno que representa la superficie de suelo desnudo y sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios

Nurbs:

B-splines racionales no uniformes o NURBS (acrónimo inglés de non-uniform rational B-spline) es un modelo matemático muy utilizado en la computación gráfica para generar y representar curvas, superficies y diseño de geometría. Algunas razones para el uso de los mismos son:

- Ofrecen una forma matemática común para las formas analíticas estándar y de forma libre.
- Proveen flexibilidad para diseñar una gran variedad de formas.
- Pueden ser evaluadas razonablemente rápido por algo ritmos estables y precisos.
- Son invariantes luego de aplicar transformaciones a fines y de perspectivas.

Qgis

Quantum GIS (QGIS) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto.

QGIS soporta un gran número de formatos ráster y vectoriales, con nuevos soportes fácilmente añadidos utilizando su arquitectura de complementos.

Raster

En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

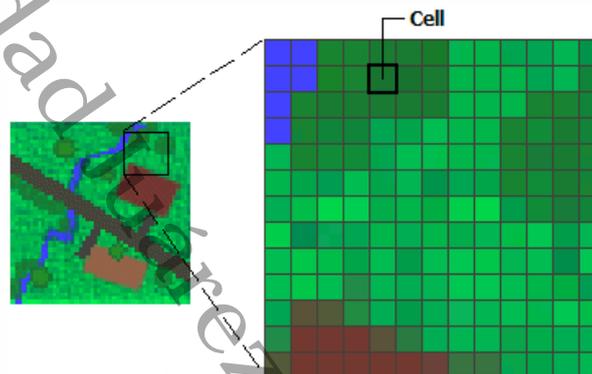


Figura 40. Imagen de un ráster

Los datos almacenados en formato ráster representan fenómenos del mundo real:

- Los datos temáticos (también conocidos como discretos) representan entidades como datos de la tierra o de uso de la tierra.
- Los datos continuos representan fenómenos como la temperatura, la elevación o datos espectrales, entre ellos imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- Las imágenes incluyen mapas escaneados o dibujos y fotografías de edificios.

Los rásteres de imágenes suelen utilizarse como atributos en tablas: pueden visualizarse con datos geográficos y se utilizan para transmitir información adicional acerca de las entidades geográficas de mapas.

R tin

La comunidad SIG ha utilizado las redes irregulares de triángulos (TIN) durante muchos años y son un medio digital para representar la morfología de la superficie. Las TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación

de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos.

9.2 Anexo 2. Simbología de clima

UNIDAD DE CLIMA CÁLIDO

Área donde la manifestación de los elementos meteorológicos (precipitación, temperatura), a través de un número dado de años, corresponde al grupo de climas cálidos, cuya característica de temperatura media del mes más frío es mayor de 18 ° C

Atributos

DOMINIO FIJO

FÓRMULA CLIMÁTICA: Combinación de letras mayúsculas y minúsculas, donde algunas de ellas pueden estar entre paréntesis, llevar un apóstrofo y/o un número, que en conjunto determinan el tipo de clima.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

A f
A f (m)
A m (f) A m
A m (w)
A w2 (w) A w2
A w2 (x')
A w1(w) A w1
A w1(x')
A w0(w) A w0
A w0 (x') A (C) f
A (C) f (m)
A (C) m (f) A (C) m
A (C) m (w)
A (C) w2 (w) A (C) w2
A (C) w2 (x')
A (C) w1 (w) A (C) w1
A (C) w1 (x')
A (C) w0 (w) A (C) w0
A (C) w0 (x')

CLAVE DEL SUBGRUPO. - Identificador conformado por una o dos letras mayúsculas, donde una de ellas puede estar entre paréntesis, condicionando el significado de la letra libre.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

A. Corresponde al cálido

A(C). Corresponde al semicálido.

SUBGRUPO. - Término que identifica cada una de las subdivisiones del grupo de climas cálidos, tomando en cuenta básicamente la temperatura media anual.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

Cálido. Temperatura media anual mayor de 22 ° C. Semicálido. Temperatura media anual entre 18 y 22 ° C.

CLAVE DEL TIPO. - Identificador conformado por una ó dos letras minúsculas, donde alguna de ellas puede estar entre paréntesis, condicionando a la letra libre que corresponde a régimen de lluvia.1

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

f (m). Corresponde al húmedo. m (f). Corresponde al húmedo. m (w). Corresponde al húmedo.

w (x'). Corresponde al subhúmedo. w (w). Corresponde al subhúmedo.

TIPO. - División de los subgrupos, considerando el régimen de lluvia y el porcentaje de lluvia invernal, con respecto al total anual.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

Húmedo. Son aquellos cuyo régimen de lluvias corresponde a todo el año o abundantes lluvias en verano Subhúmedo. Son aquellos cuyo régimen de lluvias es de verano y presentan sequía en invierno

CLAVE DEL SUBTIPO. - Identificador conformado por un número, representado en forma de subíndice junto a la clave del tipo subhúmedo y a la clave de régimen de lluvias de verano.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

0. Corresponde al menos húmedo.

1. Corresponde al de humedad media.

2. Corresponde al más húmedo.

Restricciones del Atributo:

No aplica: Indica que éste atributo no es válido, cuando el valor del atributo Tipo es húmedo.

SUBTIPO. - División de los tipos, considerando el grado de humedad que se obtiene del cociente de la precipitación entre la temperatura (P/T).

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

Menos húmedo. Con cociente menor de 43.2

Humedad media. Con cociente menor entre 43.2 y 55.0 Más húmedo. Con cociente mayor de 55.0

Restricciones del Atributo:

No aplica: Indica que éste atributo no es válido, cuando el valor del atributo Tipo es húmedo.

CLAVE DE RÉGIMEN DE LLUVIA. - Identificador conformado por una letra minúscula.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

w. Corresponde al de verano.

m. Corresponde al de abundante de verano.

f. Corresponde al de todo el año.

RÉGIMEN DE LLUVIA. - Comportamiento de la lluvia durante el año, que indica la temporada en la cual se concentra la mayor cantidad de la misma.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

De verano. Cuando el mes de máxima precipitación se presenta dentro del período mayo-octubre, y este mes recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año.

Abundantes de verano. Es un intermedio entre el régimen de verano y el de todo el año, semejante al primero en cuanto a la distribución anual de la lluvia y al segundo en cuanto a la cantidad total de precipitación.

Todo el año. Cuando el mes más lluvioso en el período mayo-octubre no tiene diez veces más precipitación que el mes más seco, o si el mes más lluvioso, fuera de este período, recibe una precipitación que no llega a tres veces la que recibe en el mes más seco.

CLAVE DE PORCENTAJE DE LLUVIA INVERNAL. - Identificador conformado por o dos letras minúsculas, donde alguna de ellas puede estar encerrada entre paréntesis.

TIPO DE DATO: Carácter

DOMINIO DE VALORES:

(w). Corresponde a < 5

(f). Corresponde a > 10.2 en tipo húmedo (x'). Corresponde a > 10.2 en tipo subhúmedo

(m) Corresponde a < 18

Restricciones de Integridad:

No aplica: Indica que éste atributo no es válido, cuando el valor del atributo Porcentaje de Lluvia Invernal

está entre 5 y 10.2 o es > 18 .

PORCENTAJE DE LLUVIA INVERNAL. - Cantidad de lluvia en este período con respecto a la total anual.

TIPO DE DATO: Carácter

UNIDADES: Expresado en porcentaje

DOMINIO DE VALORES:

< 5

entre 5 y 10.2

> 10.2

> 18

< 18

PRECIPITACIÓN DEL MES MÁS SECO. - Promedio aritmético calculado a partir del total de precipitación del mes más seco, a lo largo de un período determinado de años.

TIPO DE DATO: Carácter

UNIDADES: Milímetros

DOMINIO DE VALORES:

> 60

< 60

TEMPERATURA MEDIA ANUAL. - Promedio aritmético calculado a partir de la suma de las temperaturas medias mensuales, a lo largo de un período determinado de años.

TIPO DE DATO: Carácter

UNIDADES: Grados centígrados

DOMINIO DE VALORES:

entre 18 y 22

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

RESTRICCIONES DE INTEGRIDAD

COMBINACIÓN(ES) AUTORIZADA(S) DE VALORES DE ATRIBUTOS	
Af,	A, Cálido, N/A, húmedo, N/A, N/A, f, todo el año, N/A, > 18, > 60, > 22
Af(m),	A, Cálido, f(m), húmedo, N/A, N/A; f, todo el año, (m), < 18, > 60, > 22
Am(f),	A, Cálido, m(f), húmedo, N/A, N/A, m, abundante de verano, (f), > 10.2, < 60, > 22
Am,	A, Cálido, N/A, húmedo, N/A, N/A, m, abundante de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, > 22
Am(w),	A, Cálido, m(w), húmedo, N/A, N/A, m, abundante de verano, (w), < 5, < 60, > 22
Aw ₂ (w),	A, Cálido, w(w), subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, (w), < 5, < 60, > 22
Aw ₂ ,	A, Cálido, N/A, subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, > 22
Aw ₂ (x'),	A, Cálido, w(x'), subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, (x'), > 10.2, < 60, > 22
Aw ₁ (w),	A, Cálido, w(w), subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, (w), < 5, < 60, > 22
Aw ₁ ,	A, Cálido, N/A, subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, > 22
Aw ₁ (x'),	A, Cálido, w(x'), subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, (x'), > 10.2, < 60, > 22
Aw ₀ (w),	A, Cálido, w(w), subhúmedo, 0, menos húmedo, w, de verano, (w), < 5, < 60, > 22
Aw ₀ ,	A, Cálido, N/A, subhúmedo, 0, menos húmedo, w, de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, > 22
Aw ₀ (x'),	A, Cálido, w(x'), subhúmedo, 0, menos húmedo, w, de verano, (x'), > 10.2, < 60, > 22
A(C)f,	A(C), Semicálido, N/A, húmedo, N/A, N/A, f, todo el año, N/A, > 18, > 60, entre 18 y 22
A(C)f(m),	A(C), Semicálido, f(m), húmedo, N/A, N/A, f, todo el año, (m), < 18, > 60, entre 18 y 22
A(C)m(f),	A(C), Semicálido, m(f), húmedo, N/A, N/A, m, abundante de verano, (f), > 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)m,	A(C), Semicálido, N/A, húmedo, N/A, N/A, m, abundante de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)m(w),	A(C), Semicálido, m(w), húmedo, N/A, N/A, m, abundante de verano, (w), < 5, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₂ (w),	A(C), Semicálido, w(w), subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, (w), < 5, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₂ ,	A(C), Semicálido, N/A, subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₂ (x'),	A(C), Semicálido, w(x'), subhúmedo, 2, más húmedo, w, de verano, (x'), > 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₁ (w),	A(C), Semicálido, w(w), subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, (w), < 5, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₁ ,	A(C), Semicálido, N/A, subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₁ (x'),	A(C), Semicálido, w(x'), subhúmedo, 1, humedad media, w, de verano, (x'), > 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₀ (w),	A(C), Semicálido, w(w), subhúmedo, 0, menos húmedo, w, de verano, (w), < 5, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₀ ,	A(C), Semicálido, N/A, subhúmedo, 0, menos húmedo, w, de verano, N/A, entre 5 y 10.2, < 60, entre 18 y 22
A(C)w ₀ (x'),	A(C), Semicálido, w(x'), subhúmedo, 0, menos húmedo, w, de verano, (x'), > 10.2, < 60, entre 18 y 22

Figura 41. Combinación(es) autorizada(s) de valores de atributos. Fuente: Fuente: INEGI: Base de datos geográficos, INEGI. Diccionario de datos geográficos 1:250 000 y 1:1000000