



**UNIVERSIDAD DON VASCO A.C.**

**INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO No. 8727-15**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE DRENAJE CON  
CANALES EN UNA PLANICIE DE INUNDACIÓN,  
APLICANDO LA MODELACIÓN MATEMÁTICA”**

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**PAVEL SALVADOR RINCÓN**

**ASESOR:**

**ING. ANASTASIO BLANCO SIMIANO**

URUAPAN MICHOACÁN

MAYO, 2007|

---

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por que sin Él no es nada.

A mis Padres, Bertha y Heraclio que son un ejemplo de vida y con su amor incondicional me han regalado esta vida.

A mis Hermanos, Juan Carlos, Ramses, Irais, Amadeo y Cristian que siempre me han apoyado y en ellos me inspiro para mi superación personal.

A toda mi familia abuelas, tíos, primos, sobrinos, a todos ellos que representan un pilar en mi vida.

A mis profesores que se involucraron en mi formación en la vida profesional.

A mis amigos, que han estado siempre conmigo apoyando en el desarrollo de esta tesis.

A mi esposa...

# ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1. CICLO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>11</b>
1.1 CUENCAS HIDROGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS .....	13
1.2 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE UNA CUENCA. ....	15
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE DRENAJE.....	22
<b>CAPITULO 2. LLUVIA Y ESCORRENTÍA.....</b>	<b>25</b>
2.1 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	34
2.2 CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA .....	41
2.2.1 <i>Método Racional.</i> .....	41
2.2.2 <i>Método Racional Modificado.</i> .....	42
2.2.3 <i>Método de Ferrer.</i> .....	43
2.2.4 <i>Método del hidrograma unitario sintético.</i> .....	44
2.2.5 <i>Otros métodos de cálculo del caudal</i> .....	45
<b>CAPITULO 3. HIDRÁULICA.....</b>	<b>47</b>
3.1 HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS .....	47
3.2 PROPIEDADES DE LOS CANALES ABIERTOS.....	49
3.2.1 <i>Rugosidad.</i> .....	49
3.2.2 <i>Viscosidad</i> .....	51
3.2.3 <i>Energía</i> .....	52
3.2.4 <i>Momento</i> .....	55
<b>CAPITULO 4. MODELACIÓN MATEMÁTICA .....</b>	<b>60</b>
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	60
4.2 PROGRAMAS DE CÓMPUTO EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	61
4.3 SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE CÓMPUTO .....	63
4.4 DESCRIPCIÓN PARTICULAR DEL PROGRAMA SELECCIONADO .....	64
<b>CAPITULO 5. DISEÑO DE UNA RED DE DRENAJE SUPERFICIAL .....</b>	<b>64</b>
5.1 GENERALIDADES. ....	64
5.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO. ....	65
5.2.1 <i>Fisiografía</i> .....	67
5.2.2 <i>Hidrografía.</i> .....	69

5.2.3	<i>Flora y fauna</i> .....	70
5.3	COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO CONCEPTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	73
5.4	INFORMACIÓN BÁSICA PARA LA CONFORMACIÓN DEL MODELO	
	MATEMÁTICO. ....	76
5.4.1	<i>Información topográfica</i> .....	76
5.4.2	<i>Información hidrológica</i> .....	78
5.5	CÁLCULO DEL GASTO DE DISEÑO. ....	88
5.5.1	<i>Cuenca A</i> .....	88
5.5.2	<i>Cuenca B</i> .....	93
5.5.3	<i>Cuenca C</i> .....	94
5.6	ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	95
5.6.1	<i>Modelo matemático en condiciones naturales</i> . ....	95
5.6.2	<i>Conformación del modelo matemático en las obras de rectificación</i> .....	109
5.7	CONCLUSIONES DEL MÉTODO.....	122
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....</b>	<b>125</b>
5.8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	125
	<b>BIBLIOGRFÍA .....</b>	<b>127</b>
	<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>130</b>
	<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>132</b>

# Índice de tablas

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Coeficientes de los factores físicos de las cuencas mostradas en la Figura 1.3 .....	18
Tabla 2.1 Alturas de precipitación de lluvias en incrementos de tiempo de 3 hr. ....	26
Tabla 2.2 Métodos para la obtención del tiempo de concentración $t_c$ , para diferentes aplicaciones .....	36
Tabla 2.3 Coeficientes C para aplicación del método racional.....	38
Tabla 5.1 Características fisiográficas de las cuencas de estudio .....	78
Tabla 5.2 Precipitación media obtenida para la cuenca A.....	82
Tabla 5.3 Precipitación media obtenida para la cuenca B .....	83
Tabla 5.4 Precipitación media obtenida para la cuenca C .....	84
Tabla 5.5 Valores de precipitación media en la cuenca A para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones de tormenta, incluye 5 años. ....	86
Tabla 5.6 Valores de precipitación media en la cuenca B para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones de tormenta, incluye 5 años. ....	86
Tabla 5.7 Valores de precipitación media en la cuenca C para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones de tormenta, incluye 5 años. ....	86
Tabla 5.8 Cálculo del tiempo de concentración de la cuenca A. ....	89
Tabla 5.9 Gasto de aportación de la cuenca A, obtenido por el Método Racional Modificado para un periodo de retorno de 5 años.....	90
Tabla 5.10 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años, según el método de Ferrer.....	91
Tabla 5.11 Cálculo del tiempo de concentración de la cuenca B. ....	92
Tabla 5.12 Gasto para la cuenca B obtenido por el Método Racional Modificado para un periodo de retorno de 5 años. ....	93
Tabla 5.13 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años, para la cuenca B según Ferrer. ....	93
Tabla 5.14 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años en la cuenca, obtenido por el Método Racional Modificado.....	93
Tabla 5.15 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años, para la cuenca C según Ferrer .....	93
Tabla 5.16 Distribución inicial de gastos en las diferentes corrientes que conforman el sistema de drenaje de Los Zapotes.....	98
Tabla 5.17 Definición de las condiciones de frontera en el modelo matemático y su ubicación en el tramo de río. ....	100
Tabla 5.18 Comportamiento del flujo de entrada y salida de la zona lagunar. ....	106
Tabla 5.19 Ejemplo tabulado de los resultados obtenidos de la modelación matemática. ....	107
Tabla 5.20 Características de las secciones transversales consideradas en la rectificación, Alternativa 1. ....	110
Tabla 5.21 Distribución inicial de gastos empleada en el análisis hidráulico de la primera alternativa. ....	112

Tabla 5.22 Comportamiento del flujo de entrada y salida de los ríos Zapotes I y Pajonal hacia la zona lagunar.	114
Tabla 5.23 Presupuesto aproximado de la alternativa 1, con precios de la zona de estudios en el cuarto trimestre del año 2006.....	117
Tabla 5.24 Presupuesto aproximado de la alternativa 2, con precios de la zona de estudios en el cuarto trimestre del año 2006.....	123

## Índice de figuras

Figura 1.1 Representación esquemática del ciclo hidrológico.....	12
Figura 1.2 Representación del área de drenaje de una cuenca.....	16
Figura 1.3 Identificación de tres cuencas hidrográficas y sus principales escurrimientos en una planicie, plataforma base cartografía de INEGI. ....	18
Figura 1.4 Esquematzación de la obtención de la pendiente media de una cuenca, los valores de L no se presentan solo como literales para ejemplificar. ....	19
Figura 1.5 Datos necesarios para calcular la pendiente de del cauce principal, elevación máxima y mínima de la cuenca y la longitud del cauce principal .....	21
Figura 1.6 Muestra el centro de gravedad de la cuenca en el plano X-Y obtenido con Civil 3D .....	22
Figura 2.1 Hietograma obtenido de la Tabla 2.1 de para un incremento de tiempo de 3 hr. ....	26
Figura 2.2 Hietograma obtenido de la Tabla 2.1 de para un incremento de tiempo de 6 hr .....	26
Figura 2.3 Hietograma obtenido de la Tabla 2.1 de para un incremento de tiempo de 12 hr .....	26
Figura 2.4 Hietograma obtenido de la Tabla 2.1 de para un incremento de tiempo de 24 hr .....	27
Figura 2.5 Curva masa formada a partir del registro de la Tabla 2.1.....	27
Figura 2.6 Intensidad de lluvia marcada por curvas de isoyetas en mm/hr, para una duración y un periodo de retorno $T_r$ determinados. Fuente SCT – DGST .....	28
Figura 2.7 Formación de polígonos de Thiessen, mediante mediatrices a las líneas imaginarias que unen a las estaciones pluviométricas. ....	31
Figura 2.8 Representación de áreas entre isoyetas con valores medios de precipitación entre cada isoyeta. ....	32
Figura 2.9. Elementos de un hidrograma.....	34
Figura 2.10 Apreciación del método del hidrograma sintético y un hidrograma típico. $T_b$ es el tiempo base, $T_p$ es el tiempo de ocurrencia del caudal pico y $T_r$ el tiempo de retardo .....	40
Figura 3.1 Curva de energía específica para un canal de pequeña pendiente a cero .....	49
Figura 3.2 Energía en un flujo gradualmente variado en canales abiertos .....	50
Figura 3.3 Aplicación de la ecuación de momento en un cuerpo sumergido en agua. ....	52
Figura 5.1. Localización de la región sureste y el estado de Tabasco dentro de la República Mexicana, y la zona de estudio en el estado. ....	65
Figura 5.2. Límites de la zona de estudio. ....	66
Figura 5.3 Distribución actual de las regiones hidrológicas en el país (fuente CONAGUA).....	68
Figura 5.4 Planteamiento de los trazos de los drenes y lagunas sobre la cartografía de INEGI, en escala 1:50, 000. ....	76
Figura 5.5 Delimitación de las subcuencas de aportación hacia el sistema de drenaje.....	78
Figura 5.6 Mapa de las intensidades de lluvia promedio anual en México registradas por el INEGI .....	79
Figura 5.7 Mapas de isoyetas publicados por la SCT y utilizados en este estudio .....	80

Figura 5.8 Curvas de intensidad duración para un periodo de retorno de 5 años en las cuencas A, B y C .....	87
Figura 5.9 Ajuste de la curva de intensidad de lluvia asociada a un periodo de retorno de 5 años en la cuenca A.	89
Figura 5.10 Ajuste de la curva de intensidad de lluvia asociada a un periodo de retorno de 5 años para la cuenca B.....	92
Figura 5.11 Topología empleada en la modelación matemática del sistema de drenaje en condiciones naturales.	95
Figura 5.12 Sección transversal del cauce Zapotes III, tramo Zapotes T-4, obsérvese que el ancho máximo del cauce es de 30 m. ....	96
Figura 5.13 Sección extendida en la planicie, los puntos rojos indican la sección del cauce, en tanto que hacia sus extremos indica la llanura de inundación.....	96
Figura 5.14 Esquema general del modelo matemático, en la figura se muestra el cauce Zapotes II en sus tres tramos. ....	97
Figura 5.15 Distribución inicial de gastos, empleados como frontera en el modelo matemático.....	99
Figura 5.16 Ubicación de las condiciones de frontera empleadas en el modelo matemático. ....	101
Figura 5.17 Curva Elevaciones-Gastos empleada como frontera aguas abajo del río Zapotes I.....	102
Figura 5.18 Curva Elevaciones-Gastos empleada como frontera aguas abajo del río Zapotes II.....	102
Figura 5.19 Localización de la zona de regulación ubicada aguas arriba de la zona de estudio.....	103
Figura 5.20 Curva elevaciones capacidades de la zona lagunar ubicada aguas arriba de la zona de estudio. ....	103
Figura 5.21 Sección transversal del puente Zapotes I. ....	104
Figura 5.22 Sección transversal del puente Zapotes II. ....	104
Figura 5.23 Perfil hidráulico del cauce Zapotes I desde su inicio aguas arriba hasta su descarga en el río Grijalva. ....	105
Figura 5.24 Perfil hidráulico del cauce Zapotes II desde su inicio aguas arriba hasta su descarga en el río Grijalva. ....	106
Figura 5.25 Mancha de inundación que genera la ocurrencia de una avenida de diseño de 5 años de periodo de retorno. Superficie inundada 13289.19 has, con tendencia de uso agrícola y ganadero. ....	108
Figura 5.26 Esquema general de los drenes que conforman la alternativa de solución 1. Las líneas que se muestran en color rojo representan a los cauces que se van a modificar. ....	110
Figura 5.27 Sección transversal compuesta, donde el fondo del cauce es más profundo que el fondo de la rectificación. ....	111
Figura 5.28 Perfil hidráulico del cauce Zapotes I desde su inicio en la estación 308 hasta su descarga en el río Grijalva. ....	114
Figura 5.29 Perfil hidráulico del cauce Zapotes II desde su inicio en la laguna Sabanilla hasta su descarga en el río Grijalva.....	114
Figura 5.30 Mancha de inundación generada por la avenida de diseño. Superficie inundada 9,494 ha, con tendencia de uso de suelo agrícola y ganadero. ....	116
Figura 5.31 Esquema general de los drenes que conforman la alternativa 2. Las líneas que se muestran en color rojo representan a los cauces que se van a modificar.....	118
Figura 5.32 Sección tipo del canal propuesto para la conducción propuesta en la alternativa 2. ....	119

Figura 5.33 Sección propuesta para el puente vehicular que por donde cruzarán los escurrimientos en el canal propuesto en esta alternativa.....	119
Figura 5.34 Perfil hidráulico del cauce Zapotes I desde su inicio en la estación 308 hasta su descarga en el río Grijalva, alternativa 2.....	120
Figura 5.35 Perfil hidráulico del cauce Zapotes II desde su inicio en la laguna Sabanilla hasta su descarga en el río Grijalva, alternativa 2. ....	121
Figura 5.36 Perfil hidráulico de los ríos Pajonal, Zapotes III, Zapotes II hasta la descarga con el río Grijalva, alternativa 2.....	121
Figura 5.37 Mancha de inundación generada por la avenida de diseño. Superficie inundada 9,306 ha, con tendencia de uso agrícola y ganadero.....	122

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis se realizó con el fin de aportar en la medida de lo posible, un grano de arena en la solución de la problemática de las inundaciones que periódicamente se generan en México y en el mundo entero y, que ponen en riesgo a un sinnúmero de habitantes y sus diferentes sectores productivos como son: agrícola, ganadero, industrial, educativo, salud, comunicaciones, etc.; lo anterior, se logra mediante la aplicación de técnicas vanguardistas de la ingeniería civil, que basadas en modelos numéricos permiten diseñar y optimizar el tamaño de las obras necesarias para minimizar el efecto de este fenómeno, que últimamente se ha presentado en diferentes regiones del país.

En primera instancia, se realizó una investigación documental sobre la situación que se ha vivido a causa de las inundaciones en el mundo y se particularizó en el país (México), donde recientemente se ha sufrido por el efecto de este fenómeno. En el año 2003, por ejemplo, fueron afectados los estados de Querétaro, Guanajuato y Michoacán por las severas y prolongadas lluvias que generaron inundaciones en una infinidad de hectáreas agrícolas. O bien, en 1999 en los estados de Tabasco, Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla, donde se sufrieron pérdidas incalculables en los sectores agrícola, ganadero, y demás sectores productivos y de comunicación. Es por ello la importancia de proponer técnicas de solución a este problema, el cual se presenta con mayor frecuencia en el país.

Después de la investigación documental, que permitió conocer la situación que el país ha vivido en sus diferentes regiones, principalmente en aquellas donde algunas épocas del año existe el exceso de agua, se consideró conveniente y necesario conocer más sobre el comportamiento del ciclo hidrológico y las disciplinas encargadas de su estudio. Para ello se desarrolló un capítulo donde se explica de forma detallada este concepto, el cual es un conjunto de fenómenos que representan las diferentes fases del agua, como son: lluvia, evaporación, transpiración, etc.

Algunas de las disciplinas encargadas del estudio del Ciclo Hidrológico son la hidrología y la hidráulica, las cuales forman parte fundamental del desarrollo de esta

tesis, por lo que se destinó un capítulo de la misma para su estudio y lograr así una mayor comprensión sobre los conceptos básicos que aquí se manejan. En el caso de la hidrología, se partió de que existen dos tipos de cuencas, la hidrológica y la hidrográfica, y se hizo mayor énfasis en esta última, para la cual se planteó la forma de su estudio y los elementos que permiten su clasificación.

Se plantean también los métodos hidrológicos que permiten conocer mediante la solución de ecuaciones –en su mayoría empíricas– el caudal que aporta una cuenca hacia un punto en específico, el cual está en función de la intensidad de la lluvia que cae dentro de su área de influencia. En el capítulo 2 de esta tesis se describe detalladamente el fenómeno denominado lluvia, así como los métodos hidrológicos mencionados y sus pormenores.

Los escurrimientos de una cuenca, generalmente son conducidos de forma superficial a través de cauces naturales o artificiales hacia otros puntos específicos, localizados dentro o fuera de dicha cuenca, para su estudio, es determinante contar con los conocimientos de hidráulica, particularmente aquellos conceptos que englobados en la hidráulica de canales, es por ello que en la presente tesis se contempló un capítulo para la explicación y mejor entendimiento.

Como se mencionó en un principio, el objetivo principal de este trabajo, es plantear la utilización de técnicas sofisticadas y bastos conocimientos de la ingeniería civil, que permitan cooperar en la medida de lo posible en la solución del problema de las inundaciones. Estas técnicas vanguardistas, están apoyadas en el manejo y aplicación apropiada de métodos numéricos, englobados en modelos matemáticos que permiten conocer de forma integral el comportamiento de los escurrimientos en una región, compuesta por una diversidad de estructuras hidráulicas como son: cauces, lagunas, puentes, etc. En el capítulo 4 se mencionan algunos de los modelos que actualmente pueden ser utilizados para conocer el funcionamiento del agua a través de una red compleja de ríos y lagunas, además se mencionan las ventajas y desventajas del modelo que se empleará para resolver el ejemplo de aplicación desarrollado en el capítulo 5.

El ejemplo mencionado en el párrafo anterior, se basa en la problemática que actualmente sufre la sociedad tabasqueña, específicamente en una región denominada Los Zapotes, donde frecuentemente sufren de inundaciones, que impiden o minimizan el aprovechamiento de terrenos agrícolas y ganaderos así la utilización de infraestructura carretera y de comunicaciones para acceder hacia el interior de sus comunidades.

La solución a este problema se planteó en primera instancia en el desarrollo de la ingeniería básica, trabajos topográficos y estudios hidrológicos, seguido de la elaboración de un modelo numérico que simula su comportamiento hidráulico en condiciones actuales donde se determinaron los niveles alcanzados por una avenida de diseño de 5 años de periodo de retorno. Con base en estos resultados se plantearon dos opciones de rectificación de cauces, con las cuales una de ellas permitió reducir en aproximadamente 1.50 m el nivel del agua, lo que se reflejó en rescatar de las inundaciones un total de 3795 hectáreas, que representan aproximadamente el 30 % de la superficie inundada en condiciones actuales.

En resumen, el empleo de técnicas de solución apoyadas en herramientas computacionales sofisticadas, representan un desarrollo importante dentro del ramo de la ingeniería civil, al permitir conocer el comportamiento de los fenómenos en forma integral, lo que a su vez, permite brindar una solución óptima con diseños adecuados y tamaños de obra ajustados al tamaño de la problemática que se desee resolver.

Las inundaciones han existido desde tiempos remotos, reflejándose principalmente en los asentamientos humanos o donde la topografía hace difícil la salida de los escurrimientos superficiales. En la actualidad, ha resaltado la afectación derivada de las inundaciones en algunos sectores económicos, como son: la agricultura, la ganadería, la infraestructura carretera, la infraestructura petrolera, la industria, los sectores educativos y de salud, y en general en todos aquellos sectores de los cuales dependen el bienestar de la humanidad. Una de las principales razones por las que se ha incrementado el efecto de las inundaciones en la población, radica en que los asentamientos humanos buscan alojarse por diversas razones cerca de

las riveras de los ríos, o en zonas susceptibles a este fenómeno. Sin embargo, a pesar de esta situación, las acciones que han desarrollado los diferentes niveles de gobierno, no han sido suficientes para evitar o minimizar los riesgos provocados por este fenómeno.

Actualmente y gracias a la globalización de la información, se tiene el conocimiento de las catástrofes causadas por las inundaciones, cada vez de mayor frecuencia ocurridas en el mundo. Para generarnos una idea de la problemática a que nos referimos a continuación se muestran algunos artículos publicados por la UNESCO<sup>1</sup> relacionados con las inundaciones.

En el mundo, se registraron 2,200 desastres hidrometeorológicos entre los años 1990 y 2001 de los cuales el 50 % generaron graves inundaciones; el 28 % de estos eventos se relacionaron con enfermedades transmisibles a través del agua y brotes epidémicos; y el 9 % propiciaron desplazamientos de tierra y avalanchas. La repartición geográfica de estos eventos se dividió de la siguiente forma: En África : 29 %, Asia: 35 % América: 20 % Europa: 13 % Oceanía: 3 %.

Dada la importancia de los efectos generados por las inundaciones, se han creado diferentes organizaciones a nivel mundial, enfocadas a combatir el efecto de las inundaciones, mediante el desarrollo de programas de prevención de desastres y enfermedades ocurridas en las diversas regiones afectadas por las lluvias. Algunas de estas organizaciones se enlistan a continuación:

- ✓ Organización Panamericana de la Salud “OPS”.
- ✓ Centro Regional de Información de Desastres “CRID”.
- ✓ Federal Emergency Management Agency, FEMA.
- ✓ Organización de las Naciones Unidas “ONU”.
- ✓ Estrategia Internacional para la Prevención de Desastres “EIRD”.

---

<sup>1</sup> United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.

- ✓ Darth Flood Observatory “DFO”.

En la Tabla 1 se muestran algunas cifras de interés relacionadas con el fenómeno de inundaciones a nivel mundial, cabe destacar que esta información toma en cuenta solamente las principales inundaciones en el mundo.

**Tabla 1 Resumen de registros de inundaciones en el mundo tomadas del año 1986 al 2006**

AÑO	EVENTOS REGISTRADOS	DURACIÓN (días)	PERDIDAS HUMANAS (Personas)	HABITANTES EVACUADOS (Millones de Personas)	PERDIDAS (Millones de Dolares)	HECTAREAS INUNDADAS (Millones)	REGIONES AFECTADAS (Millones km <sup>2</sup> )
1986	47	13	1,554	8.86	\$75,157.10	1,532.22	4.15
1987	45	8	3,247	1.46	\$2,667.70	4.24	3.03
1988	111	8	6,229	20.32	\$11,524.00	19.31	8.04
1989	158	9	9,838	8.62	\$1,673.44	21.04	12.03
1990	104	8	4,159	14.93	\$9,474.22	265.33	11.72
1991	123	6	150,180	17.81	\$82,365.75	9.59	13.38
1992	115	11	8,720	13.08	\$24,929.27	14.59	15.18
1993	99	8	7,453	35.10	\$20,759.89	21.71	6.18
1994	121	9	6,401	8.57	\$13,542.09	3.93	14.45
1995	115	41	7,625	48.58	\$45,860.00	13.32	15.71
1996	98	9	6,210	12.80	\$12,198.87	4.67	13.30
1997	210	9	7,819	6.12	\$10,369.93	4.16	15.41
1998	184	10	23,896	43.33	\$236,646.68	170.09	21.09
1999	101	11	33,792	57.13	\$55,222.68	24.43	13.24
2000	102	9	10,684	50.23	\$13,381.70	33.01	8.04
2001	171	8	5,623	37.97	\$13,217.06	13.33	8.58
2002	261	9	4,422	20.54	\$29,694.45	10.79	11.65
2003	298	12	4,554	21.67	\$7,564.44	17.97	21.73
2004	194	14	173,474	51.47	\$7,553.52	1.79	15.33
2005	171	13	10,140	19.37	\$82,249.65	3.95	17.46
2006	232	14	8,084	19.46	\$9,591.98	1.33	22.89

En la República Mexicana, existe un gran interés por aminorar los efectos de las inundaciones; por lo que recientemente, en marzo del 2006 se llevó a cabo el IV Foro Mundial de Agua, desarrollado en la Ciudad de México, donde entre otros temas relacionados con el agua, se hizo especial énfasis en las inundaciones sufridas en las diferentes regiones del país, algunas de ellas de ocurridas de forma súbita, otras torrenciales y en otros casos de forma paulatina.

Lo anterior indica que en función de la situación geográfica de cada región, puede ser afectada por lluvias derivadas de diversos fenómenos meteorológicos, en verano (junio-octubre) el país está sujeto a la acción de ciclones y tormentas tropicales prácticamente en toda su extensión. Durante el invierno, en cambio, es

afectado por tormentas de origen extratropical, frentes fríos originados en latitudes altas, las cuales causan fuertes precipitaciones en la parte centro y sureste del país.

Por otra parte, los huracanes representan una fuente importante en la generación de inundaciones. A lo largo de su trayectoria transportan grandes cantidades de humedad y ocupan también grandes extensiones de superficie. Cuando penetran en tierra provocan tormentas de larga duración y extensión. Estos fenómenos producen severas inundaciones en las principales cuencas de la República, sobre todo en las vertientes del centro y sur del Golfo de México y del Océano Pacífico. La Tabla 2, muestra un listado de las inundaciones ocurridas en la República Mexicana en un periodo de 61 años, de 1943 a 2004.

**Tabla 2 Registro de Inundaciones importantes en México**

AÑO	EVENTO QUE HA GENERADO INUNDACIONES	ESTADO AFECTADO	PÉRDIDAS HUMANAS (Personas)	POBLACIÓN AFECTADA (Personas)	DAÑOS TOTALES (Millones de Dolares)	GASTO O LLUVIA
1943	Lluvias de Invierno	Sinaloa	27	600	0.14	14,376 m³/s río Fuerte.
1949	Lluvias de Invierno	Sinaloa y Sonora	10	159,000	10.2	5,265 m³/s, río Yaqui. 10,000 m³/s, río Fuerte. 6,390 m³/s, río Mayo.
1955	Huracanes Gladys, Hilda y Janet	Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí, Yucatán y Quintana Roo	110		7.5*	4,002 m³/s, río Tempoal. 4,810 m³/s, río Tampoán.
1959	Ciclón de Manzanillo	Colima y Jalisco	1500	1,600		S/R
1960	Lluvias de Invierno	Sonora, Sinaloa y Chihuahua	3	9,600	18.82*	1,397 m³/s, río Yaqui. 4,556 m³/s, río Yaqui. 15,000 m³/s, río Fuerte.
1967	Huracán Beulah	Tamaulipas, Nuevo León, Yucatán y Quintana Roo		25,000	500	178 m³/s, río Sta. Catarina.
1967	Huracán Katrina	Guerrero, Península de Baja California, Sonora y Nayarit	15	30,000		3,881 m³/s, río Balsas. 1,170 m³/s, río Turbio. 1,400 m³/s, río La Unión. 3,550 m³/s, río Tecpan. 20,000 m³/s, río Balsas.
1968	Huracán Naomi	Colima, Sinaloa, Durango, Coahuila, Sonora y Chihuahua	10	50,000		500 mm, en 24 h, cuenca del río Baluarte. 14,140 m³/s, río Baluarte. 16,000 m³/s, río Acaponeta.
1976	Huracán Liza	Baja California Sur y Sonora	600	10,000	3.1	180 mm, en 4 h. 950 m³/s, arroyo el Cajoncito.
1982	Huracán Paul	Sinaloa	0	256,800	114.6	335 mm en 24 h, Mulegá, B. C. S.
1985	Lluvias de Invierno	Nayarit	0	47,927	16.4	4,497 m³/s, río Acaponeta. 2,589 m³/s, río San Pedro.
1988	Huracán Gilbert	Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila	225	139,374	766	350 mm en 24 h, en Monterrey. 342 mm en 24 h, en San Carlos, Tamaulipas. 1,900 m³/s, río Santa Catarina. 5,880 m³/s, río San Juan. 900 m³/s, río Pesqueira. 6,900 m³/s, río Potosí. 730 m³/s, río Pabillo. 1,086 m³/s, río Camacho. 2,258 m³/s, río Camacho.
1990	Lluvias de Invierno	Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Chihuahua		40,000	50.85	11,720 m³/s, río Fuerte.
	Huracán Diana	Veracruz e Hidalgo	139	50,000	90.7	400 mm en 24 h, Tantzabaca, S. L. P.
1992	Lluvias de Invierno	Nayarit	64	100,000	78	10,000 m³/s, río Santiago.
	Lluvias de Invierno	Baja California	33	10,000	32	100 mm en 4 h, cuenca del río Tijuana. 316 mm en 15 horas, cuenca del arroyo Miraflores.
1993	Lluvias de Invierno	Baja California Sur	3	10,000	63.4	632 mm, en 24 h
	Huracán Diana	Veracruz, Hidalgo, San Luis Potosí y Tamaulipas	40	97,943		427 mm en 24 h, Tantzabaca, San Luis Potosí.
	Huracán Ismae	Sonora, Sinaloa y Baja California Sur	200	24,111		197 mm en 24 h, A. Ruiz, Sinaloa.
1995	Huracán Opal	Veracruz, Campeche, Tabasco y Quintana Roo	23	26,874		245 mm en 24 h, en Campeche. 100 mm en 24h, en Tapijulapa, Tabasco.
	Huracán Roxanne	Veracruz, Campeche, Tabasco y Quintana Roo		13860*	418.4	297 mm en 24 h, en Martínez de la Torre, Veracruz. 204 mm en 25 h, en Tabasco. 200 mm en 10 h, en Misantla.
1997	Huracán Pauline	Guerrero y Oaxaca	228	8,500	447.8	340 m³/s, arroyo El Camarón, Acapulco. 411.2 mm en 24 horas, estación Aeropuerto, Acapulco. 498 mm en 96 h, estación Arriaga, Chiapas. 342 mm en 24 h, estación Margaritas, Chiapas. 220 mm en 24 h, estación Arriaga, Chiapas.
1998	Lluvias	Chiapas	229	28,753	603	
		Baja California	92	3,000	38.78	
1999	Depresión Tropical 11	Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco	387	1,904,000	807.5	420 mm en 24 h, estación Tenango, Puebla. 382 mm en 24 h, estación La Laguna, Puebla. 212 mm en 24 h, estación Martínez de la Torre, Veracruz. 102 mm en 24 h, presa La Esperanza, Hidalgo.
2000	Huracán Keith	Quintana Roo, Chiapas, Tamaulipas y Nuevo León	9		38.78	140 mm en 24 h, Chetumal, Q. Roo. 366.5 mm en Sabinas, Tamaulipas.
2001	Huracán Keith	Sonora y Baja California Sur	9	38,730	184.15	400 mm en 24 h, estación Santa Gertrudis. 392 mm en 24 h, estación San Bartolo. 387 mm en 24 h, estación Capuano. 385 mm en 24 h, estación Santa Anita. 360 mm en 24 h, estación Yéneca. 380 mm en el valle del Yaqui. 327 mm en el valle de Guaymas.
	Lluvias	Varios estados	95	126,954	42.3	1,658 m³/s, arroyo Matapé, presa Punta de agua. S/R
2002	Huracán Isidore	Yucatán, Campeche	4	500,000	870.07	250 mm en 24 h, en Becanchen, Yucatán. 236.5 mm en 24 h, en Palizadas, Campeche. 227.7 mm en 24 h, en Campeche, Campeche. 204.5 mm en 24 h, en Cacaluta, Chiapas. 777 mm en 96 h, en Campeche. 680 mm en 96 h, en Chiapas. 504 mm en 96 h, en Yucatán.
	Huracán Kenna	Nayarit, Jalisco	2	374,500	122.15	381.5 mm en 96 h, en Tabasco. 250 mm en 24 h, estación Cuyutlán, Colima.
2003	Lluvias de Verano	Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Zacatecas	14	256,301	194.13	125 mm en 24 h, estación Carrillo, Querétaro. 116 mm en 24 h, GRC Hgo-Querétaro, Querétaro. 105.5 mm en 24 h, estación El Pueblito, Querétaro. 97.9 mm en 24 h, estación Cortázar, Guanajuato. 93.6 mm en 24 h, estación Pajaritos, Nayarit. 82.2 mm en 24 h, estación Capomal, Nayarit. 79 mm en 24 h, estación P. Caborca, Durango. 78.1 mm en 24 h, estación Peña del Águila.
2004	Frente frío no. 49	Coahuila	38	6,692	13.6	55.9 mm en 24 h, Piedras Negras

Como puede verse en la Tabla 2, la mayor parte de la república ha sido afectada en repetidas ocasiones por fenómenos meteorológicos de diferente índole, cuyos efectos han sido importantes daños, tanto en pérdidas de vidas humanas, población damnificada, pérdidas en diferentes sectores, como son: agrícola, ganadero, industrial, salud, educación, infraestructura carretera, petrolera, eléctrica, comunicación, etc.

Es por lo anterior, que las autoridades mexicanas han desarrollado a lo largo de estos años, diversos programas enfocados a mitigar el efecto de las inundaciones, mediante la implantación de acciones estructurales y no estructurales, las cuales en su mayoría han sido efectivas pero no suficientes para lograr dicho propósito de mitigación, estas medidas se mencionan de forma general en los siguientes párrafos.

### ***Medidas estructurales***

Están constituidas por obras de infraestructura hidráulica destinadas al control de inundaciones y pueden clasificarse en:

- a) *Obra de Regulación:* Son fundamentalmente las presas, que permiten almacenar temporalmente parte de las crecientes para después descargarlas en forma controlada hacia sus respectivos cauces.

En los últimos años se han desarrollado acciones encaminadas al control y mejoramiento de cuencas (reforestación, terraceo, desazolves, etcétera), mediante las cuales se disminuye y regula el escurrimiento superficial, y a su vez, se contrarrestan en parte los efectos negativos de la urbanización.

- b) *Obras de rectificación:* Su función es facilitar el transporte rápido del agua por su cauce, mediante el dragado de los ríos para conservar su sección geométrica original y disminuir, de esta manera, las posibilidades de que ocurra un desbordamiento. Otra forma de definir esta acción es la rectificación de cauces y el incremento de su pendiente mediante el corte de meandros.

c) *Obras de protección*. Estas obras pueden dividirse en dos, según su propósito:

- ✓ Bordos longitudinales, los cuales se establecen a lo largo de una o ambos márgenes de un río y su función es mantener el agua dentro del cauce del mismo.
- ✓ Bordos perimetrales, cuya función es evitar que las inundaciones afecten de forma directa a poblaciones o zonas de gran importancia económica.

### ***Medidas no estructurales o institucionales***

Estas son medidas de Protección Civil y su propósito radica en disminuir los daños causados por las inundaciones y pueden ser de carácter permanente o de operación, aplicables sólo con la presencia de un fenómeno hidrometeorológico cuyas consecuencias puedan ser severas.

- a) *Medidas no estructurales permanentes*. Están constituidas por la reglamentación del uso del suelo, apoyada en una zonificación de las llanuras inundables. Su propósito es evitar que bienes de gran valor económico y social se ubiquen en zonas sujetas al riesgo de inundación.
- b) *Medidas no estructurales de operación*. Se refiere a todas las medidas que se tomen cuando se presenta un fenómeno hidrometeorológico que puede causar una inundación, deben apoyarse en modelos de pronósticos en sus diferentes fases (pronóstico de la ocurrencia de la lluvia, de su transformación en escurrimiento superficial, de su tránsito por los cauces, las obras de infraestructura, etcétera).

A pesar de las acciones llevadas a cabo por las autoridades correspondientes en las diferentes partes de la República, no se ha logrado mitigar de forma importante el efecto de las inundaciones, por lo que se considera necesario continuar con su estudio y proponer nuevas acciones, tanto estructurales como no estructurales, que estén apoyadas en estudios de vanguardia, cuyo soporte sean

además de los técnicos especialistas en el tema del agua, los softwares especializados que simulan de manera conjunta el comportamiento de los escurrimientos dentro de una misma región.

Es por lo anterior, que en la presente tesis se plantean una serie de acciones enfocadas a un buen manejo y control de los escurrimientos dentro de una superficie de uso agrícola y ganadero, con la finalidad de incrementar la superficie aprovechable y favorecer los volúmenes de producción en ambos sectores. Las acciones propuestas están soportadas técnicamente mediante el empleo de un software especializado en hidráulica y en técnicas hidrológicas reconocidas, por lo que previo al desarrollo de la tesis fue necesario conocer tanto el comportamiento del agua y su ciclo hidrológico, como el desempeño y manejo del software empleado, los cuales se describen en los capítulos siguientes.

## **CAPITULO 1**

### **CICLO HIDROLÓGICO**

En términos generales, el ciclo hidrológico es la combinación de una serie de fenómenos, que en su conjunto permiten la circulación del agua en el planeta, del océano a la atmósfera, de la atmósfera a la tierra y de la tierra al océano. Esto significa que el ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, otra manera ver el comportamiento de este conjunto de fenómenos, es cuando el agua de la superficie del océano se evapora hacia la atmósfera, donde se condensa y cae sobre la tierra como precipitación, parte de esta precipitación cae sobre los océanos y parte sobre la tierra, una porción del agua que cae sobre la tierra es retenida temporalmente en depresiones topográficas naturales, vegetación de diferentes especies, y otros objetos, para posteriormente retornar hacia la atmósfera por medio de los fenómenos conocidos como evaporación y transpiración. La otra parte del agua precipitada, continúa moviéndose como agua corriente a través de los ríos y arroyos hasta llegar a los océanos, donde igualmente está sujeta al fenómeno de evaporación.

Existe otro fenómeno que forma parte del ciclo hidrológico, y se presenta generalmente cuando el agua que cae en la tierra se conduce hacia el subsuelo, este fenómeno es conocido como infiltración. El agua infiltrada puede ir hasta zonas más profundas o ser almacenada como agua subterránea, que puede más tarde fluir como manantiales o incorporarse a los ríos, lagos o mares.

De esta manera, el ciclo hidrológico sufre varios y complicados procesos para completarse como un fenómeno conjunto, como son: evaporación, precipitación, interceptación, transpiración, infiltración, precolación, almacenamiento y escorrentía. En la Figura 1.1 se muestra gráficamente el comportamiento del ciclo hidrológico, en ésta se esquematizan todos y cada uno de los fenómenos que lo componen.

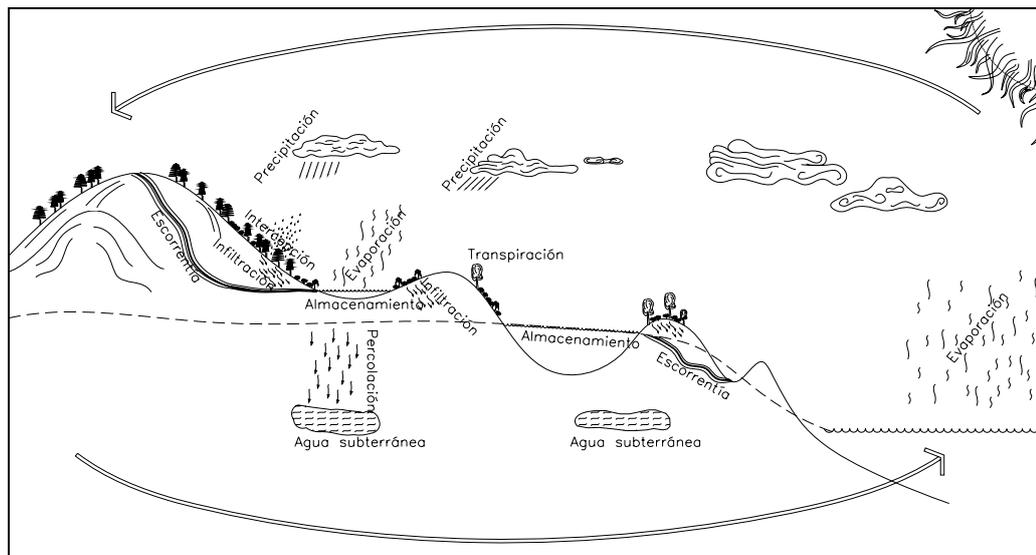


Figura 1.1 Representación esquemática del ciclo hidrológico.

Para describir con mayor precisión al ciclo hidrológico es necesario conocer conceptualmente cada uno de sus fenómenos y las disciplinas que los estudian, tal es el caso de la hidrometeorología, que estudia a la evaporación, condensación, precipitación y transpiración. Otra disciplina que estudia al ciclo hidrológico es la geohidrología, que estudia al fenómeno de infiltración y el comportamiento del agua en el subsuelo y sus diferentes estratos.

Una disciplina que engloba de forma general a los fenómenos mencionados es la hidrología, de la cual se derivan algunas especialidades que aplican de manera directa a los componentes del ciclo hidrológico, tal como la hidráulica y la hidrología superficial, las cuales estudian el comportamiento del agua en la superficie, ya sea la que se encuentra sobre arroyos, lagos, lagunas o incluso en el océano.

La hidrología versa sobre el agua de la tierra, su existencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas, y su influencia sobre el medio ambiente y su relación con los seres vivos. Los estudiosos de esta disciplina pueden tener una amplia variedad de ocupaciones, algunas se especializan en el estudio del agua relacionado con el ciclo hidrológico, como son: limnólogos (lagos); oceanógrafos (océanos); hidrometeorólogos (atmósfera); glaciólogos (glaciares); geomorfólogos (formas terrestres); geoquímicos (calidad del agua subterránea); e hidrogeólogos (aguas subterráneas).

Para el caso del presente trabajo, la hidrología representa una parte fundamental, particularmente aquella enfocada a conocer el comportamiento del agua en la superficie, pues permite desarrollar estudios encaminados a determinar las características fisiográficas de las cuencas, ya sean hidrológicas o hidrográficas, y así, estimar los volúmenes de agua que sobre ellas circulan, mismos que son utilizados posteriormente como condiciones iniciales en el diseño de las obras hidráulicas futuras.

Previo a la aplicación de los estudios que integran la presente tesis, se considera necesario entender algunos de los conceptos básicos utilizados durante su desarrollo, por lo que se destinaron los siguientes capítulos para su explicación teórica y para la descripción de las ecuaciones empleadas en su análisis.

### **1.1 Cuencas hidrográficas e hidrológicas**

Una primera definición de cuenca sería una zona de la superficie terrestre, donde las gotas de agua que caen sobre ella tienden a ser drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (cono de deyección).

Existen dos diferentes tipos de cuenca, hidrográfica e hidrológica; la primera se define como “la unidad natural delimitada por la existencia de la línea divisoria de las aguas en un territorio dado”<sup>1</sup>. Son unidades morfográficas superficiales y sus límites quedan establecidos por la línea divisoria geográfica denominada parteaguas, la cual, teóricamente, es una línea imaginaria que une los puntos de máxima elevación relativa entre dos laderas adyacentes -pero de exposición opuesta- desde la parte más alta de la cuenca hasta su parte más baja o cono de deyección.

Para su estudio, las cuencas hidrográficas pueden dividirse a su vez en tres tipos, *Cuenca exorreica*, que se caracteriza por la formación de ríos que desembocan en el océano o mares abiertos. *Cuenca endorreica*, que se forman por ríos que desembocan en lagos y lagunas. *Cuenca arreica*, este tipo de cuenca carece de

---

<sup>1</sup> INE Instituto Nacional de Ecología [www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html](http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html)

cursos de agua por que sus corrientes se pierden debido al fenómeno de evaporación, lo que significa que generan poco volumen de agua a lo largo y ancho de su superficie.

Por su parte, las cuencas hidrológicas, son más completas que las hidrográficas, pues son unidades morfológicas integrales que además de incluir el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo.

De acuerdo con Summerfield<sup>2</sup>, otro aspecto importante a resaltar en la evaluación de cuencas hidrológicas, es que muchas de sus propiedades pueden expresarse cuantitativamente, de forma tal que se facilita la comparación entre dos o más cuencas. Esta descripción cuantitativa se denomina morfometría de drenaje y permite describir tanto las propiedades espaciales y de diferencia altitudinal, como las de la red de drenaje. En este sentido, las cuencas se pueden clasificar de acuerdo con su forma y su textura, a través del método de clasificación de Way<sup>3</sup>, que realiza una clasificación de las cuencas hidrográficas respecto a la densidad de las corrientes, textura y forma. De ella se puede obtener una gran cantidad de información en lo que se refiere a la roca madre y a los materiales del suelo, a la cantidad de agua que circula, a la morfología, etc.

Otra forma de clasificación se da en función de la ordenación de las corrientes de agua, basadas en el análisis y numeración de la estructura de la red de drenaje, donde destaca el método de Strahler<sup>4</sup>, que clasifica las cuencas a partir del conteo de las corrientes de agua de un determinado orden existente en la cuenca en estudio. En esta numeración se considera que una corriente de primer orden es aquella que no tiene tributario; cuando dos corrientes de primer orden se unen, la corriente resultante se denomina de segundo orden, y así sucesivamente.

---

<sup>2</sup> Summerfield, M. A. Global Geomorphology, 1991

<sup>3</sup> Way, D. S. The interaction Between Urbanization and Land. Quality and Quantity in Environmental Planning and Design, 1978

<sup>4</sup> Strahler, A.N., Handbook of Applied Hydrology, edited by Chow, V.T., New York, McGraw-Hill

El estudio de las cuencas tanto hidrológicas como hidrográficas, se basa en conocer sus características fisiográficas y geométricas, para lo cual hasta la fecha se aplican criterios empíricos que basados en la experiencia de investigadores de la hidrología, permiten clasificar adecuadamente a cada una de las cuencas por estudiar. En el siguiente capítulo se describen cada uno de estos criterios, los cuales, estarán encaminados particularmente al estudio de las cuencas hidrográficas, o sea, al comportamiento del agua en la superficie.

## **1.2 Características fisiográficas de una cuenca.**

Las características fisiográficas de una cuenca dependen de su forma, su relieve, sus tipos de suelo y usos de suelo, densidad de vegetación, etc. Todos estos parámetros influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca. Este concepto, se refiere a las condiciones que imperan sobre la cuenca, una vez que se presenta un fenómeno de precipitación, tales como el tiempo de concentración, tiempo de retardo, tiempo de punta, etcétera. Algunos de los conceptos básicos empleados para conocer las características fisiográficas de las cuencas hidrográficas, permiten un mejor entendimiento de su clasificación, dentro de estos conceptos se encuentran los siguientes:

*Área de drenaje:* Es la superficie en proyección horizontal delimitada por líneas imaginarias o parteaguas.

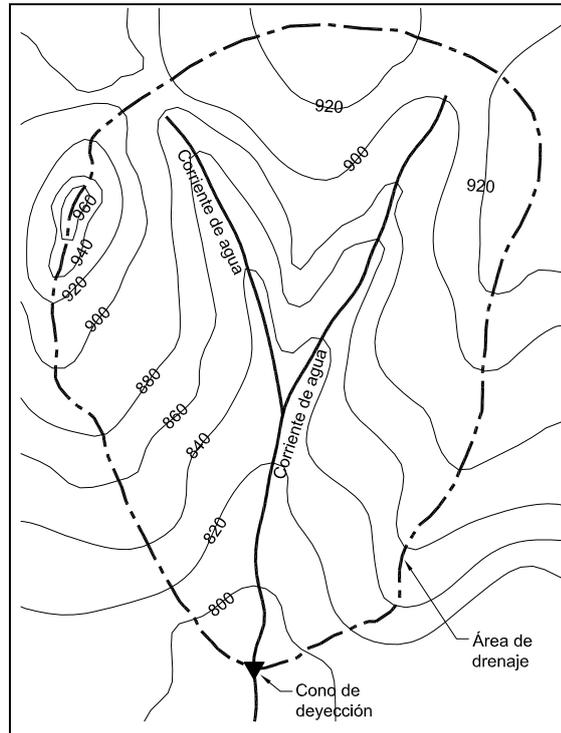


Figura 1.2 Representación del área de drenaje de una cuenca

**Forma de la cuenca:** La forma de la cuenca es muy importante ya que dos cuencas con la misma área y similares características físicas pueden tener respuestas hidrológicas diferentes, haciendo variar de forma significativa el tiempo de concentración de la cuenca. Algunos parámetros que miden la forma de la cuenca pueden ser el índice de Gravelius o coeficiente de compacidad, el factor de forma y la relación de circularidad.

*El coeficiente de compacidad* indica la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de igual área, esto queda expresado como:

$$K_c = \frac{\text{Per.Cuenca}}{\text{Per.Circulo}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca en Km

A = Área de la cuenca en Km<sup>2</sup>

El valor mínimo que se puede obtener de esta ecuación es de 1, y cuanto mayor sea este valor, mas alargadas serán las cuencas. Puede alcanzar un valor de 3 en el caso de cuencas muy alargadas.

*El factor de forma* indica la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca.

$$K_f = \frac{B}{L}$$

Donde:

B= Ancho medio de la cuenca en Km

El ancho medio del cauce B, se obtiene dividiendo el área de la cuenca entre la longitud del cauce principal.

$$B = \frac{A}{L}$$

Por lo que el factor de forma quedaría:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

A= Área de la cuenca en Km<sup>2</sup>

L= Longitud del cauce principal Km.

*La relación (o radio) de circularidad (K<sub>ci</sub>)* se obtiene al dividir el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca. Cuando su valor es de 1 para una cuenca circular, y para una cuenca cuadrada su valor corresponde a 0.785.

$$K_{ci} = \frac{A}{A_{ce}}$$

$K_{ci}$ = Índice de circularidad

A= Área de la cuenca en  $Km^2$

$A_{ce}$ = Área de la circunferencia

Entonces se pueden clasificar las cuencas dependiendo de su forma en: Alargadas, cuadradas o circulares. En la Figura 1.3 se muestran tres cuencas, las cuales tienen características físicas diferentes a pesar de ser colindantes entre ellas, a estas se le aplicaron las ecuaciones anteriores y se obtuvo su clasificación correspondiente.

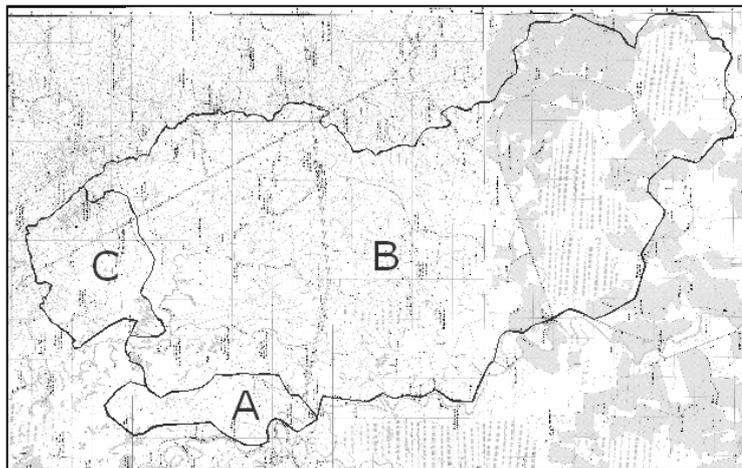


Figura 1.3 Identificación de tres cuencas hidrográficas y sus principales escurrimientos en una planicie, plataforma base cartografía de INEGI.

En la Tabla 1.1 se muestra los coeficientes que caracterizan a cada una de ellas.

Tabla 1.1 Coeficientes de los factores físicos de las cuencas mostradas en la Figura 1.3

Cuenca	Coefficiente de compacidad $K_c$	Factor de Forma $K_f$	Relación de circularidad $K_{ci}$	Forma de la cuenca
A	1.5433	0.0269	0.4198	Alargada
B	1.5741	0.4807	0.4036	Alargada
C	1.3645	0.5204	0.5371	Circular

*Pendiente de la cuenca.* Esta representa a la pendiente media de la cuenca desde su punto más lejano hasta el cono de deyección. Este

parámetro es necesario para determinar otras características de la cuenca, como es el caso del tiempo de concentración.

La pendiente de una cuenca se puede estimar a través de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{D * L_c}{A}$$

Donde:

A= Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

D= Equidistancia entre curvas de nivel del mapa considerado (Km).

L<sub>c</sub>= Longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas dentro de la cuenca (Km).

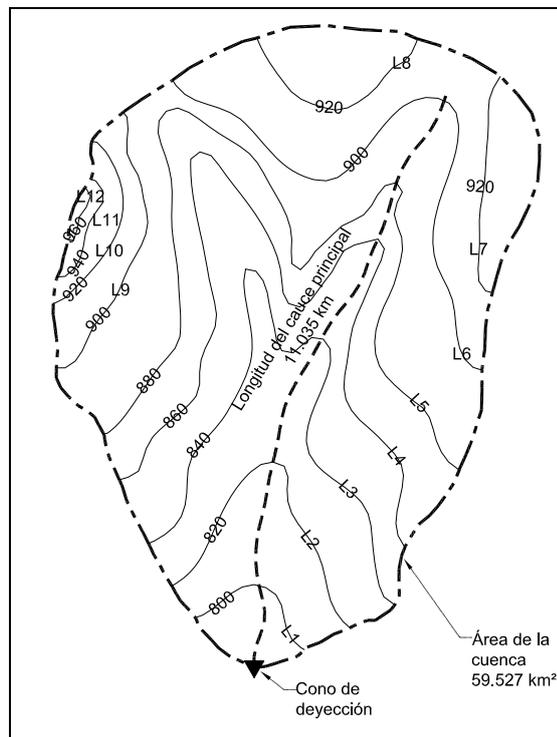


Figura 1.4 Esquematización de la obtención de la pendiente media de una cuenca, los valores de L se presentan solo como literales para ejemplificar.

Nótese la equidistancia de las curvas de nivel de la Figura 1.4 es de 20 m, para obtener la longitud final "L" se deberá de acumular todas las  $L_n$  parciales mostradas. Aplicando los valores de la Figura 1.4 en la formula de la pendiente de la cuenca tendremos:

$$S = \frac{0.02 * 83.87}{59.52} = 0.028$$

*Pendiente del cauce principal.* Es la relación de la diferencia de altura máxima y mínima de la cuenca y la longitud del cauce principal, se puede estimar con la siguiente ecuación.

$$S_m = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L}$$

$S_m$ = Pendiente del cauce principal.

$H_{\max}$ = Elevación máxima del fondo del cauce.

$H_{\min}$ = Elevación mínima del fondo del cauce.

$L$ = Longitud total del cauce principal

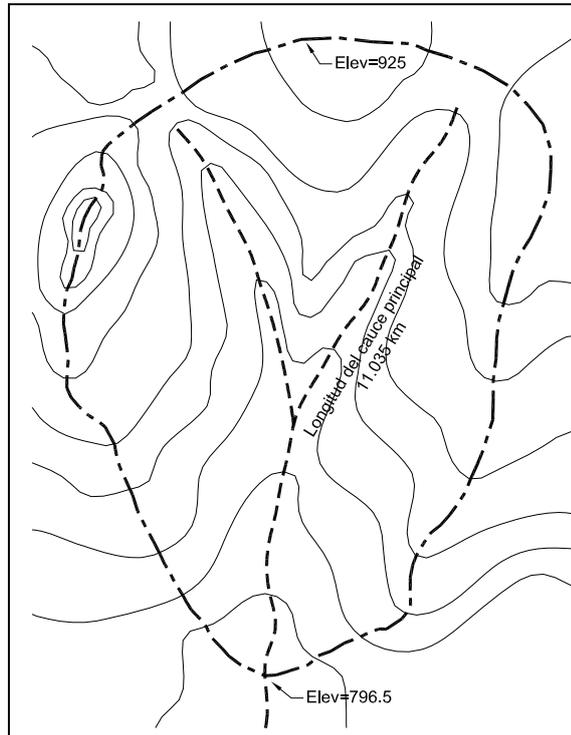


Figura 1.5 Datos necesarios para calcular la pendiente del cauce principal, elevación máxima y mínima de la cuenca y la longitud del cauce principal

$$S_m = \frac{925 - 796.5}{83700} = 0.00153$$

*Centro de gravedad de la cuenca.* Este es un dato necesario en la determinación de la longitud del cauce principal, desde el cono de deyección de la cuenca hasta su centro de gravedad, dato empleado en la estimación del gasto o caudal de aportación de la cuenca.

Para conocer su ubicación, existen algunas técnicas rudimentarias, y otras numéricas. La complejidad de su obtención depende de la irregularidad del parteaguas de la cuenca. Sin embargo, actualmente existen software por medio de los cuales este análisis se convierte en algo mas sencillo, tal es el caso del Autocad, Civilcad, Land Project, Civil 3D, etc.

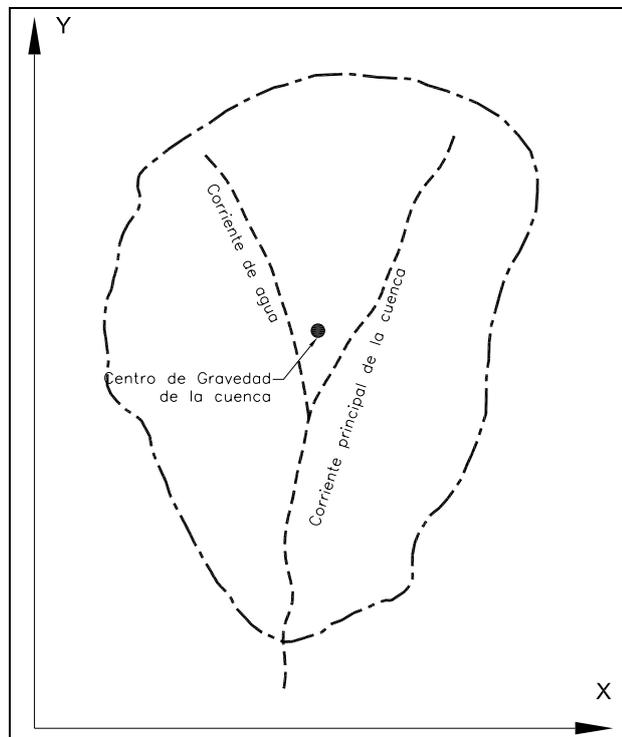


Figura 1.6 Muestra el centro de gravedad de la cuenca en el plano X-Y obtenido con Civil 3D

### 1.3 Características de la red de drenaje.

Así como las cuencas tienen características fisiográficas, las redes de drenaje también cuentan con una serie de características que permiten clasificar a las cuencas. Una de ellas es la relación que tiene el cauce principal con los tributarios y se conoce como *orden de la cuenca*, cuyo número resultante representa el grado de ramificación de la red de drenaje. Su clasificación se realiza de la siguiente manera:

- Los cauces denominados de primer orden son los que no tiene tributarios.
- Los cauces de segundo orden se forman con la unión de dos cauces de primer orden, este mismo caso se aplica en general si dos cauces de orden  $n-1$  se juntan y forman cauces de orden  $n$ .
- Cuando un cauce se orden  $n$  se une con otro cauce de diferente orden, el número de orden del canal resultante será el que tiene el número de orden del mayor de los dos.

- Finalmente, el número de orden de la cuenca es el número de orden del cauce principal.

Otra forma de clasificar las redes de drenaje, es por medio de las *Leyes de Horton* denominadas, *Ley de los números de los cauces*, *Ley de las longitudes de los cauces* y *Ley de las áreas drenantes a los cauces*. Estas leyes dicen que la relación de bifurcación, longitud y áreas permanecen constantes de un orden a otro de la cuenca y se describen como sigue:

*La ley de los números de los cauces o Relación de Bifurcación ( $R_B$ ):* Es la relación entre el número de cauces de orden  $i$ , y el número de cauces de orden  $i+1$ .

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

$N_i$       Número de cauces de orden  $i$

$N_{i+1}$     Número de cauces de orden  $i+1$

*Ley de las longitudes de los cauces o Relación de Longitud ( $R_L$ ):* Es la relación entre longitudes promedio de cauces de órdenes sucesivos.

$$R_L = \frac{L_{i+1}}{L_i}$$

$L_i$       Longitud promedio de los cauces de orden  $i$

*Ley de las áreas drenantes o Relación de Áreas ( $R_A$ ):* Es la relación de las áreas promedio que drenan sus cauces a órdenes sucesivos.

$$R_A = \frac{A_{i+1}}{A_i}$$

$A_i$       Área promedio que drena a los cauces de orden  $i$

Al igual que los parámetros mencionados anteriormente, existen otros de menor importancia pero que contribuyen a clasificar a las cuencas; sin embargo, con los descritos se puede observar que dos cuencas nunca serán iguales; pues, a pesar de que su área de drenaje sea igual o similar, difícilmente tendrán la misma pendiente y con menores probabilidades la misma forma, o bien que las características de sus redes de drenaje serán seguramente diferentes.

Además de las características fisiográficas de las cuencas y de sus redes de drenaje, existen elementos que recobran especial importancia en su clasificación, como es el caso de los fenómenos meteorológicos que se presentan con cierta eventualidad dentro de ellas. Generalmente, estos fenómenos se presentan en forma de lluvias excesivas combinadas con fuertes vientos. La cantidad de agua que cae sobre ellas se mide en forma relativa, pues para diferenciar a una cuenca muy lluviosa (de grandes precipitaciones) de una poco lluviosa (con escasa precipitación), es necesario compararlas contra una misma región en específico. En México, por ejemplo, existen cuencas o regiones donde se presentan precipitaciones anuales mayores a 4000 mm, y otras donde la precipitación anual es menor a 500 mm, para identificar si estas regiones son o no lluviosas, se comparan contra la precipitación promedio anual de la ciudad de México, donde el valor alcanzado anualmente es de aproximadamente 800 mm.

Existen mapas de regionalización de lluvia, contruidos a partir de múltiples mediciones realizadas en diferentes lugares ubicados estratégicamente en cada cuenca, en el siguiente capítulo se abunda mas sobre el tema, y se explica de forma detallada este fenómeno y su comportamiento dentro de las cuencas hidrográficas.

## CAPÍTULO 2

### LLUVIA Y ESCORRENTÍA

La lluvia es una precipitación de agua en forma de gotas que se produce por la condensación del vapor de agua que contienen las nubes. En su caída, se distribuye de forma irregular, parte de ella se aprovecha en las plantas, otra aumenta los caudales de los ríos y arroyos que, a su vez, aumentan las reservas de pantanos y embalses y otra gran parte se infiltra a través del suelo y forma corrientes subterráneas que paran en los llamados yacimientos o pozos naturales, o desembocan en el mar.

La cantidad de lluvia que cae en un lugar se registra con equipos de medición denominados “pluviómetros” y se expresa en milímetros de agua, que equivale al agua que se acumularía en una superficie horizontal e impermeable de 1 metro cuadrado, durante el tiempo que dure la precipitación.

Los registros contienen información de lluvia medida en incrementos de tiempo sucesivos, al graficarlos se forman los denominados hietogramas<sup>1</sup>, si se hace la suma acumulada de la lluvia se obtiene un hietograma de lluvia acumulada o curva masa<sup>2</sup> de la lluvia, como se muestra en el ejemplo siguiente:

---

<sup>1</sup> Hietograma es una grafica escalonada que indica la variación de altura de lluvia (intensidad) con respecto a un intervalo de tiempo

<sup>2</sup> La curva masa representa la altura total de lluvia caída desde el tiempo “0” (origen) hasta un tiempo “t” considerado

Tabla 2.1 Alturas de precipitación de lluvias en incrementos de tiempo de 3 hr.

t hrs	Altura de lluvia (mm)	$\Delta t$ 3 hr	$\Delta t$ 6 hr	$\Delta t$ 12 hr	$\Delta t$ 24 hr
0	0				
3	4	4			
6	7	3	7		
9	16	9			
12	32	16	25	32	
15	51	19			
18	57	6	25		
21	58	1			
24	59	1	2	27	59

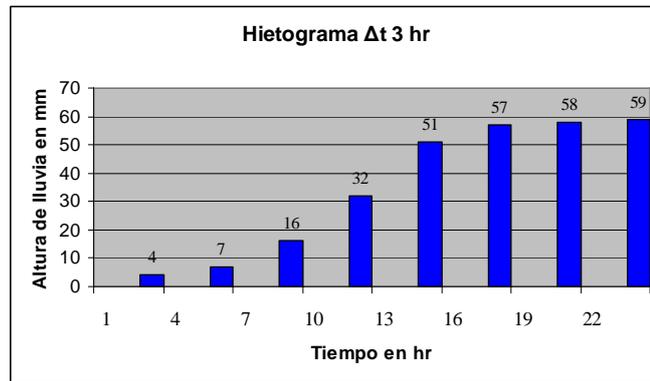


Figura 2.1 Hietograma obtenido de la Tabla de para un incremento de tiempo de 3 hr.

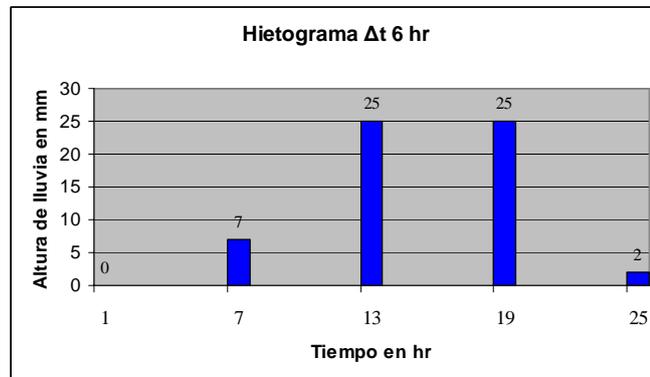


Figura 2.2 Hietograma obtenido de la Tabla de para un incremento de tiempo de 6 hr

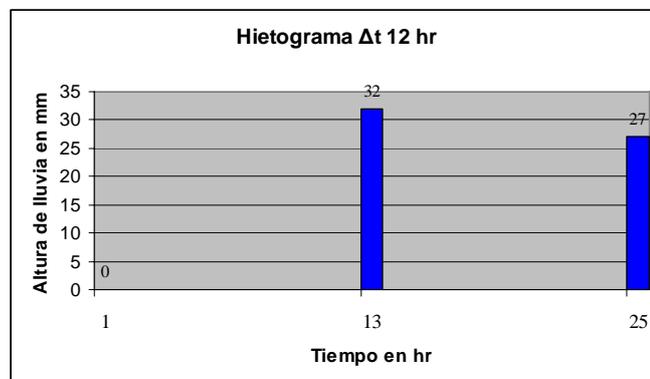


Figura 2.3 Hietograma obtenido de la Tabla de para un incremento de tiempo de 12 hr

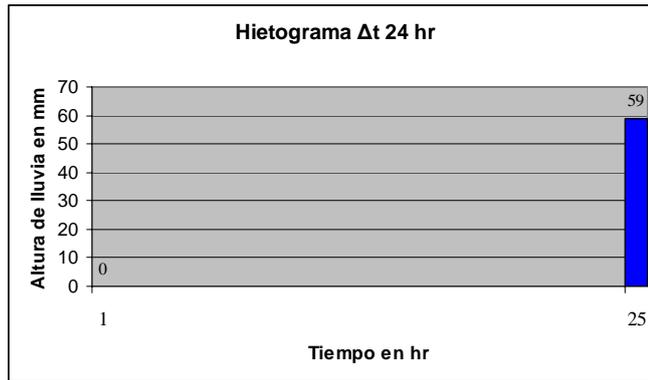


Figura 2.4 Hietograma obtenido de la Tabla de para un incremento de tiempo de 24 hr

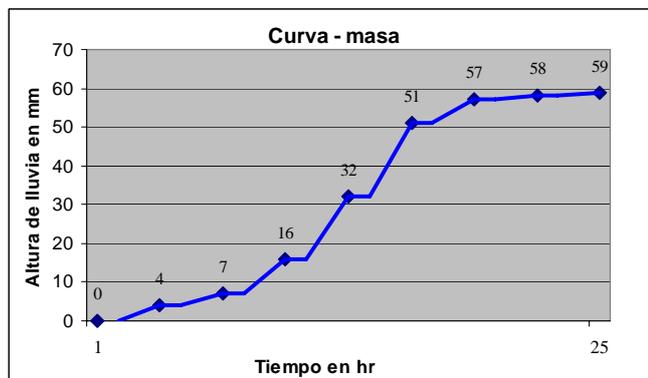


Figura 2.5 Curva masa formada a partir del registro de la Tabla 2.1Tabla .

Los registros también es común encontrarlos representados en tablas que finalmente proporcionan la misma información que los hietogramas, obteniéndose de esta manera información para cálculos posteriores, generalmente aplicados en la hidrología superficial.

En ocasiones, la precipitación se representa por medio de mapas de isoyetas<sup>3</sup> las cuales se forman a partir de la interpolación de la información que se registran en los sitios con pluviómetros, asociando la lluvia a una duración de tormenta y a un periodo de recurrencia o retorno determinado. El trazado de las isoyetas se realiza mediante técnicas utilizadas para cualquier tipo de isolíneas (isobaras, isotermas, curvas de nivel, etc.) ya sea manualmente o con la ayuda de algún software especializado (Surfer, AutoCAD Land, Civil 3D, etcétera) obteniéndose de esta manera curvas con igual precipitación, como las mostradas en la siguiente figura.

---

<sup>3</sup> Una isoyeta es una curva que une a puntos de igual volumen de precipitación.

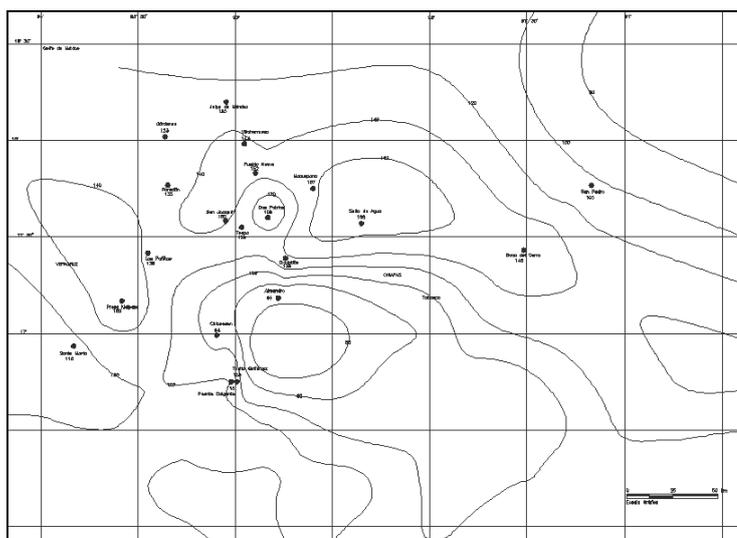


Figura 2.6 Intensidad de lluvia marcada por curvas de isoyetas en mm/hr, para una duración y un periodo de retorno  $T_r$  determinados. Fuente SCT – DGST

Como se mencionó en los párrafos anteriores, las curvas isoyetas, son empleadas generalmente para realizar estudios hidrológicos, y permiten obtener a simple vista la cantidad de precipitación que cae en una zona que se desee estudiar, la cual se puede asociar a un determinado periodo de retorno y a una duración de tormenta específica, los cuales fueron obtenidos estadísticamente previo al trazado de cada curva.

En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, publica periódicamente las curvas isoyetas correspondientes a diferentes periodos de retorno y relacionadas con diferentes duraciones de lluvia, las cuales pueden ser utilizadas para generar mediante procesos estadísticos curvas de intensidad-duración-periodo de retorno.

Existen cuencas hidrográficas, cuyo parteaguas abarca varias isoyetas, por lo que sería inexacto obtener una precipitación media en la cuenca de forma directa; es decir, mediante visualización, es por ello que existen diversos métodos que permiten obtener -mediante el uso de ecuaciones matemáticas- el valor de la precipitación media en la cuenca, la cual posteriormente se empleará para determinar las curvas I-D-TR mencionadas en el párrafo anterior.

En los párrafos siguientes, se explican tres de estos métodos, los cuales aplican para diferentes escenarios, en función de las características fisiográficas de la cuenca en estudio.

*Método de la media aritmética:* Este método consiste en obtener la media aritmética de los valores de la precipitación, registrada en las estaciones que están dentro del área de la cuenca en estudio. Este método muestra resultados satisfactorios cuando la distribución de los pluviógrafos es uniforme en el área de la cuenca y no hay excesiva variación entre los valores registrados.

$$Pm = \frac{\sum P_i}{n_i}$$

Donde:

Pm: Precipitación media del área de influencia de la estación i.

P<sub>i</sub> : Precipitación media de la estación i.

N<sub>i</sub> : Numero de estaciones dentro de la cuenca.

*Método de los polígonos de Thiessen:* Este método considera que la intensidad de lluvia en cualquier punto de cada polígono formado es igual a la registrada en el pluviómetro más cercano; es decir, si existen N pluviómetros y A<sub>i</sub> es el área del polígono asignada a cada pluviómetro y P<sub>i</sub> es la lluvia registrada en cada pluviómetro, la precipitación media se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Pm_j = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * P_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Donde:

$P_{m_i}$  : Precipitación media del área de influencia de la estación  $i$ .

$A_i$  : Área de influencia de la estación pluviométrica  $i$ , correspondiente a cada polígono de Thiessen.

$P_{ii}$  : Precipitación media de la estación  $i$ .

El trazado de los polígonos de Thiessen obedece a las condiciones geográficas de la distribución de estaciones, siendo únicos para cada distribución. Los pasos a seguir para el trazado de estos polígonos son los siguientes:

- Generación de la red de triángulos irregulares correspondientes a todos los pluviógrafos existentes en el área de estudio, tomando los pluviógrafos en grupos de tres. Se deben tomar, en forma sucesiva, los tres pluviógrafos más cercanos entre si, tratando que los triángulos sean lo mas equiláteros posibles y que dentro de una circunferencia descrita por estos tres pluviógrafos, no exista otro.
- Trazado las líneas mediatrices de cada triángulo trazado. Las mediatrices son las líneas que cortan a cada lado en forma perpendicular y por su punto medio. Las mediatrices de un triángulo se cortan todas en un solo punto, llamado circuncentro.
- Todos los polígonos trazados deben ser convexos, o sea, todos los ángulos interiores son menores de  $180^\circ$ .

En el ejemplo siguiente se muestra paso a paso la aplicación de este método.

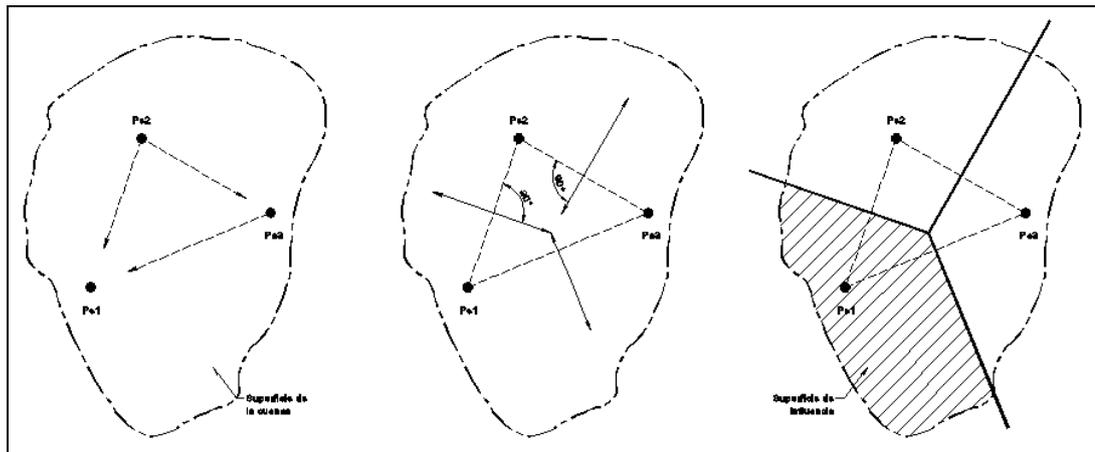


Figura 2.7 Formación de polígonos de Thiessen, mediante mediatrices a las líneas imaginarias que unen a las estaciones pluviométricas.

*Método de las isoyetas:* Este es otro método para la obtención de la precipitación media, previo a su aplicación es necesario contar con los parteaguas de las cuencas y sobre ellos dibujar las isoyetas, correspondientes a los periodos de retorno y las duraciones de tormenta requeridos en el estudio.

La aplicación del método pondera la precipitación en función de la distribución espacial de las isoyetas, para esto es necesario calcular el área de superposición entre estas y la cuenca. Se admite que en cada área definida precipita una lluvia uniforme igual a la media de las dos isoyetas que la limitan. La ecuación empleada en este método se denota como sigue:

$$Pm = \frac{\sum A_i * Pe_i}{\sum A_i}$$

Donde:

$A_i$  : Área entre las isoyetas de precipitación  $i$ , dentro de la cuenca de estudios.

$Pe_i$  : Precipitación media del área de las isoyetas  $i$  para la cuenca estudiada.

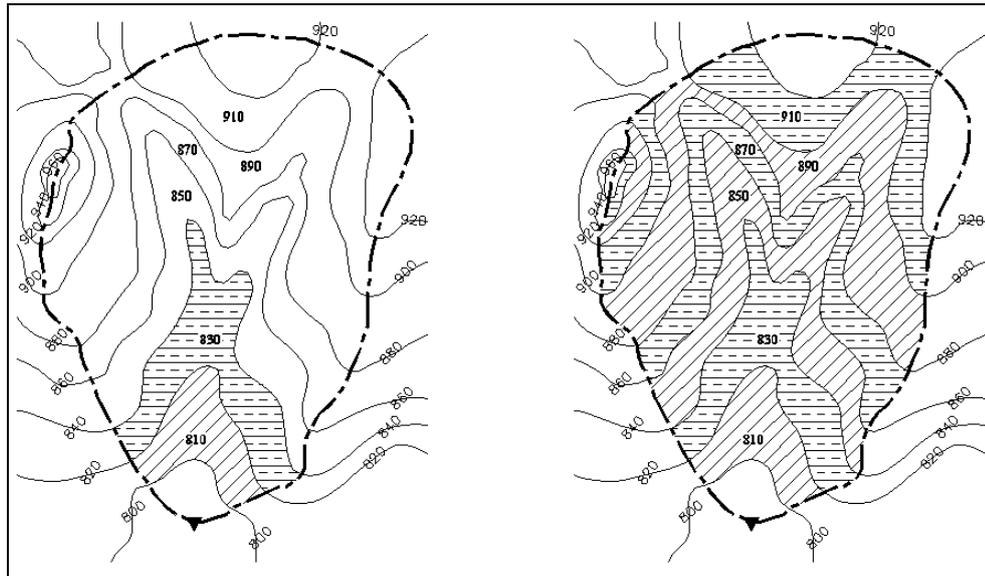


Figura 2.8 Representación de áreas entre isoyetas con valores medios de precipitación entre cada isoyeta.

En todos los métodos explicados, la precipitación media obtenida es para un periodo de retorno ( $T_r$ ) y una duración de tormenta específica. Con esta información se generan series de datos que al ser graficados es posible obtener curvas de intensidad de lluvia, relacionadas con una duración de tormenta y un periodo de retorno dado.

El fenómeno de precipitación es seguido por otro denominado escorrentía, el cual es la parte de la precipitación que llega o alimenta a las corrientes superficiales ya sean continuas o intermitentes en una cuenca.

Existen diferentes tipos de escorrentía, los cuales dependen de su procedencia y su evolución, estos tipos son: *escorrentía superficial*, *escorrentía subsuperficial* y *escorrentía subterránea*. La primera, es la precipitación que no se infiltra y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por acción de la gravedad. Corresponde entonces a la precipitación que no queda retenida en depresiones del suelo ni se infiltra y que se escapa de los fenómenos de evaporación y transpiración.

El segundo tipo de escorrentía, es la precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve lateralmente por los horizontes superiores para reaparecer de

pronto al aire libre e incorporarse a los pequeños surcos superficiales que la conducirán a la red de drenaje.

Finalmente, el tercer tipo de escorrentía, es la precipitación que se infiltra hasta alcanzar la capa freática, este tipo de escorrentía circula a través de acuíferos hasta alcanzar la red de drenaje. Así como la escorrentía superficial se mueve con cierta rapidez, la velocidad del agua subterránea suele ser muy baja, del orden de metro por hora o menor.

Para fines de medición de este fenómeno se han usado diferentes métodos, tanto directos como indirectos manuales o automáticos, la mayor parte de ellos basados en la ecuación de continuidad. Para su medición se consideran la profundidad del cauce, la velocidad, la superficie libre del agua, la sección hidráulica, la pendiente del río, etc. En algunas ocasiones puede hacerse uso de secciones de control, cuya geometría es regular y conocida, tal es el caso del vertedor tipo parshal.

Un método muy usual para hacer mediciones de escorrentía es usando el método de aforos sobre los cauces. Cualquiera que sea el método empleado el objetivo de estos será el construir curvas de gasto o de descarga, las cuales consisten en relacionar el nivel del agua con un gasto correspondiente.

Otra forma de medir la escorrentía es mediante series de tiempo, que relacionan un caudal estimado en un tiempo determinado, estas series de tiempo son denominadas hidrogramas; el hidrograma es entonces la curva que resulta de graficar los caudales en el tiempo que se presentan y sirve para estudiar la variación del caudal en un punto específico de un cauce.

Se puede considerar el hidrograma como una expresión integral de las características fisiográficas de la cuenca. Un hidrograma típico tiene una forma acampanada, donde la punta corresponde al caudal máximo alcanzado con la intensidad máxima de lluvia (gasto pico). Si llegasen a ocurrir varias tormentas consecutivas, estos serán representados por varias puntas en el hidrograma, esto

también puede suceder si el escurrimiento que aportan otros afluentes no se presenta en forma sincronizada.

En un hidrograma se tienen los siguientes elementos de mayor relevancia; Curva de afluencia o concentración, curva de fluencia, curva de agotamiento, tiempo base, tiempo de reacción o tiempo de concentración, siendo este el mas representativo de todos los elementos mencionados.

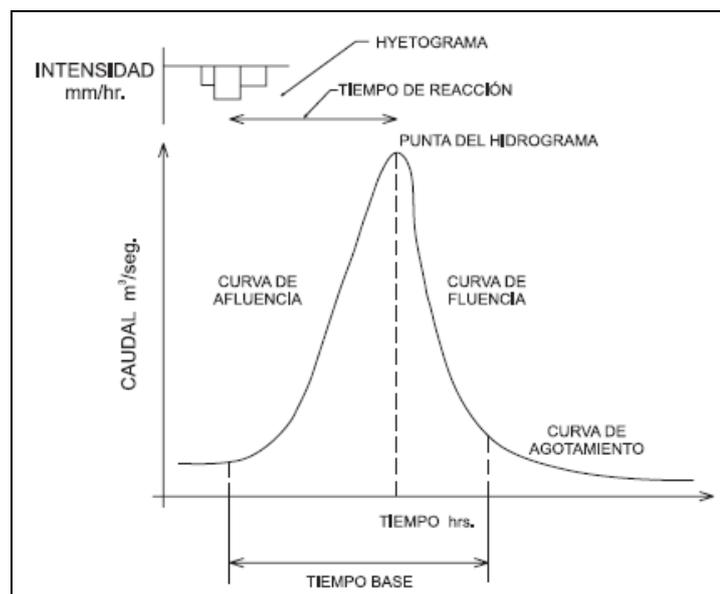


Figura 2.9 Elementos de un hidrograma

En la figura anterior, pueden apreciarse gráficamente todos los elementos que componen a un hidrograma; sin embargo, como se mencionó en el párrafo anterior, uno de los elementos de mayor relevancia dentro de una tormenta es el denominado tiempo de reacción o de concentración, pues este representa el momento cuando la tormenta alcanza su máximo valor, es decir, cuando se presenta el gasto pico, es por ello que se considera necesario abundar sobre el significado de este concepto.

## 2.1 Tiempo de concentración

También denominado tiempo de respuesta o de equilibrio, se define como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el cauce.

Se atribuye comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto de la cuenca más alejado del cauce en llegar a éste. Esto no corresponde con la realidad, pues puede haber puntos de la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al cauce que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante; depende de muchos factores entre los que destacan: Factores geológicos, pluviométricos y físicos.

Actualmente, son muchos y diversos investigadores los que han propuesto ecuaciones para la estimación de este parámetro. Todas estas ecuaciones son empíricas formadas a partir de características físicas, morfológicas y geométricas de la cuenca. Estas ecuaciones se enlistan en la Tabla 2.2, en ella se muestran algunas observaciones de mayor relevancia, correspondiente a cada método propuesto.

Tabla 2.2 Métodos para la obtención del tiempo de concentración  $t_c$ , para diferentes aplicaciones

Método	Fórmula	Definiciones	Observaciones
<i>Kirpich</i>	$t_c = 0.01947 L^{0.77} S^{-0.85}$	L= Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m S= Pendiente promedio de la cuenca, m/m	Desarrollada partir del SCS en siete cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10 %) para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar $t_c$ por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ni un ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo de cunetas.
Californiano Culvert Practice	$t_c = 0.006 \left[ \frac{L}{J^{1/2}} \right]^{0.77}$	L= Longitud del curso del agua más largo, Km. J= Pendiente promedio de la cuenca, m/m	Esencialmente es la ecuación de Kirpich, desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California (U.S. Bureau of Reclamation)
<i>Izzard</i>	$t_c = \frac{41.025(0.0007i + c)L^{0.33}}{S^{0.333} i^{0.667}}$	i= Intensidad de la lluvia, in/hr c= Coeficiente de retardo L= Longitud de la trayectoria, ft S= Pendiente de la trayectoria del flujo, ft/ft	Desarrollada experimentalmente por el Bureau of Public Roads para flujo superficial en caminos y áreas de céspedes: los valores del coeficiente de retardo varían desde 0.007 para pavimentos muy lisos hasta 0.012 para pavimentos de concreto y 0.06 para superficies densamente cubiertas de pasto; la solución requiere de procesos iterativos; el producto de $i$ por L debe ser < 500
Federal Aviation Administration	$t_c = 1.8(1.1 - C)L^{0.50} / S^{0.333}$	C= Coeficiente de escorrentía método racional L= Longitud del flujo superficial, m S= Pendiente de la superficie de la cuenca, %	Desarrollada de la información de drenaje de aeropuertos recopilada por el Corps of Engineers: el método tiene como finalidad ser usado en problemas de drenaje de aeropuertos, pero ha sido frecuentemente usado para flujo superficial de cuencas urbanas.
Ecuaciones de Onda Cinemática <i>Morgali y Linsley</i> <i>Aron y Erborge</i>	$t_c = \frac{0.94 L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$	L= Longitud del flujo superficial, ft n= Coeficiente de rugosidad de Manning i= Intensidad de lluvia, in/hr S= Pendiente promedio del terreno, ft/ft	Ecuación para flujo superficial desarrollada a partir de análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial desde superficies desarrolladas; el método requiere iteraciones debido a que $i$ (intensidad) como $t_c$ son desconocidos: la superposición de una curva de intensidad-duración-frecuencia da una solución gráfica directa para $t_c$
Ecuación de retardo de SCS	$t_c = \frac{100 L^{0.08} [(1000 / CN) - 9]^{0.7}}{1900 S^{0.5}}$	L= Longitud de la mayor trayectoria de flujo, ft CN= Número de curva SCS S= Pendiente promedio de la cuenca, %	La ecuación fue desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada para pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 2000 acres: se ha encontrado que generalmente tiene buenos resultados cuando el área se encuentra completamente pavimentada: para áreas mixtas tiene tendencia a la sobre estimación: se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización de superficies; la ecuación supone que $t_c = 1.67$ x retardo de la cuenca
<i>Giandotti</i>	$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 \sqrt{J} * L}$	A= Superficie de la cuenca, Km <sup>2</sup> L= Longitud promedio del cauce principal, Km. J= Pendiente promedio del cauce m/m	Este método se realizo para cuencas pequeñas, con pendientes apreciable tales como hoyas o cordilleras.
<i>Ventura - Heras</i>	$t_c = \alpha \frac{A^{0.5}}{J}$	A= Superficie de la cuenca, Km <sup>2</sup> 0.04 ≤ a ≤ 0.13 J= Pendiente promedio del cauce, m/m	
<i>Passini</i>	$t_c = \frac{\beta [A * L]^{1/2}}{J^{0.5}}$	A= Superficie de la cuenca, Km <sup>2</sup> 0.04 ≤ b ≤ 0.13 L= Longitud promedio del cauce principal, Km. J= Pendiente promedio del cauce, m/m	
<i>Témez</i>	$t_c = 0.3 \left[ \frac{L}{J^{1/4}} \right]^{0.76}$	L= Longitud promedio del cauce principal, Km. J= Pendiente promedio del cauce, m/m	Modificación de US Army Corps of Engineers; el método supone que el $t_c$ es igual al caudal máximo generado por una lluvia con la misma duración de este.

Las fórmulas anteriores se desarrollaron de forma práctica para cuencas con características similares o típicas, por lo que es recomendable usar la que mas se apegue a las características de la cuenca en estudio.

## **2.2 Cálculo de la escorrentía**

Para evaluar la cantidad de escorrentía de una cuenca existen diversos métodos, desarrollados por investigadores tanto prácticos como analíticos, y cuyos resultados son aplicables para diferentes condiciones de cuenca. De estos métodos podemos citar algunos, los cuales son los más usados para el cálculo del gasto de diseño de una cuenca.

### **2.2.1 Método Racional.**

Este método es la aproximación más sencilla para evaluar el caudal que producirá una precipitación en el área de estudio. Supone que la intensidad de precipitación  $I$  (mm/hr) es constante y cae de manera uniforme sobre un área  $A$  (km<sup>2</sup>), si toda el agua de la precipitación produjera escorrentía, entonces al multiplicar la superficie de la cuenca por la intensidad de lluvia se obtendría un caudal  $Q$ ; sin embargo, nunca toda el agua precipitada se convierte en escorrentía, por lo que el cálculo con este método no es directo, es por ello que para obtener una mejor aproximación del valor del caudal de diseño, es necesario aplicar un coeficiente de escorrentía  $C$ , el cual representará la porción de agua que no escurre sobre el terreno.

$$Q = C * I * A$$

$Q$  Gasto máximo en m<sup>3</sup>/s,

$C$  Coeficiente de escurrimiento.

$I$  Intensidad de lluvia en mm/hr.

$A$  Área de la cuenca en kilómetros cuadrados.

### 2.2.2 Método Racional Modificado.

Para aplicar este método, la fórmula racional propuesta se puede escribir de la forma explícita siguiente (fórmula racional probabilística).

$$q(Y) = F \cdot C(Y) \cdot i(tr, Y) \cdot A$$

Donde:

$q$  Gasto máximo en m<sup>3</sup>/s.

$i$  Intensidad de lluvia en mm/hr.

$C$  Coeficiente de escurrimiento.

$F$  Factor de conversión de unidades y es igual a 0.278 ó 1/3.6 en el sistema métrico.

$A$  Área de la cuenca en kilómetros cuadrados.

$tr$  Tiempo de retorno, para cuencas pequeñas,  $tr$  es igual al tiempo de concentración, que se denota como  $tc$ .

Las variables  $q, i$  y  $C$  están relacionadas con el periodo de retorno promedio de  $Y$  años.

El valor del coeficiente de escurrimiento  $C$ , se propone en base a características físicas de la cuenca y del intervalo de recurrencia.

Tabla 2.3 Coeficientes C para aplicación del método racional

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Bosque			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

### 2.2.3 Método de Ferrer.

Este método se basa en el método racional, haciendo un ajuste a la precipitación por medio de un factor “K” ya que considera que la precipitación no es uniforme en el tiempo, y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{1}{3.6} [C * I * A * K]$$

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

Donde:

$K$  Coeficiente uniformidad.

$t_c$  Tiempo de concentración.

Antes de emplear el método, se hace un ajuste en el área de aportación de la cuenca, ya que establece que la precipitación no es uniforme geográficamente. Para realizar este ajuste se utiliza la fórmula de Temez por ser una de las más simples y se expresa de la siguiente manera:

$$A_{RF} = 1 - \frac{\log.Sup(km^2)}{15}$$

La precipitación obtenida se corrige con este factor, por lo que queda:

$$P_{CORR} = P * A_{RF}$$

#### 2.2.4 Método del hidrograma unitario sintético

Este método, desarrollado por el SCS<sup>4</sup>, también llamado del “número de curva” consta de dos partes. En la primera de ellas se hace una estimación del volumen de escorrentía resultante de una precipitación, en la segunda se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta. Esto lo representa una comparación gráfica de los gastos de escurrimiento contra el tiempo necesario para que estos se presenten.

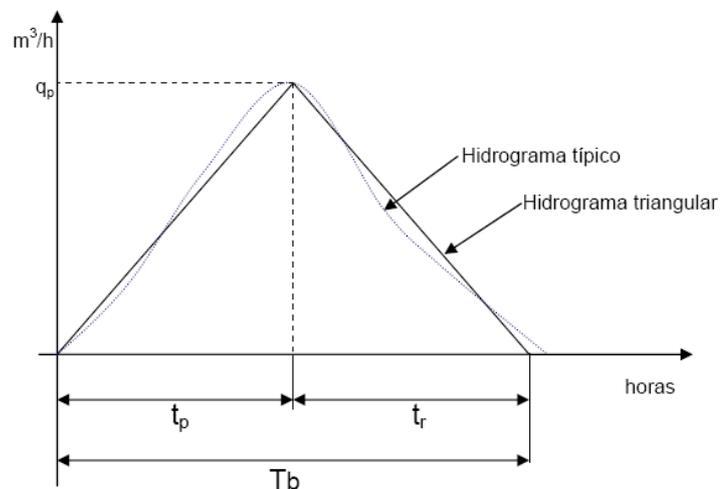


Figura 2.10 Apreciación del método del hidrograma sintético y un hidrograma típico.  $T_b$  es el tiempo base,  $T_p$  es el tiempo de ocurrencia del caudal pico y  $T_r$  el tiempo de retardo

Generalmente este método es aplicable a cuencas hidrográficas con áreas mayores a 10 km<sup>2</sup>.

---

<sup>4</sup> Soil Conservation Service

La teoría de este método se basa en considerar las siguientes propiedades; La primera considera que la precipitación efectiva se distribuye uniformemente en el tiempo o en el periodo de duración efectiva de la lluvia, y la segunda que la precipitación se distribuye uniformemente en toda el área de la cuenca de drenaje. El caudal de punta se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$q_p = \frac{0.208 * A}{t_p},$$

Donde:

$$t_p = [0.5 * D] + [0.6 * t_c]$$

- q<sub>p</sub> Caudal pico del hidrograma unitario m<sup>3</sup>/s.
- A Superficie de la cuenca en Km<sup>2</sup>.
- t<sub>p</sub> Tiempo de ocurrencia del caudal pico en Hr.
- D Duración de la precipitación neta en Hr.
- t<sub>c</sub> Tiempo de concentración en Hr.

## 2.2.5 Otros métodos de cálculo del caudal

Además de los métodos estadísticos mencionados anteriormente, también existen otros más sencillos, elaborados de forma empírica y cuyos resultados obtenidos tienen un grado de incertidumbre mayor. Estos métodos son:

### 2.2.5.1 Fórmula de Gómez Quijado

$$Q = \frac{17 * S^2}{3}$$

- Q Caudal de diseño m<sup>3</sup>/s.
- S Superficie de la cuenca m/m.

### 2.2.5.2 **Fórmula de Fuller**

$$Q = Q_0 (1 + 0.8 * \text{Log } T)$$

$Q_T$  Caudal para un periodo de retorno T

$Q_0$  Media de los caudales diarios de un año

T Periodo de retorno para el caudal calculado

### 2.2.5.3 **Formula de Zapata**

$$Q = 21 * S * 0.6$$

Q Caudal m<sup>3</sup>/s

## CAPÍTULO 3

### HIDRÁULICA

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el estudio del ciclo hidrológico conlleva la intervención de varias disciplinas de la ingeniería, por ejemplo la hidrología, descrita de forma general en el capítulo 2. Otra materia involucrada en el estudio de este conjunto de fenómenos es la hidráulica y sus múltiples especialidades. La hidráulica fluvial, por ejemplo, se encarga de estudiar el comportamiento del agua que se conduce a través de cauces de diferentes tamaños hasta llegar a los estanques, lagunas u océanos. Por la naturaleza del presente trabajo de tesis, se consideró conveniente destinar este capítulo al desarrollo de esta materia, con el fin de lograr un mejor entendimiento del comportamiento hidráulico del agua en los cauces.

#### 3.1 Hidráulica de canales abiertos

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias formas, la siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

*Flujo permanente y flujo no permanente: tiempo como criterio.* Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración. En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo sólo bajo condiciones permanentes. Para cualquier flujo, el caudal  $Q$  en una sección del canal se expresa por:

$$Q = V * A$$

Donde:

$V$ = velocidad media m/s

$A$ = área de la sección transversal m<sup>2</sup>.

En la mayor parte de los problemas de flujo permanente el caudal es constante a través del tramo del canal en consideración; en otras palabras, el flujo es continuo. Entonces:

$$Q = V_1 * A_1 = V_2 * A_2 = \dots$$

Donde los subíndices designan diferentes secciones del canal. Esta es la ecuación de continuidad para flujo permanente.

Para mayor claridad la clasificación del flujo en canales abiertos se resume de la siguiente manera:

Flujo permanente

    Flujo uniforme

Flujo variado

a) Flujo gradualmente variado

b) Flujo rápidamente variado

Existe otro tipo de flujo, el no permanente y ocurre si la profundidad cambia con el tiempo. En este trabajo de tesis no se analizará este tipo de flujo, Ven-te Chow hace una amplia explicación sobre el tema.

El régimen de flujo de una corriente se clasifica en función al número de Froude, el cual es la relación adimensional entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, esta dada por la ecuación:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Donde:

F      Es el número de Froude

- V Es la velocidad media del flujo en m/seg
- g Es la aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>
- L Es la longitud característica en m (igual a la profundidad D en canales rectangulares).

Cuando F es igual a la unidad F=1 la ecuación se convierte en:

$$V = \sqrt{gD}$$

Y se dice que el flujo está en estado crítico. Si F es menor que la unidad

$$F < 1 \text{ o } V < \sqrt{gD}$$

el flujo es subcrítico. En este caso el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado; por lo tanto, el flujo tiene una velocidad baja. Si F es mayor que la unidad

$$F > 1 \text{ o } V > \sqrt{gD}$$

El flujo es supercrítico. En este estado las fuerzas inerciales se vuelven dominantes; el flujo tiene una alta velocidad y se describe como muy rápido. *“Debido a que el flujo en la mayor parte de los canales esta controlado por efectos gravitacionales, un modelo utilizado para simular un canal prototipo con propósitos de prueba debe de ser diseñado teniendo en cuenta este efecto; es decir, el número de Froude del flujo en el canal modelo debe de ser igual al número de Froude del flujo en el canal prototipo”* (Ven-te Chow, 1994).

## 3.2 Propiedades de los canales abiertos

### 3.2.1 Rugosidad

*El coeficiente de rugosidad* es el valor que representa la resistencia al flujo por fricción, llamado "n" de Manning, Ven TE Chow en su libro “Hidráulica de Canales

Abiertos" menciona una guía para la determinación correcta de este coeficiente la cual consiste de cuatro enfoques generales, estos son:

1. Entender los factores que afectan el valor de "n" con el fin de adquirir el conocimiento básico del problema y disminuir el rango de incertidumbre.

- Rugosidad superficial.
- Vegetación.
- Irregularidad del canal.
- Alineamiento del canal.
- Sedimentación y socavación.
- Obstrucción.
- Tamaño y forma del canal.
- Nivel y caudal.
- Cambio estacional.
- Material en suspensión y carga del lecho.

2. Consultar una tabla de valores comunes para "n" para canales de diferente tipo.

3. Examinar y familiarizarse con la apariencia de algunos canales comunes cuyos coeficientes de rugosidad se conocen.

4. Determinar el valor de "n" mediante un procedimiento analítico basado en la distribución de velocidades teóricas en la sección transversal de un canal y en los datos de medición de velocidad o de rugosidad.

Para calcular el coeficiente de rugosidad se puede utilizar el método de medición de velocidades mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{(x-1)y^{1/6}}{6.78(x+0.95)}$$

Donde:

y= tirante del agua en metros.

x= velocidad promedio m/s

### 3.2.2 Viscosidad

La *viscosidad* es otra propiedad de los líquidos íntimamente vinculada con la resistencia al flujo. Se define como la fuerza requerida para mover en forma continua una superficie plana sobre otra bajo condiciones específicas constantes, cuando el espacio entre ambas esta ocupado por un líquido.

La viscosidad se puede expresar en términos de viscosidad absoluta  $\eta$ , que se define como la fuerza por unidad de área necesaria para mantener una unidad de gradiente de velocidad. Las unidades básicas son el poise y centipoise (siendo 1 poise = 100 centipoise).

La viscosidad del agua representa un factor muy importante en el estudio de los cauces naturales. Esta viscosidad depende principalmente de la concentración de la carga de sedimentos en suspensión, y en menor escala de la temperatura.

En cauces limpios, o sea en aquellos en los que la concentración de sedimentos es menor del 10 % en volumen, el agua puede considerarse como de baja viscosidad. A la temperatura de 20 °C la viscosidad absoluta es del orden de 1 centipoise (unidad de medición de la viscosidad).

En el caso extremo cuando se conforman flujos de lodo, donde la proporción volumétrica entre el sedimento y el líquido sobrepasa el 80 %, la viscosidad aumenta.

### 3.2.3 Energía

La *energía específica*, es otro concepto que interviene de forma directa en el comportamiento hidráulico de un cauce, ésta se define como la energía del agua en cualquier sección de un canal medida con respecto al fondo de este y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$E = d \cos^2 \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Para un canal de pendiente pequeña y con flujo turbulento  $\alpha=1$ , por lo que la ecuación anterior se puede escribir:

$$E = y + \frac{V}{2g}$$

Lo que indica que la energía específica es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad. Para propósitos de simplicidad, el siguiente análisis se basará en la ecuación anterior para un canal de pendiente pequeña. Como  $V = Q / A$ , la ecuación puede escribirse como:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Puede verse que, para una sección de canal y caudal  $Q$  determinados, la energía específica está en función directa de la profundidad de flujo.

Cuando la profundidad de flujo se gráfica contra la energía para una sección y un caudal determinados, se obtiene la curva de energía específica, ver Figura 3.1. Esta curva tiene dos ramas, AC y BC. La rama AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal hacia la derecha. La rama BC se aproxima a la línea OD a medida que se extiende hacia arriba y hacia la derecha. La línea OD es una línea que pasa a través del origen y tiene un ángulo de inclinación.

Para un canal de pendiente alta, el ángulo de inclinación de la línea OD será diferente de  $45^\circ$ . En cualquier punto P de esta curva, la ordenada representa la profundidad y la abscisa representa la energía específica, que es igual a la suma de la altura de presión "y" y la altura de velocidad  $V^2/2g$ .

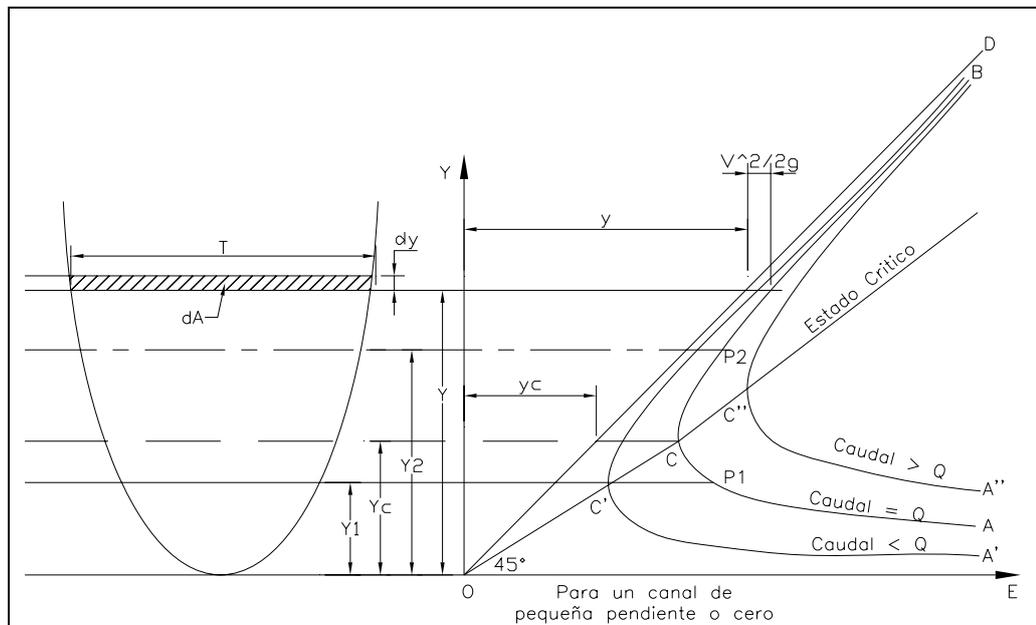


Figura 3.1 Curva de energía específica para un canal de pequeña pendiente a cero

La curva muestra que, para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades, la profundidad baja  $y_1$  y la profundidad alta  $y_2$ . La profundidad baja es la profundidad alterna de la profundidad alta, y viceversa. En el punto C, la energía específica es mínima. Por consiguiente, en el estado crítico es claro que las dos profundidades alternas se convierten en una, la cual es conocida como profundidad crítica  $y_c$ .

Cuando la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica para un caudal determinado y, por consiguiente, el flujo es subcrítico. Cuando la profundidad de flujo es menor que la profundidad crítica, el flujo es supercrítico. Por tanto,  $y_1$  es la profundidad de un flujo supercrítico y  $y_2$  es la profundidad de un flujo subcrítico.

En hidráulica se sabe que la energía total del agua en metros-kilogramos por kilogramos de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal

puede expresarse como la altura total en pies de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad, y queda expresado por la siguiente ecuación:

$$H = z_A + d_A \cos \theta + \frac{V_A^2}{2g}$$

En la Figura 3.2 se muestra dicho principio

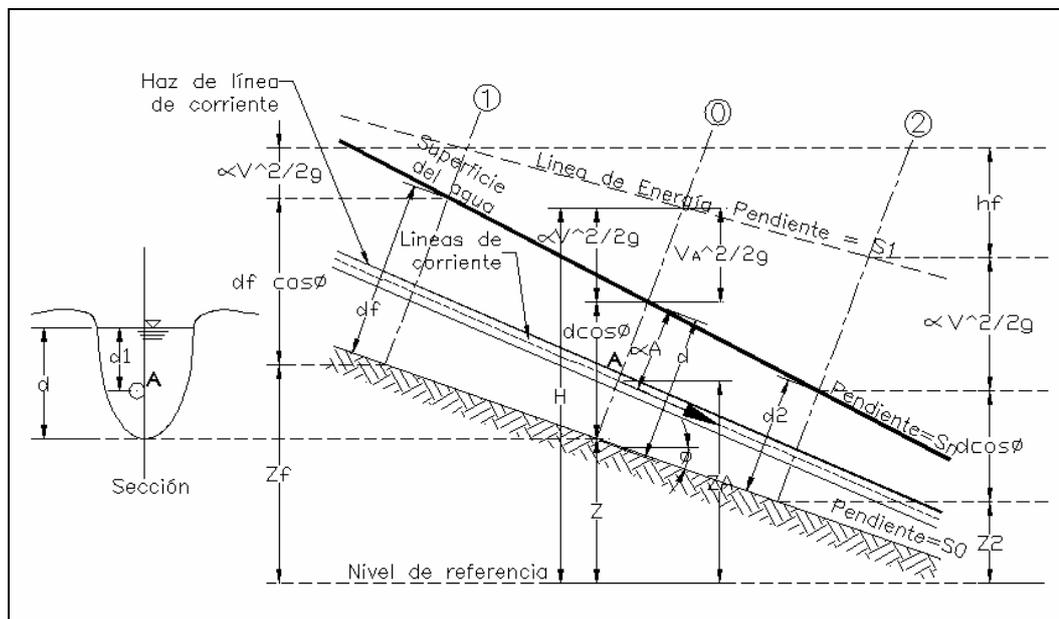


Figura 3.2 Energía en un flujo gradualmente variado en canales abiertos

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 localizada aguas arriba debe de ser igual a la altura de energía total en la sección 2 localizada aguas abajo más la pérdida de energía \$h\_f\$ entre las dos secciones.

$$z_1 + d_1 \cos \phi + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \phi + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

Esta ecuación es aplicable a flujos paralelos o gradualmente variados. Para un canal de pendiente pequeña, esta se convierte en:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \rightarrow \cos \phi \cong 0$$

Las ecuaciones mostradas anteriormente son las fundamentales para la obtención de la elevación de la lámina de agua por medio de tanteos y son las que se utilizan en la modelación matemática.

### 3.2.4 Momento

Cuando la superficie del agua pasa a través de la línea de profundidad crítica la ecuación de la energía no se considera aplicable. La ecuación de la energía es solamente aplicable a situaciones de flujo gradualmente variado y en la transición de flujo subcrítico a supercrítico o de supercrítico a subcrítico siempre que el flujo sea rápidamente variable.

Existen varios instantes cuando ocurre la transición del régimen subcrítico al supercrítico o viceversa, esto incluye los cambios significativos en la pendiente del canal, el estrangulamiento por un puente, las estructuras en cimacio o vertedores y las confluencias de ríos. En algunos de estos casos la ecuación empírica de la energía puede ser usada, mientras en otras es necesario aplicar la ecuación de momento para poder obtener una solución.

La ecuación de momento se utiliza para solucionar en tres principales casos en flujos permanentes y son: en los saltos hidráulicos, confluencia de ríos y paso en puentes.

La ecuación de momento se deriva de la segunda ley de Newton de movimiento y dice fuerza es igual a masa por aceleración.

$$\sum F_x = ma$$

La segunda Ley de Newton aplicada en un cuerpo en el agua delimitado por dos secciones 1 y 2 se puede ver en la siguiente figura:

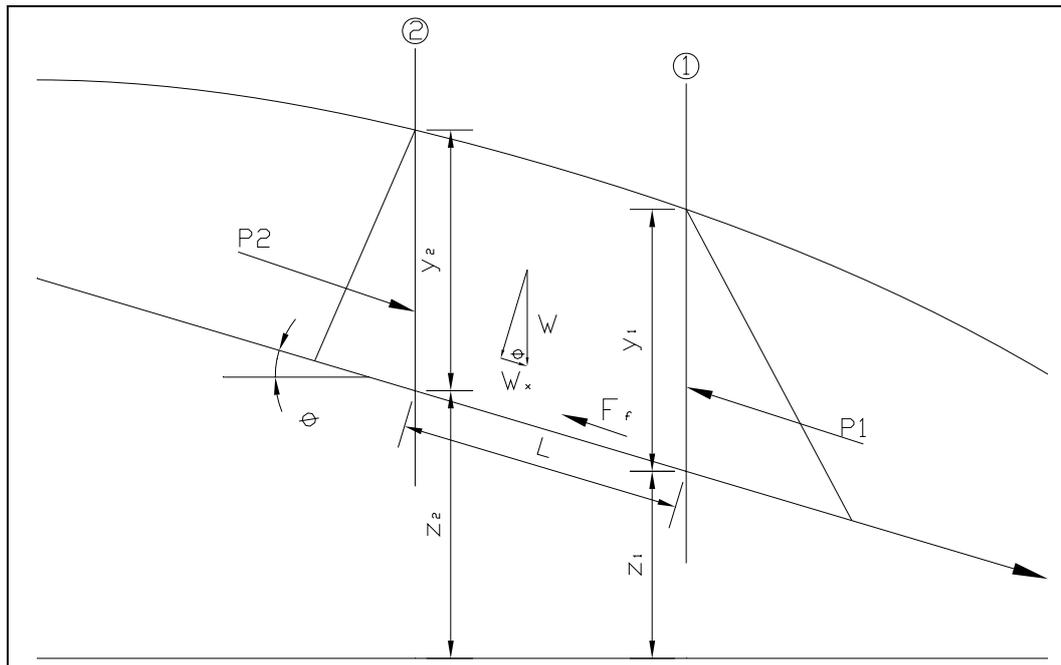


Figura 3.3 Aplicación de la ecuación de momento en un cuerpo sumergido en agua.

El cambio de momento por unidad de tiempo puede expresarse como:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q \rho \Delta V_x$$

Donde

$P$  = Fuerza resultante de la presión hidrostática en 1 y 2

$W_x$  = Fuerza debida al peso del agua en dirección X

$F_f$  = Fuerza debida a la fricción generada entre 1 y 2

$Q$  = Gasto

$\rho$  = Densidad del agua

$V_x$  = Diferencia de velocidades entre el punto 1 y 2.

La fuerza en dirección "X" debida a la presión hidrostática se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$P = \gamma A \bar{Y} \cos \theta$$

La suposición de una presión hidrostática distribuida es solo válida para pendientes menores que 1:10, puesto que la pendiente de canales normalmente es mucho menor de 1:10, la corrección del  $\cos \theta$  puede ser fijada en 1.

Por consiguiente la ecuación de la fuerza de presión hidrostática en las secciones 1 y 2 es:

$$P_1 = \gamma A_1 \bar{Y}_1$$

$$P_2 = \gamma A_2 \bar{Y}_2$$

Donde

$\rho$  = Peso específico del agua.

$A_i$  = Área mojada de las secciones transversales en los puntos 1 y 2.

$\bar{Y}_i$  = Profundidad medida de la superficie libre del agua al centroide del área de la sección transversal 1 y 2.

El peso de la fuerza del agua está dado por:

$$W = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L$$

$$W_x = W \sin \theta$$

$$\sin \theta = \frac{z_2 - z_1}{L} = S_o$$

$$W_x = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_o$$

Donde:

$L$  = Distancia entre las secciones 1 y 2 a lo largo del eje x local.

$S_o$  = Pendiente media del fondo canal.

$z_i$  = Elevación promedio de las secciones 1 y 2.

La fuerza debida a la Fricción está dada por la siguiente ecuación:

$$F_f = \tau \bar{P} L$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

$\bar{P}$  = Perímetro mojado promedio entre las secciones 1 y 2.

$$\tau = \gamma \bar{R} \bar{S}_f$$

Donde:

$\bar{R}$  = Radio hidráulico promedio.

$\bar{S}_f$  = Pendiente de la línea del gradiente de energía.

$$F_f = \gamma \frac{\bar{A}}{\bar{P}} \bar{S}_f \bar{P} L$$

$$F_f = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \bar{S}_f L$$

La masa por la aceleración por unidad de tiempo está expresada por la siguiente ecuación:

$$ma = Q \rho \Delta V_x$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{y} \quad \Delta V_x = (\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2)$$

$$ma = \frac{Q\gamma}{g}(\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2)$$

Donde

$\beta$  = Coeficiente del momento y responsable de la variación de la distribución de velocidades en canales irregulares.

Sustituyendo las ecuaciones anteriores, se llega a una variación de la ecuación de momento la cual es resuelta en la solución de modelos unidimensionales por la mayoría de los modelos formados para flujos permanentes.

$$\frac{Q_2^2 B_2}{gA_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L S_o - \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1^2 B_1}{gA_1} + A_1 \bar{Y}_1$$

Lo mencionado en este capítulo se refiere brevemente algunos elementos básicos de la hidráulica de canales a superficie libre para flujos permanentes y gradualmente variados y de fondo fijo. En este capítulo se mencionaron esquemas numéricos simples pero eficaces, pueden considerar cambios de régimen en cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación, y singularidades tales como vertedores, puentes, pasos bajo vía, etc.

En resumen, los conceptos de momento y energía son aplicadas para dar solución a problemas de hidráulica a superficie libre. En el caso del modelo matemático empleado en la presente tesis, también aplican estas ecuaciones, puesto que la problemática que se pretende resolver, está envuelta por una diversidad de escenarios que requieren de dichas ecuaciones para su solución.

## CAPÍTULO 4

### MODELACIÓN MATEMÁTICA

En este capítulo se describe a grandes rasgos la conceptualización de un modelo matemático aplicado a la hidráulica de canales abiertos, algunas de los principales modelos utilizados y las principales bondades de ellos, y finalmente se propone el empleo de uno de ellos para resolver el cálculo hidráulico del ejemplo.

#### 4.1 Descripción general de los modelos matemáticos

Un modelo matemático se define como la descripción desde el punto de vista numérico de un hecho o fenómeno del mundo real, desde el tamaño de una población, hasta fenómenos físicos como la velocidad, aceleración o densidad. El objetivo del modelo matemático es entender ampliamente el fenómeno y tal vez predecir su comportamiento en el futuro.

Un modelo matemático no es exacto pues se encuentra con problemas de la vida real, de hecho, se trata de una idealización de eventos pasados, presentes y futuros. Los modelos se clasifican según su tipo de acuerdo a como sigue:

- ✓ *Modelos empíricos.* Generalmente utilizan fórmulas lineales para relacionar las variables independientes con las dependientes que se pretenden simular.
- ✓ *Modelos conceptuales.* Representan mediante formulas o algoritmos matemáticos los procesos físicos de la naturaleza.
- ✓ *Modelos estocásticos:* Utilizan relaciones o correlaciones estadísticas entre las variables dependientes y las independientes.
- ✓ *Modelo de optimización:* Se utilizan en diversas ramas de la ingeniería para resolver problemas que por su naturaleza son indeterminados. Para definir cual de las múltiples opciones utilizar se hace con el auxilio de la función objetivo, la cual tiene generalmente un carácter económico. Los algoritmos mas usados para definir las funciones objetivo son la programación lineal y la

programación dinámica. Cada programa tiene un enfoque específico en la rama y características propias para su fácil manejo; sin embargo, todos ellos parten de bases matemáticas y postulados de varios autores expertos de la disciplina.

La modelación matemática en flujo de agua en un río, consiste en intentar conocer los valores que toman las variables hidráulicas (elevación de la lámina de agua, caudal, velocidad, etcétera) esto a partir de la solución por métodos numéricos de ecuaciones obtenidas por una serie de hipótesis.

#### **4.2 Programas de cómputo empleados en la elaboración de modelos matemáticos**

Actualmente, existen una diversidad de programas computacionales que basados en métodos numéricos son utilizados para elaborar modelos matemáticos que permiten conocer el comportamiento hidráulico del flujo a superficie libre, bajo diferentes escenarios: sobre cauces sin ramificaciones, cauces ramificados con llanuras de inundación, cauces con estructuras de control, y la combinación de los diferentes escenarios mencionados, lo que incrementa su complejidad. Comercialmente, algunos de estos programas más utilizados en la actualidad reciben los siguientes nombres, respectivamente: ISIS FLOW, INFO WORKS, MIKE 21, MIKE 11, SOBEK, DAMBRK, HEC RAS, todos estos permiten modelar flujo de agua a superficie libre, con diferentes ventajas y desventajas unos de otros. Las características principales de cada uno de ellos se mencionan en los siguientes párrafos.

Un modelo unidimensional para régimen permanente y no permanente, es el ISIS FLOW de HR Wallingford. Éste programa resuelve el problema de flujo a superficie libre mediante las ecuaciones de Saint Venant. Su solución se basa en los métodos numéricos conocidos como Esquema de los cuatro puntos de Preissmann o bien en otro denominado Pseudo-Timestepping Method.

Además de los ríos y llanuras de inundación, ISIS FLOW cuenta con unidades que permiten representar una amplia variedad de estructuras hidráulicas, entre las

que se encuentran: conductos, alcantarillas, vertedores, puentes, etcétera. Las condiciones de frontera que emplea este programa pueden ser representadas por medio de hidrogramas, limnigramas y curvas Gasto-Elevación (Q-H).

El programa MIKE 11 mantiene la unidimensionalidad de los programas anteriores; sin embargo, la complejidad de sus esquemas numéricos es mayor, por tener una serie de módulos que permiten distintas aproximaciones al fenómeno (régimen permanente, onda cinemática, onda difusiva, etc) además de tener la capacidad de modelar secciones compuestas y llanuras de inundación mediante células de almacenaje, así como presas, pasos bajo vías y otras estructuras. Junto al módulo hidrodinámico se pueden utilizar otros módulos para el estudio de transporte de sedimentos y de calidad de aguas. MIKE 11 permite realizar la entrada de datos a partir de programas que utilizan Sistemas de Información Geográfica (GIS) y exportar los resultados hacia ellos.

El modelo de MIKE 21 de Danish Hydraulics Institute, con un módulo hidrodinámico utiliza un esquema numérico del tipo ADI (Alternate Direction Implicit) para resolver las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales (y limitado por consiguiente a la modelación de flujo en régimen lento), que puede considerar, a parte de la pendiente del fondo y las fuerzas de fricción, el efecto de fuerzas como el viento, la fuerza de Coriolis, corrientes inducidas por el oleaje y la evapotranspiración. A parte del módulo básico hidrodinámico consta también de módulos para transporte de arena, material sólido cohesivo, transporte de contaminantes, calidad de aguas, eutrofización y polución por materiales pesados.

El Modelo MIKE FLOW es una integración de los modelos MIKE 11 y MIKE 21, sin embargo las bases matemáticas son las mismas de cada uno.

SOBEK de Delft Hydraulics, para ríos, canales y lagunas, también permite la aproximación en régimen permanente o régimen variable y dispone de módulos adicionales para el estudio de calidad de aguas, intrusiones salinas, transporte de sedimentos y cambios morfológicos en ríos y estuarios.

Otro modelo unidimensional en régimen variable es el DAMBRK, de Boss International, orientado al estudio de la formación y propagación de ondas de rotura de presas, con capacidades para modelar desbordamientos.

Finalmente, la familia de modelos que representa sin duda los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión, son aquellos que permiten estudiar cauces fluviales mediante la aproximación unidimensional y régimen gradualmente variado. Entre ellos destacan los modelos del Hydraulic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers, modelos HEC-2 y HEC-RAS, junto con el modelo WSPRO del U.S. Federal Highway Administration.

Estos modelos han evolucionado con el tiempo y aumentado su capacidad, de manera que permiten representar ríos con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, pasos bajo vías, uniones, etc., poseen cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados que permiten comparar las distintas hipótesis de su funcionamiento.

Su limitación más importante es que son modelos para simular el flujo en régimen permanente y unidimensional. Sin embargo, a pesar de ello, representan una simplificación importante del fenómeno de propagación de una avenida y pueden proporcionar una aproximación suficientemente adecuada para predecir niveles de agua y por ello son ampliamente utilizados en ingeniería.

Recientemente, el U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center ha incorporado el modelo UNET, para flujo unidimensional, que utiliza un esquema en diferencias finitas implícitas de los cuatro puntos, en el conocido paquete HEC-RAS. Como este tipo de modelos se basan en resolver las ecuaciones de Saint Venant, lo que en algunos casos, como es la formación de discontinuidades, puede ser complejo, su uso debe hacerse con cuidado, ya que aunque el modelo arroje una solución, el usuario debe asegurarse hasta que punto esta solución es acorde con la realidad.

### **4.3 Selección del programa de cómputo**

De acuerdo con las principales características de los programas mencionados en el subcapítulo anterior, los programas mas apropiados para simular flujo a superficie libre en redes de ríos o canales con llanuras de inundación, son los de la familia HR Wallingford y los de la familia HEC; sin embargo, un factor determinante para decidir sobre su empleo en el presente trabajo, es el costo que representa su adquisición; es decir, mientras que la adquisición de los programas ISIS FLOW e INFO WORKS es altamente costosa, los programas de la familia HEC, en específico HEC RAS es de uso libre, con la reserva de que los resultados obtenidos en una modelación son responsabilidad total y única del modelador, por lo que su uso requiere una amplia experiencia en modelación de flujo a superficie libre y bastos conocimientos de hidrología e hidráulica.

De acuerdo con lo anterior, para el desarrollo del presente trabajo de tesis, se optó por utilizar el programa HEC RAS en su versión mas actualizada, el cual permitirá conocer el comportamiento hidráulico integral del flujo en la zona agropecuaria que se desea rescatar de las inundaciones.

Una vez seleccionado el programa, se consideró necesario abundar más sobre el programa HEC RAS, sus ecuaciones, métodos de cálculo, etc. de tal manera que al lector de la presente tesis, le sea de mayor facilidad su comprensión e interpretación de los resultados mostrados en el capítulo 5.

### **4.4 Descripción particular del programa seleccionado**

Este programa fue desarrollado para calcular perfiles para flujos permanentes, gradualmente variados en canales prismáticos y no prismáticos. Permite estimar perfiles subcríticos y supercríticos, y considera los efectos de varias obstrucciones como puentes, alcantarillas, vertedores o cualquier tipo de estructuras hidráulicas.

Su procedimiento de cálculo esta basado en la solución unidireccional de la Ecuación de la Energía, la energía que se pierde se evalúa por la fricción, expansión y contracción. También utiliza la Ecuación de Momento, en situaciones donde la superficie libre del agua de un perfil varía rápidamente.

El modelo está sujeto a cuatro suposiciones:

1. Dado que las ecuaciones no contienen términos dependientes del tiempo, el flujo debe ser permanente.
2. El flujo debe ser gradualmente variado dado que las ecuaciones del modelo suponen una distribución hidrostática de presiones.
3. El flujo es unidimensional.
4. La pendiente debe ser pequeña.

El modelo del HEC RAS es esencialmente un esquema de cómputo automático, ya que resuelve la ecuación de continuidad de forma iterativa.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecuación 1}$$

$$h_e = LS_f + c \left| \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 2}$$

$$L = \frac{\sum L_i K_i}{\sum K_i} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$Y_1, Y_2$  Profundidad del agua en la sección transversal.

$Z_1, Z_2$  Elevación del fondo del cauce en la sección.

$V_1, V_2$  Velocidad Promedio.

$\alpha_1, \alpha_2$  Coeficiente de la velocidad.

$g$  Aceleración de la gravedad.

$h_e$  Perdida de energía.

$S_f$	Pendiente de fricción representativa del tramo.
$L$	Longitud pesada en el gasto definida por la <b>Ecuación 3</b> .
$L_i$	Longitud de subsección.
$c$	Coefficiente de pérdida de expansión y contracción.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Si los cálculos se dirigen hacia aguas arriba, se supone que se dispone de todos los datos para el cálculo de las variables en la **Ecuación 1** y la **Ecuación 3** con el subíndice de 1
2. Se supone la elevación de la superficie del agua en la estación 2.
3. Basándose en el punto anterior, se determinan el factor de forma y carga de velocidad correspondientes.
4. Con los valores obtenidos en el paso anterior, se determinan  $S_f$  y se resuelve la **Ecuación 2** para  $h_e$ .
5. Se calcula  $Z_2$  a partir de los valores encontrados en los pasos 3 y 4 con la **Ecuación 1**
6. El valor de  $Z_2$  calculado en el paso anterior, se compara con el supuesto en el paso 2. Se repiten los pasos 2 al 5 hasta que los valores supuestos y calculados de  $Z_2$  concuerdan dentro de una extensión de 0.01 m o menor.

El mecanismo de funcionamiento del software se divide en tres partes esenciales, la primera es la introducción de información de campo con los formatos predefinidos por el mismo programa; la segunda, es establecer los parámetros característicos de la geometría introducida al modelo tales como coeficientes y características de la fisiografía de la zona de estudio, y colocar los parámetros de condiciones iniciales y fronteras del sistema que son los gastos de entrada, niveles de entrada y salida etc. y la tercera parte es "*correr el modelo*" con el o los

escenarios propuestos y calibrarlos conforme se obtengan los resultados, hasta lograr los resultados esperados, los cuales deben estar conformes con la realidad de la región en estudio.

En el capítulo 5 (Diseño de una red de drenaje superficial) se desarrolló un ejemplo de la aplicación de este software, en este se describe detalladamente el armado del modelo, sus simulaciones y los resultados obtenidos de los diferentes escenarios modelados.

## **CAPÍTULO 5**

### **DISEÑO DE UNA RED DE DRENAJE SUPERFICIAL**

Como ejemplo de aplicación de lo expuesto en los capítulos anteriores en este capítulo se muestra el diseño de una red de drenaje. Los datos obtenidos son de fuentes reales otros supuestos, pero aproximados a los reales fin de obtener resultados congruentes con las características del mismo ejemplo.

#### **5.1 Generalidades.**

En la República Mexicana existe una amplia gama de regiones donde es posible aplicar los conocimientos de hidrología e hidráulica, particularmente con el objeto de prevenir o rescatar del fenómeno de las inundaciones a importantes zonas urbanas, industriales, agrícolas y ganaderas; sin embargo, la aplicación sólo analítica de estas disciplinas de la ingeniería, en ocasiones subestima o sobreestima el tamaño de las obras destinadas a lograr dicho objetivo de protección, por lo que los diferentes niveles de gobierno, tanto municipal, estatal como federal, se forman una interrogante antes de generar programas de inversión destinados a la construcción de obras hidráulicas que tienen por objeto principal la protección contra este fenómeno.

Es por ello que surge la necesidad de desarrollar estudios mas detallados, apoyados en tecnología que además de aplicar los conocimientos científicos de las disciplinas de la ingeniería (hidrología e hidráulica) simulen de forma integral el funcionamiento hidráulico de toda una región, con el fin de conocer de forma simultanea el comportamiento del flujo en los cauces que conforman una cuenca, así como su llanura de inundación.

A raíz de lo anterior, se planteó la conveniencia de aplicar los conocimientos descritos en los capítulos anteriores en un caso específico, donde se pretenden rescatar del fenómeno de las inundaciones a importantes zonas productivas, de los sectores agrícola y ganadero, lo cual traerá beneficios importantes en la región, al

incrementar los índices de producción y minimizar los conflictos sociales que se generan ante la ocurrencia de una inundación.

Una de las regiones del país, donde frecuentemente se generan inundaciones, es la región sureste, en los estados de Veracruz, Tabasco, Yucatán, etc. esto a raíz de que en esta zona comúnmente llueve 9 de los 12 meses del año y la topografía de estas zonas esta compuesta por grandes extensiones de planicie y pocas áreas de relieve pronunciado. Es por ello que para la aplicación del método se eligió el estado de Tabasco, sin dejar de mencionar que esta metodología puede ser transportada a otras regiones del país, donde se esté sujeto al fenómeno de inundaciones y existan zonas que se deseen prevenir o rescatar de la acción de este concepto.

## **5.2 Descripción de la zona en estudio.**

La zona de estudio se ubica en la región sureste de la República Mexicana en el estado de Tabasco, en el municipio de Centro. Las coordenadas geográficas entre las cuales se encuentra son: 18°01'15.40" de latitud norte y 92°51'19.08" de longitud oeste, y 17°53'17.75" de latitud norte y 92°50'55.49" de longitud oeste, ver Figura 5.1



Figura 5.1 Localización de la región sureste y el estado de Tabasco dentro de la República Mexicana, y la zona de estudio en el estado. (Fuente CENAPRED)

El área de estudio comprende una superficie de aproximadamente 20 500 Ha, cuyos límites son; al norte y este con la carretera Villahermosa-Escárcega, al sur con la carretera Playas del Rosario-Jonuta, al oeste con el río La Sierra, el río Grijalva y La ciudad de Villahermosa.

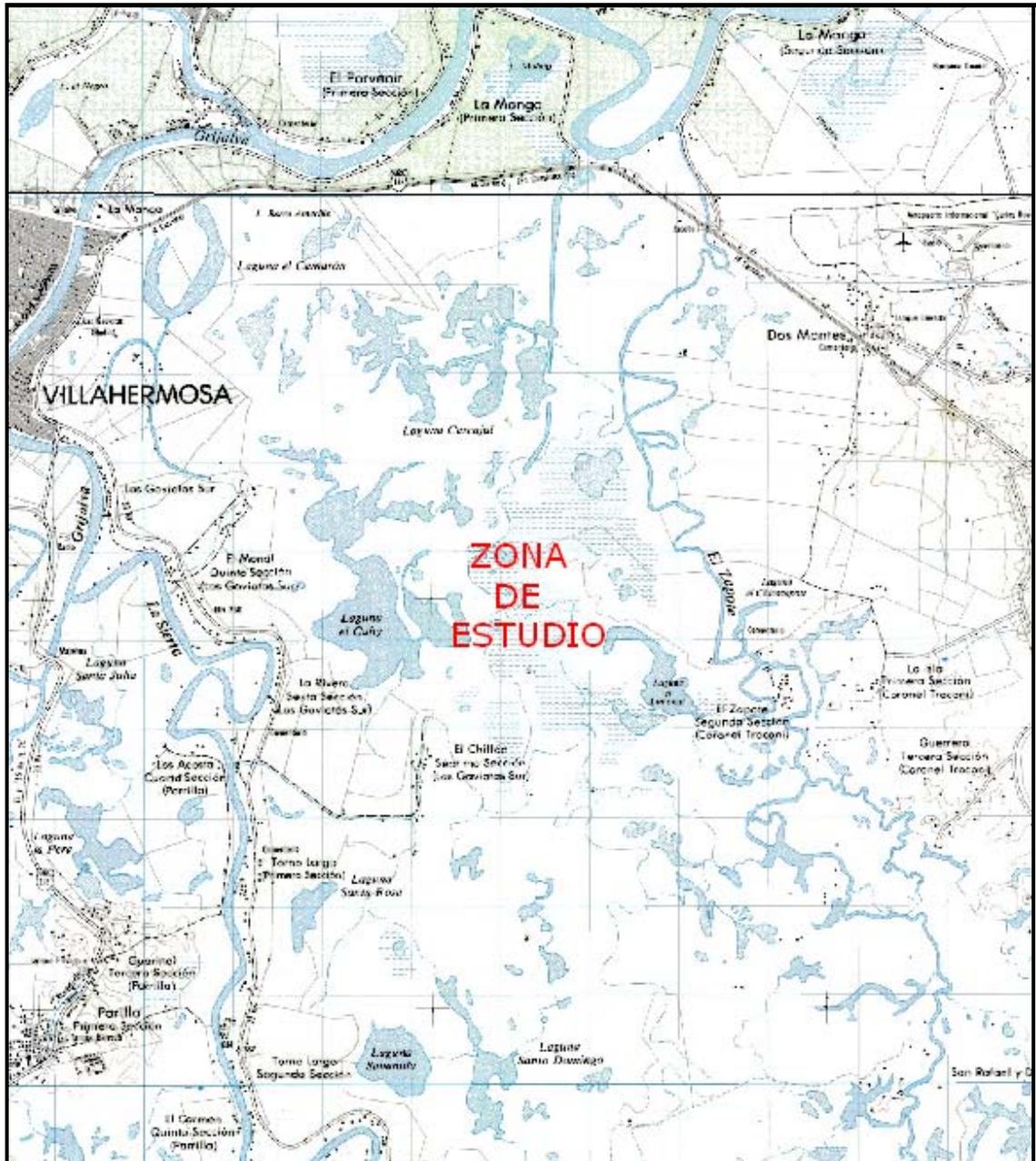


Figura 5.2 Límites de la zona de estudio. (Fuente INEGI)

### 5.2.1 Fisiografía

La zona en estudio se sitúa en la provincia denominada "Llanura Costera del Golfo" de México, en la subprovincia de las "Llanuras y pantanos Tabasqueños": La planicie aluvial de Tabasco, se formó durante el cuaternario reciente debido a los procesos de intemperismo físico y químico que sufrieron los estratos del terciario que conforman las sierras del Norte de Chiapas y sur de Tabasco.

Los terrenos del área presentan una topografía plana, ligeramente inclinada hacia el Golfo de México, con pendientes de 0.02 al 0.1% las geoformas que se presentan en la zona son las siguientes:

Planicero llanuras, los cuales ocupan la mayor parte de la superficie, estos se caracterizan por sus relieves muy planos o ligeramente cóncavos con pendientes menores al 0.1%.

Depresiones, existen dentro del área de estudio que se caracterizan por su relieve cóncavo, con 1 al 2% de pendiente, que convierte a éstas en zonas receptoras de los escurrimientos superficiales de los terrenos circundantes, en las fotografías siguientes se pueden observar ejemplos claros de estas características, los cuales corresponden al área en estudio.



Foto 5.1 Llanura tipo de la zona de estudio, donde se puede observar los relieves ligeramente cóncavos.



Foto 5.2 En la mayor parte de la zona de estudio se localizaron pequeñas depresiones que captan el agua producto de la lluvia local y del desbordamiento de los cauces.

## 5.2.2 Hidrografía.

La zona de estudio corresponde a la región hidrológica No. 30 denominada Grijalva-Usumacinta (véase Figura 5.3), en la cuenca del Río Grijalva y a su vez en la subcuencas de los ríos La Sierra y El Zapote, toda está compuesta por una serie de cuerpos de agua y corrientes superficiales que drenan de manera natural, aunque un poco lenta, los escurrimientos hacia los cauces mencionados.



Figura 5.3 Distribución actual de las regiones hidrológicas en el país (fuente CONAGUA).

Además de las corrientes señaladas, en la zona del proyecto se localizan importantes cuerpos de agua, que como se ha indicado, colectan los escurrimientos producidos en su propia cuenca, así como los que son derivados de manera natural de los ríos La Sierra y Grijalva; entre los cuerpos de agua que pueden considerarse permanentes destacan: los denominados: laguna El Camarón, El Cascajal, El Cuhy, El Chicozapote, El Limonar, Santa Rosa, Sabanilla y Santo Domingo. Existen otros cuerpos lagunares que por su configuración topográfica no pueden considerarse como permanentes, dado que una época del año se mantienen en completa sequía.

### **5.2.3 Flora y fauna.**

En la región predomina el sector pecuario, enfocada a la explotación de ganado bovino para carne y en muy pequeña escala para producción de leche. Existen también importantes sembradíos de maíz, los cuales pudieran ser notablemente incrementados si la región se mantuviera en seca por más tiempo, objetivo que se persigue con la implantación del presente estudio. En las fotografías siguientes se muestran algunos ejemplos de la flora y la fauna encontrada en el lugar.



Foto 5.4 A lo largo de toda la zona de estudio se localizaron pequeñas porciones de ganado.



Foto 5.4 Cultivo de maíz ubicado en la margen derecha del río El Zapote I.



Foto 5.5 Cultivo de maíz, localizado en las inmediaciones de la planicie. Zona naturalmente inundable que puede ser aprovechada durante una mayor parte del año, toda vez que se tenga un sistema de drenaje adecuado.

La vegetación predominante de la zona de estudio está formada por árboles de mediana altura, perennifolia y comunidades de vegetación acuática. Cerca de los cauces principales se localiza vegetación arbórea de altura entre 5 y 15 m. Además se observó la existencia de pastizales que es la vegetación más utilizada para la alimentación del ganado.



Foto 5.6 En las inmediaciones a los cauces o cuerpos lagunares se localizan árboles de gran tamaño, en algunos casos estos árboles al secarse por acción de plagas caen a los cauces y provocan la obstrucción parcial o total de éstos.



Foto 5.7 Vegetación predominante en la zona de estudio formada por selva mediana, perennifolia y vegetación acuática.

Sin embargo, muchas áreas son zonas improductivas debido al latente desbordamiento de los cauces y lagunas que invaden los espacios que pueden ser aprovechados para producción agrícola y ganadera.

### 5.3 Comportamiento hidráulico conceptual de la zona de estudio.

El sistema de drenes de la zona Lagunar “Los Zapotes” está conformada por una red de cauces que generalmente se interconectan entre si y forman un sistema complejo cuyo funcionamiento hidráulico varía en función de los gastos derivados del río La Sierra -ubicado al poniente de esta zona lagunar- de los niveles que llegan a presentarse en el río Grijalva -localizado al norte de la misma- y de los gastos que se generan por cuenca propia, ya que al conjugarse estas tres condiciones, el sistema lagunar se convierte en una serie de cauces y lagunas de gran tamaño, que incluso llega a transformarse en una inmensa laguna que ocupa casi en su totalidad el área de influencia.

Asimismo, en su mayoría el sistema de drenes se encuentra obstruido por una gran cantidad de material vegetal, lo que produce pequeños diques que provocan fácilmente el desbordamiento de los cauces. O bien, en algunos cauces existen obstrucciones provocadas por obras de cruce vehicular que bloquean el flujo y producen remansos y desbordamientos hacia la planicie, lo que genera a su vez, la inundación de las llanuras. En las fotografías siguientes se aprecia gráficamente la situación típica de algunos cauces existentes en la región.



Foto 5.8 En muchas zonas el cauce se encuentra obstruido por árboles, lo que provoca su desbordamiento.



Foto 5.9 Para el tránsito vehicular interno entre los terrenos productivos se construyen terraplenes transversales a los cauces, lo que ocasiona la obstrucción total del mismo y a su vez, provoca remansos y desbordamientos de los escurrimientos hacia las llanuras, convirtiéndolas en zonas inundada.

Por otra parte, en la zona existen depresiones topográficas que no tienen conexión con ningún cauce, por el contrario, al desbordar los cauces el agua se dirige hacia éstas y provoca su llenado e inundación.



Foto 5.10 Dentro de las inmediaciones del área de estudio se encuentran un sinnúmero de zonas bajas susceptibles de inundarse, siendo más latente las zonas que se encuentra cerca de los cauces y más aún, si éstos se encuentran obstruidos.

Con base en la información descrita anteriormente, actualmente la zona de los Zapotes se encuentra constantemente inundada, debido a varios escenarios:

1. Los cuerpos lagunares crecen considerablemente en temporada de lluvias ya que la pendiente general de toda la zona es poca por lo que al incrementarse el nivel en los ríos que rodean a la zona (Grijalva y La Sierra), el agua empieza a entrar hacia ésta y provoca su inundación paulatina, pero uniforme.
2. Al incrementar el nivel del agua en la zona lagunar, se aumenta considerablemente el tamaño de las lagunas existentes y provoca una disminución de la capacidad de conducción de los cauces, que a su vez, estos se desbordan hacia áreas de lagunas no permanentes o llanuras que normalmente son utilizadas como zonas productivas.
3. En la desembocadura de los cauces principales El Zapote I y El Zapote II hacia al río Grijalva, los niveles que se presentan en este último, controlan la descarga de las aguas que provienen de la zona lagunar de Los Zapotes.
4. El río de La Sierra vierte una cantidad importante de agua hacia el interior de la zona de estudio, lo que incrementa considerablemente el riesgo de inundación, por lo que es necesario la construcción de un sistema de drenaje, diseñado de tal manera que esta agua sea desalojada de forma directa hacia el río Grijalva, a través de los drenes principales Zapotes I y Zapotes II.
5. En resumen, la zona de estudio ha sufrido desde siempre el embate de las inundaciones, motivado fundamentalmente por:
  - La reducida capacidad de los cauces, originada por limitaciones físicas de área, mínima pendiente longitudinal o por la depositación de sedimento en las confluencias.
  - Por ocurrencia de lluvia excesivas, que provocan desbordamientos de los cauces.
  - Por la intervención no controlada en las cuencas altas de los ríos, que se manifiesta en la excesiva deforestación de las mismas.

- Por obstrucción de los drenajes naturales, usualmente ocasionado por la construcción de viviendas, infraestructura carretera y de otros sectores.

Lo anterior trae consigo afectaciones importantes a zonas de cultivo, ganaderas y en casos más aislados a zonas de infraestructura urbana. Para definir el trazo de los drenes, en primera instancia se parte de la cartografía que emite el INEGI en escala 1:50,000 o menor, la cual servirá de base durante el desarrollo de los trabajos topográficos, de los cuales se obtendrá la información necesaria para la conformación del modelo matemático que simulará el comportamiento hidráulico de la zona en estudio.

#### **5.4 Información básica para la conformación del modelo matemático.**

##### **5.4.1 Información topográfica.**

Conforme a lo mencionado en el capítulo anterior, previo a desarrollar los trabajos topográficos es necesario plantear los posibles trazos de los drenes sobre cartografía editada por el INEGI, o bien, sobre la información topográfica con que se cuente. Véase Figura 5.4



- ✓ Configuración topográfica de los cauces.
- ✓ Construcción y colocación de mojoneras.
- ✓ Levantamiento batimétrico de las zonas lagunares.
- ✓ Configuración topográfica a detalle en estructuras hidráulicas existentes dentro de la zona de estudio.

#### **5.4.2 Información hidrológica**

Desde el punto de vista hidrológico, es necesario identificar la o las cuencas ubicadas en la zona de estudio y de estas conocer el gasto que cada una de ellas aportará hacia el sistema, el cual estará en función de las sus características fisiográficas. Su importancia radica en minimizar las probabilidades de sobrediseñar los cauces o bien construir cauces con capacidad insuficiente para conducir los caudales de aportación de acuerdo con el periodo de retorno de diseño.

Por lo anterior, con la información cartográfica y con el conocimiento de la zona de estudio, se dividió la cuenca en tres subcuencas contiguas, cuya aportación corresponde a tres cauces diferentes. Para verificar que el trazo de cada cuenca sea correcto, es necesario apoyarse en toda la información con que se cuente, esta puede ser cartas de INEGI, imágenes de satélite, vuelos fotogramétricos y por supuesto, en recorridos de campo. En la Figura 5.5 se pueden apreciar los trazos de cada una de las subcuencas obtenidas.

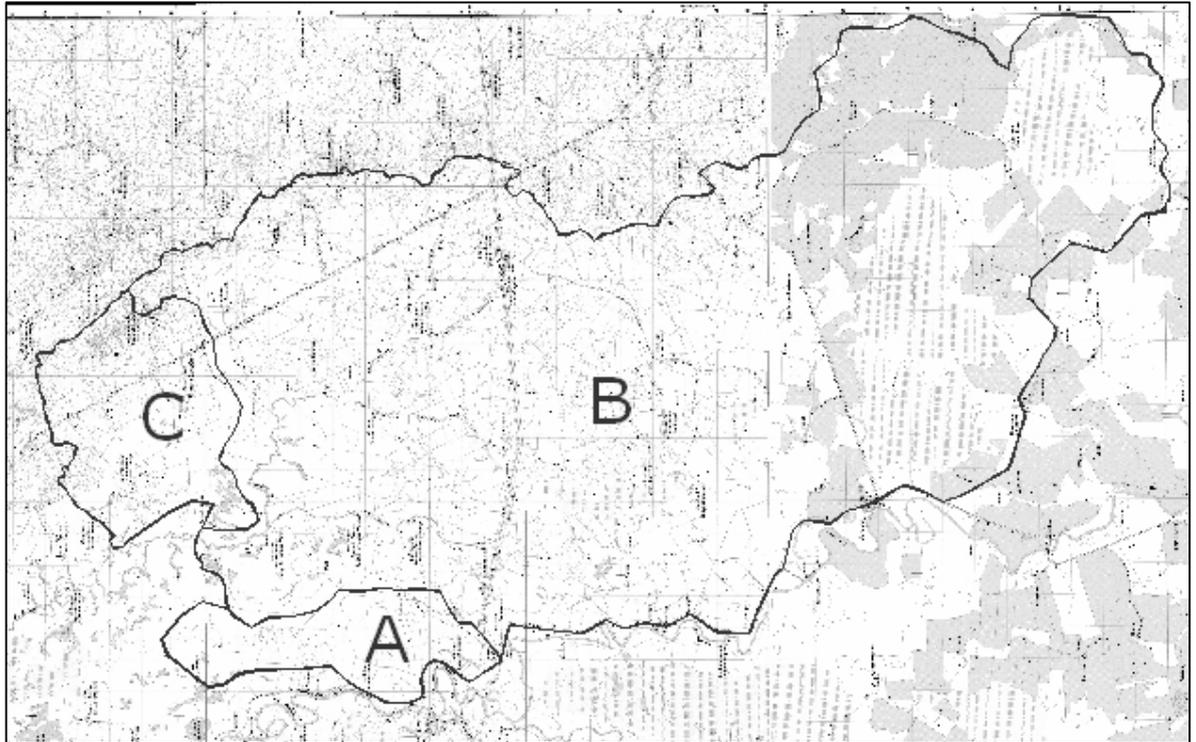


Figura 5.5 Delimitación de las subcuencas de aportación hacia el sistema de drenaje. (Fuente INEGI)

Para conocer las características fisiográficas de las cuencas mostradas en la Figura 5.5 se aplicaron las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1.2 (Características fisiográficas de una cuenca), los resultados se muestran en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 Características fisiográficas de las cuencas de estudio

Cuenca	Coefficiente de compacidad $K_c$	Factor de Forma $K_f$	Relación de circularidad $K_{ci}$	Pendiente del cauce principal $S_m$	Forma de la cuenca
A	1.5433	0.0269	0.4198	0.0003034	Alargada
B	1.5741	0.4807	0.4036	0.0003158	Alargada
C	1.3645	0.5204	0.5371	0.0006164	Circular

Una vez conocidas las características fisiográficas de las cuencas, es necesario conocer la intensidad de lluvia que ocurre en cada una de ellas, así como el gasto de aportación de las mismas hacia el interior del sistema de drenaje que se desea modelar. Para ello se plantea en los siguientes capítulos el uso de las metodologías propuestas en el capítulo 2 (Lluvia y escorrentía).

### 5.4.2.1 Cálculo de la intensidad de lluvia

La región en estudio se caracteriza por su alto índice de precipitación anual, como lo muestra la Figura 5.6 Figura 5.6 editada por el INEGI.

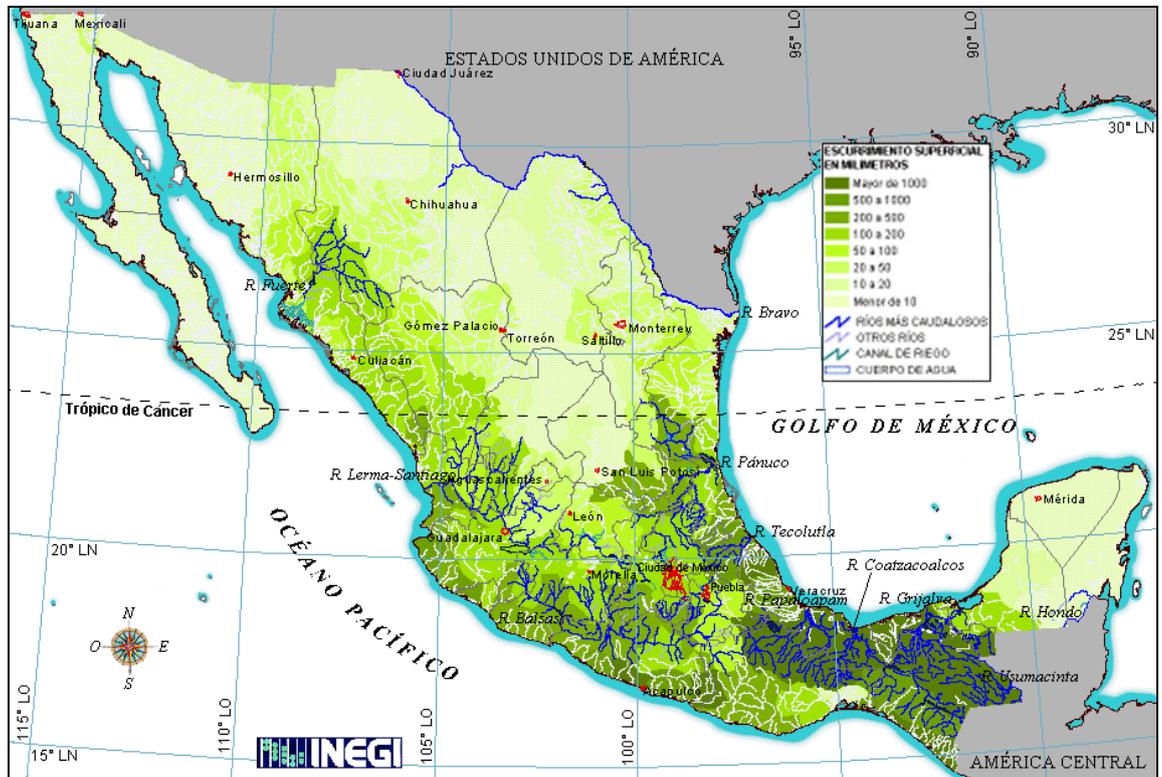


Figura 5.6 Mapa de las intensidades de lluvia promedio anual en México (Fuente INEGI)

En esta figura, se muestra el comportamiento de las precipitaciones en la República Mexicana, conforme a los registros de lluvia con que cuenta el INEGI; por la precisión mostrada en el mapa, esta información no es recomendable emplearla en cálculos hidrológicos, por lo que es necesario buscar otras fuentes de información confiables que proporcionen los valores de precipitación en la zona de estudio.

Una de estas fuentes es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la cual edita y publica mapas de intensidades de lluvia para diferentes duraciones de tormenta y diferentes periodos de retorno, véase Figura 5.7 Figura 5.7 al igual que ésta figura, se cuenta con los datos correspondientes a los periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años y duraciones de tormenta de 5, 10, 20, 30, 60, 120 y 240 minutos.

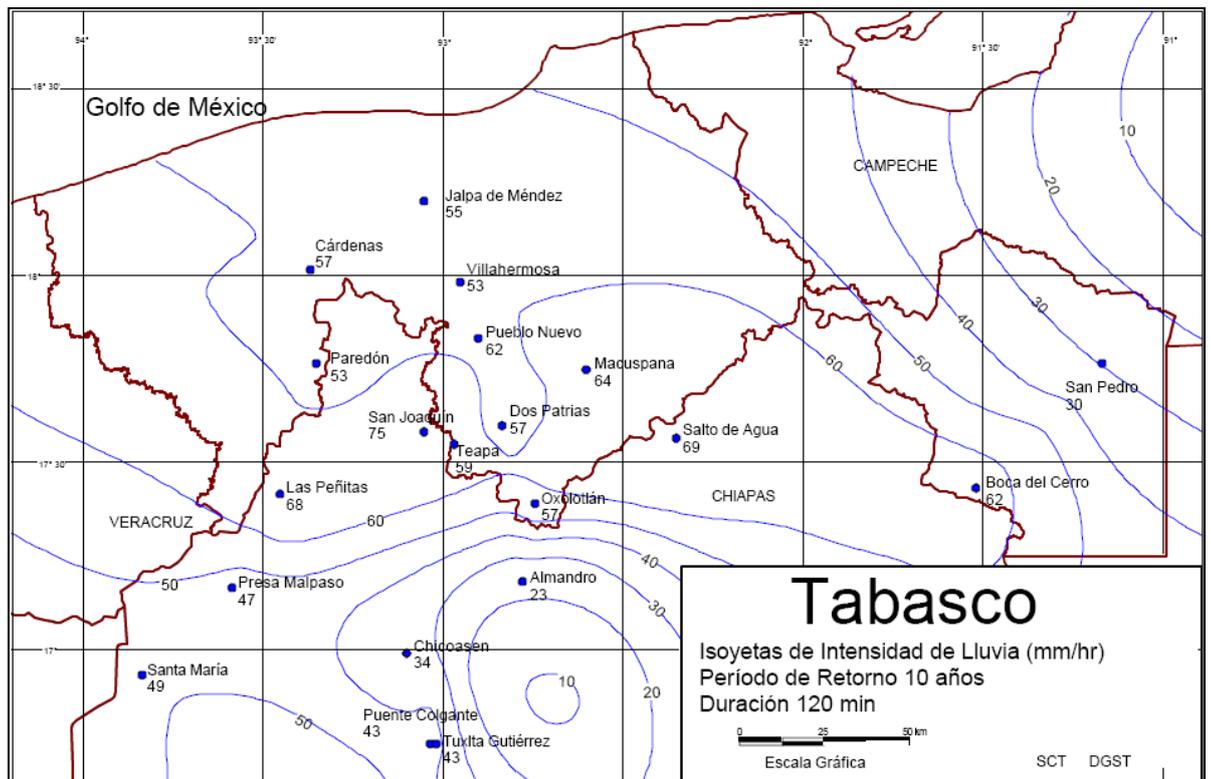


Figura 5.7 Mapas de isoyetas publicados por la SCT y utilizados en este estudio (Fuente SCT)

De acuerdo con lo establecido en la Ley de Aguas Nacionales y los criterios empleados por autores reconocidos en el ramo de la ingeniería hidráulica<sup>1</sup>, en obras de protección contra inundaciones a zonas productivas, agrícolas y ganaderas, el periodo de retorno recomendado para el diseño es de 5 años. Sin embargo, nótese que en los datos mencionados en el párrafo anterior, no se encuentra un periodo de retorno de 5 años, por lo que para obtener su información correspondiente se deberán emplear métodos estadísticos que permitan su obtención.

Los datos de las curvas de isoyetas no se emplearon directamente, puesto que por su tamaño son afectadas por dos o más curvas isoyetas con diferente intensidad de precipitación, por lo que se realizó un análisis estadístico que las promedia y pondera para toda la superficie de dicha cuenca en estudio.

<sup>1</sup> Obras de Protección Contra Inundaciones, Instituto de Ingeniería de la UNAM. Maza Álvarez, J.A.

Para determinar el valor correspondiente a la intensidad de precipitación de cada uno de los escenarios propuestos (duración de lluvia/periodo de retorno), se sobreponen los parteaguas de la cuenca en los mapas de isoyetas y se obtienen los valores aplicables en las ecuaciones mencionadas en el capítulo 2 (Lluvia y escorrentía), referentes a los métodos “Polígonos de Thiessen”, “de las Isoyetas” y “de la Media aritmética”. En la tabla siguiente se muestran los valores obtenidos de cada uno de estos métodos, correspondiente a cada periodo de retorno y cada duración de tormenta.

Tabla 5.2 Precipitación media obtenida para la cuenca A

RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS				
CUENCA A		Precipitación Media mm/h		
TR	Duración	Polígonos de Thiessen	Método de las Isoyetas	Media Aritmética
10	5	243.00	225.00	221.40
10	10.00	193.00	165.61	172.68
10	20.00	150.00	150.00	139.39
10	30.00	131.00	130.00	121.23
10	60.00	96.00	90.00	89.41
10	120.00	62.00	60.00	60.93
10	240.00	36.00	35.00	37.96
20	5.00	271.00	249.46	243.70
20	10.00	215.00	180.00	189.34
20	20.00	167.00	170.00	153.06
20	30.00	147.00	150.00	133.30
20	60.00	109.00	110.00	99.25
20	120.00	71.00	65.09	68.18
20	240.00	42.00	40.00	42.99
25	5.00	280.00	275.00	250.92
25	10.00	222.00	195.00	194.36
25	20.00	173.00	165.00	157.46
25	30.00	152.00	150.00	137.11
25	60.00	113.00	110.00	102.32
25	120.00	74.00	70.00	70.82
25	240.00	44.00	40.00	44.33
50	5.00	308.00	270.00	271.99
50	10.00	244.00	220.00	209.74
50	20.00	190.00	195.00	170.31
50	30.00	167.00	165.00	148.63
50	60.00	125.00	129.35	111.33
50	120.00	82.00	85.00	77.35
50	240.00	49.00	50.00	49.00
100	5.00	335.00	330.00	291.96
100	10.00	266.00	260.00	225.33
100	20.00	207.00	206.78	182.92
100	30.00	183.00	180.00	159.64
100	60.00	137.00	130.00	120.28
100	120.00	91.00	90.00	84.08
100	240.00	54.00	50.00	53.32

Tabla 5.3 Precipitación media obtenida para la cuenca B

RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS				
CUENCA B		Precipitación Media mm/h		
TR	Duración	Poligonos de Thiessen	Método de las Isoyetas	Media Aritmetica
10	5	229.31	215.64	221.40
10	10.00	178.77	170.23	172.68
10	20.00	141.23	145.82	139.39
10	30.00	123.09	124.78	121.23
10	60.00	90.41	90.78	89.41
10	120.00	60.87	57.64	60.93
10	240.00	37.33	39.20	37.96
20.00	5.00	253.39	236.02	243.70
20.00	10.00	197.09	188.37	189.34
20.00	20.00	155.73	161.39	153.06
20.00	30.00	136.35	141.26	133.30
20.00	60.00	101.21	103.51	99.25
20.00	120.00	68.65	67.08	68.18
20.00	240.00	42.67	46.56	42.99
25.00	5.00	261.17	247.11	250.92
25.00	10.00	202.72	189.53	194.36
25.00	20.00	160.63	164.07	157.46
25.00	30.00	140.53	142.48	137.11
25.00	60.00	104.51	106.52	102.32
25.00	120.00	71.38	80.00	70.82
25.00	240.00	44.27	47.89	44.33
50.00	5.00	284.43	266.43	271.99
50.00	10.00	220.37	207.75	209.74
50.00	20.00	174.74	178.54	170.31
50.00	30.00	153.03	156.77	148.63
50.00	60.00	114.43	117.73	111.33
50.00	120.00	78.28	81.52	77.35
50.00	240.00	49.00	53.84	49.00
100.00	5.00	306.69	288.98	291.96
100.00	10.00	238.14	226.80	225.33
100.00	20.00	188.68	195.10	182.92
100.00	30.00	165.74	167.65	159.64
100.00	60.00	124.36	124.34	120.28
100.00	120.00	85.64	87.88	84.08
100.00	240.00	53.45	62.67	53.32

Tabla 5.4 Precipitación media obtenida para la cuenca C

RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS				
CUENCA C		Precipitación Media mm/h		
TR	Duración	Poligonos de Thiessen	Método de las Isoyetas	Media Aritmetica
10	5	243.00	225.00	221.40
10.00	10.00	145.00	180.00	172.68
10.00	20.00	150.00	149.26	139.39
10.00	30.00	131.00	128.75	121.23
10.00	60.00	96.00	90.00	89.41
10.00	120.00	62.00	55.04	60.93
10.00	240.00	36.00	35.00	37.96
20.00	5.00	271.00	275.00	243.70
20.00	10.00	215.00	195.00	189.34
20.00	20.00	167.00	150.07	153.06
20.00	30.00	147.00	132.54	133.30
20.00	60.00	109.00	98.93	99.25
20.00	120.00	71.00	65.00	68.18
20.00	240.00	42.00	40.00	42.99
25.00	5.00	280.00	275.00	250.92
25.00	10.00	222.00	195.00	194.36
25.00	20.00	173.00	164.09	157.46
25.00	30.00	152.00	140.69	137.11
25.00	60.00	113.00	105.20	102.32
25.00	120.00	74.00	70.00	70.82
25.00	240.00	44.00	43.72	44.33
50.00	5.00	308.00	270.00	271.99
50.00	10.00	244.00	220.00	209.74
50.00	20.00	190.00	165.28	170.31
50.00	30.00	167.00	156.54	148.63
50.00	60.00	125.00	109.97	111.33
50.00	120.00	82.00	82.15	77.35
50.00	240.00	49.00	45.00	49.00
100.00	5.00	335.00	330.00	291.96
100.00	10.00	266.00	237.92	225.33
100.00	20.00	207.00	180.00	182.92
100.00	30.00	183.00	168.23	159.64
100.00	60.00	137.00	130.00	120.28
100.00	120.00	91.00	86.14	84.08
100.00	240.00	54.00	50.00	53.32

Al hacer la comparativa de estos tres métodos y conforme a la técnica que cada uno utiliza, se considera conveniente emplear los resultados obtenidos con el método de las isoyetas, por ser este un valor intermedio entre los tres obtenidos; sin embargo, cualquier método es apto para ser utilizado en el presente análisis dadas las características de las cuencas en estudio, donde la precipitación es casi uniforme en toda la región.

Una vez definida la metodología y los resultados a emplear en el presente análisis hidrológico, se procede a estimar mediante métodos estadísticos el valor de la precipitación correspondiente a 5 años de periodo de retorno. Para estimar la precipitación para este periodo de retorno, es necesario emplear un ajuste logarítmico de mínimos cuadrados, con ello se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5.5 Valores de precipitación media en la cuenca A para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones de tormenta, incluye 5 años.

Duración en minutos	Periodo de retorno					
	10 años	5 años	20 años	25 años	50 años	100 años
5	225.00	195.39	249.46	275.00	270.00	330.00
10	165.61	150.00	180.00	195.00	220.00	260.00
20	150.00	109.82	170.00	175.00	195.00	206.78
30	130.00	95.69	150.00	150.00	165.00	180.00
60	90.00	65.89	110.00	110.00	129.35	130.00
90	75.82	54.26	87.04	88.71	104.30	108.84
120	60.00	48.28	65.09	70.00	85.00	90.00
180	42.83	36.88	50.97	48.69	65.29	59.61
240	35.00	29.98	40.00	40.00	50.00	50.00

Tabla 5.6 Valores de precipitación media en la cuenca B para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones de tormenta, incluye 5 años.

Duración en minutos	Periodo de retorno					
	10 años	5 años	20 años	25 años	50 años	100 años
5	229.31	206.60	253.39	261.17	284.43	306.69
10	178.77	161.18	197.09	202.72	220.37	238.14
20	141.23	120.41	155.73	160.63	174.74	188.68
30	123.09	92.89	136.35	140.53	153.03	165.74
60	90.41	67.70	101.21	104.51	114.43	124.36
90	75.46	56.49	84.43	87.30	95.54	103.85
120	60.87	49.83	68.65	71.38	78.28	85.64
180	41.68	36.59	47.46	49.32	54.37	59.61
240	37.33	32.82	42.67	44.27	49.00	53.45

Tabla 5.7 Valores de precipitación media en la cuenca C para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones de tormenta, incluye 5 años.

Duración en minutos	Periodo de retorno					
	10 años	5 años	20 años	25 años	50 años	100 años
5.000	225.000	206.566	275.000	275.000	270.000	330.000
10.000	180.000	157.385	195.000	195.000	220.000	237.923
20.000	149.259	118.632	150.074	164.086	165.280	180.000
30.000	128.752	96.678	132.537	140.687	156.536	168.232
60.000	90.000	66.475	98.932	105.202	109.974	130.000
90.000	72.521	53.173	81.966	87.601	96.063	108.068
120.000	55.043	46.250	65.000	70.000	82.152	86.136
180.000	45.021	38.920	52.500	56.859	63.576	68.068
240.000	35.000	31.589	40.000	43.719	45.000	50.000

Al graficar los valores mostrados en las tablas anteriores, es posible obtener las curvas de Intensidad-Duración-Periodo de retorno (I-D-Tr) como se muestran en las figuras siguientes:

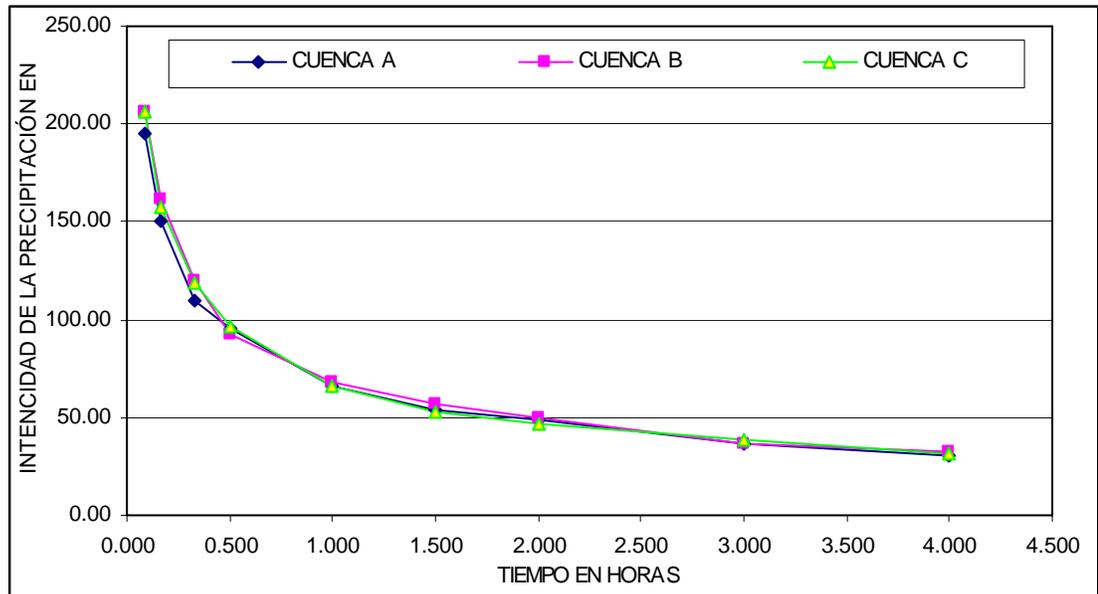


Figura 5.8 Curvas de intensidad duración para un periodo de retorno de 5 años en las cuencas A, B y C

La gráfica anterior permite obtener las intensidades de lluvia asociadas a un periodo de retorno de 5 años, ocurridas en distintas duraciones de tormenta para las tres cuencas mencionadas. Con estos valores es posible estimar el gasto de diseño; sin embargo, es necesario conocer antes el tiempo de concentración o tiempo que tarda la tormenta en trasladarse desde el punto mas alejado de la cuenca hasta su inicio, el cual servirá como frontera del modelo matemático. El tiempo de concentración se calculará, al calcular el gasto de diseño de cada cuenca.

## 5.1 Cálculo del gasto de diseño.

### 5.1.1 Cuenca A

Para el cálculo del gasto de diseño, se proponen dos de los métodos hidrológicos mencionados en el capítulo 2.2 (Cálculo de la escorrentía) *Método Racional Modificado* y *Método de Ferrer* cuyas bases de cálculo son las propiedades fisiográficas de la cuenca, los métodos propuestos se consideraron adecuados a las

características y condiciones de planicie de la cuenca en estudio. A continuación se presentan los detalles del análisis efectuado con ambos métodos propuestos.

#### 5.1.1.1 Método Racional Modificado

Con base en la denotación de la ecuación propuesta por este método:

$$q(Y) = F \cdot C(Y) \cdot i(tr, Y) \cdot A$$

El valor del coeficiente de escurrimiento  $C$  se propone en base a características físicas de la cuenca (véase Capítulo 5.2). Para el caso, se considera que para estas condiciones el valor promedio está en el rango de 0.1 a 0.40. Considerando zona con una cobertura mayor a 75 % de pastizales, donde el grado de infiltración es natural y está afectado directamente por la planicie, y la pendiente es menor al 2 % se propuso la siguiente expresión para determinar el valor de  $C$ :

$$C = 1 - (C_t + C_s + C_c)$$

En donde:  $C_t = 0.30$

$$C_s = 0.35$$

$$C_c = 0.15$$

Por lo que el valor de  $C$  resulta igual a 0.20.

Para conocer la intensidad de lluvia correspondiente a la cuenca en estudio, es necesario primero conocer su tiempo de concentración ( $tc$ ) para lo cual se utilizan las fórmulas expuestas en el capítulo 2.1 (Tiempo de concentración). Para su determinación se emplea también la información obtenida en el capítulo 5.4.2 (Información hidrológica). Para este estudio, se empleó la ecuación del método californiano, la cual se denota como sigue:

$$tc = 0.066 \left[ \frac{L}{\sqrt{J}} \right]^{0.77}$$

La información de las variables se encuentran en los capítulos indicados.

Con la ecuación anterior y con base en las características físicas de la cuenca, se obtuvo el siguiente valor correspondiente al tiempo de concentración en horas.

Tabla 5.8 Cálculo del tiempo de concentración de la cuenca A.

Nombre de la cuenca	Área, km <sup>2</sup>	Longitud, km	Desnivel, m	pendiente. (adim)	tiempo de concentración (hrs)
Cuenca A	16.52	9.89	3.00	0.0003	8.71

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior y al comparar el valor obtenido como tiempo de concentración de la cuenca contra los valores mostrados en la Figura 5.8 se observa que este valor no está contemplado dentro de las curvas de intensidad, por lo que es necesario obtener la ecuación correspondiente a dicha curva, donde el tiempo sea la única variable independiente y la intensidad sea la variable dependiente. En la figura siguiente se muestra el ajuste de la curva y su ecuación correspondiente.

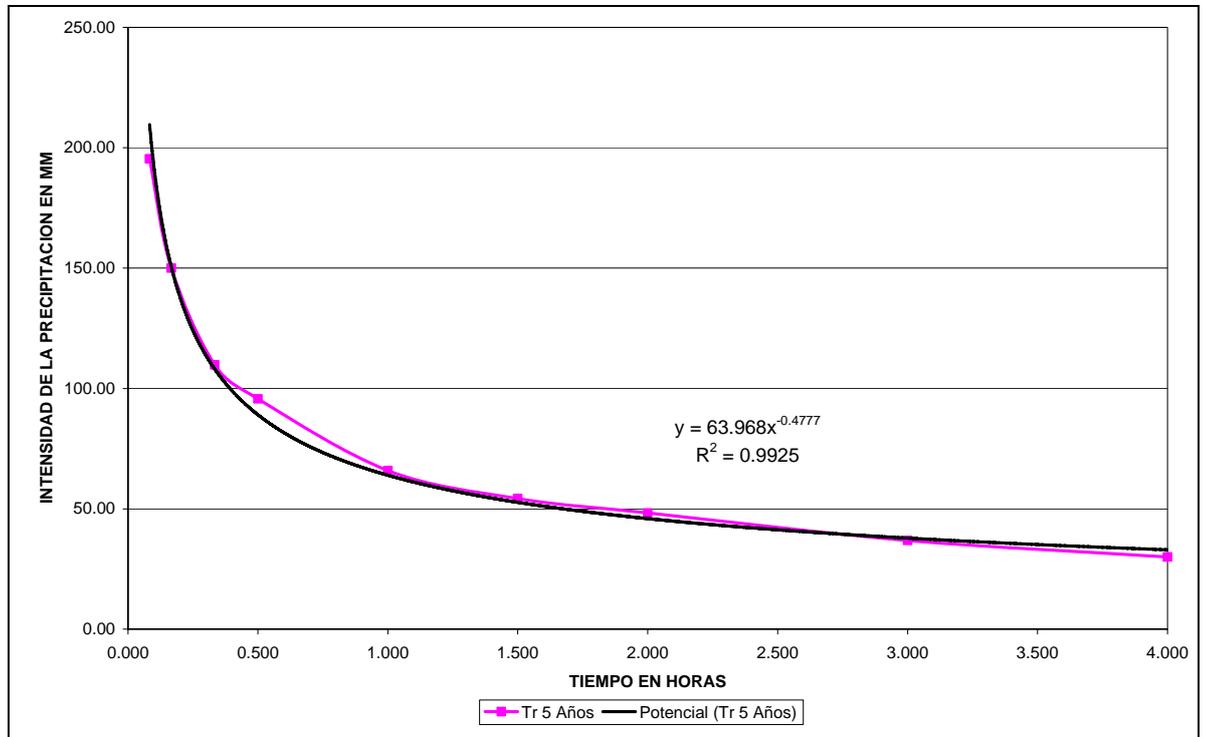


Figura 5.9 Ajuste de la curva de intensidad de lluvia asociada a un periodo de retorno de 5 años en la cuenca A.

En la ecuación potencial mostrada dentro en la Figura 5.9 el valor de “X” corresponde al tiempo de concentración obtenido con la fórmula californiana del USBR, y “Y” corresponde al valor de la intensidad de lluvia para ese tiempo de concentración. Con estos valores aplicados en esta ecuación, se obtiene el valor de 22.75 mm/hr.

Con apoyo en los resultados anteriores, al aplicar la ecuación general del Método Racional modificado, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5.9 Gasto de aportación de la cuenca A, obtenido por el Método Racional Modificado para un periodo de retorno de 5 años.

<b>DETERMINACIÓN DE GASTOS MÁXIMOS POR SUBCUENCA</b>				
<b>Método Racional Modificado</b>				
<i>Nombre de la cuenca</i>	<i>Área, km<sup>2</sup></i>	<i>intensidad, mm/hr</i>	<i>Coef. Ecurr. (adim)</i>	<i>q (m<sup>3</sup>/s)</i>
Cuenca A	16.52	22.75	0.20	<b>20.89</b>

### 5.5.1.2 Método de Ferrer

Como ya se mencionó anteriormente, este método se basa en el Método Racional, haciendo un ajuste a la precipitación por medio de un factor “K” ya que considera que la precipitación no es uniforme en el tiempo, y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

Donde:

$K$  Coeficiente uniformidad

$t_c$  Tiempo de concentración

En el cálculo del tiempo de concentración se obtuvo de la fórmula del método californiano o USBR para precipitación de 22.75 mm para el cual correspondió a un  $t_c = 8.71$  hr

Por lo que al aplicar la ecuación anterior quedaría:

$$K = 1 + \frac{(8.71)^{1.25}}{(8.71)^{1.25} + 14}$$

$$K = 1.516$$

Asimismo, antes de emplear el método, se hace un ajuste en el área de aportación de la cuenca, ya que establece que la precipitación no es uniforme geográficamente. Para realizar este ajuste se utiliza la fórmula de Temez por ser una de las más simples y se expresa de la siguiente forma:

$$A_{RF} = 1 - \frac{\log.Sup(km^2)}{15}$$

$$A_{RF} = 1 - \frac{\log.(22.78)}{15}$$

$$A_{RF} = 0.909$$

La precipitación obtenida se corregirá con este factor, por lo que quedará.

$$P_{CORR} = P * A_{RF}$$

$$P_{CORR} = 22.75 * 0.909$$

$$P_{CORR} = 20.68 \text{ mm}$$

Finalmente, al aplicar la ecuación del gasto según Ferrer, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 5.10 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años, según el método de Ferrer

Método de Ferrer						
Nombre de la cuenca	Área, km <sup>2</sup>	intensidad, mm/hr	Coef. Escurr. (adim)	A <sub>RF</sub>	K	q (m <sup>3</sup> /s)
Cuenca A	16.52	22.75	0.20	0.919	1.517	29.09

### 5.5.2 Cuenca B

Para el caso de la cuenca B, se desarrolló la misma metodología y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.11 Cálculo del tiempo de concentración de la cuenca B.

Nombre de la cuenca	Área, km <sup>2</sup>	Longitud, km	Desnivel, m	pendiente. (adim)	tiempo de concentración (hrs)
Cuenca B	373.78	31.66	10.00	0.0003	21.02

De la misma forma que en la cuenca anterior el valor de tiempo de concentración no está contemplado dentro de los valores mostrados en la Figura 5.8, por lo que es necesario recurrir a un ajuste exponencial y determinar la ecuación correspondiente a dicha curva I-D-TR, esta ecuación se muestra en la Figura 5.10.

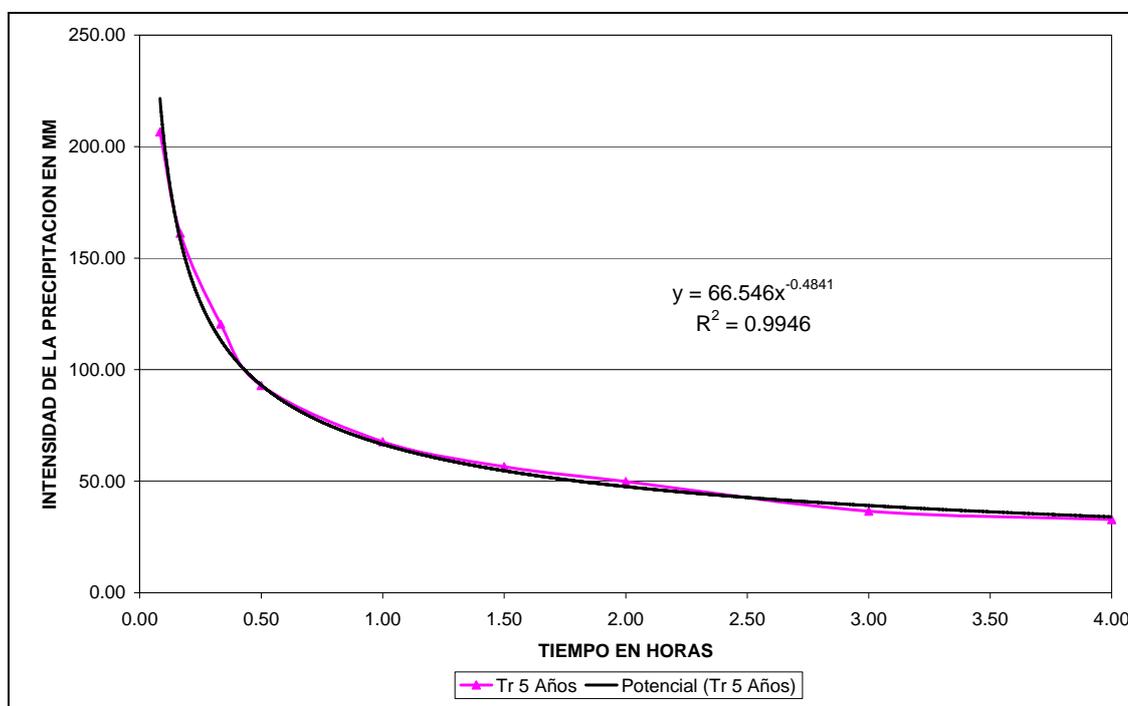


Figura 5.10 Ajuste de la curva de intensidad de lluvia asociada a un periodo de retorno de 5 años para la cuenca B.

Al aplicar el valor del tiempo de concentración correspondiente a la cuenca en estudio, se obtiene un valor de intensidad de lluvia igual a 15.23 mm/hr para la cuenca B. Con base en lo anterior, y de acuerdo con lo establecido en el Método Racional Modificado, se obtiene un valor de 304.67 m<sup>3</sup>/s de gasto de aportación de esta cuenca B, véase Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Gasto para la cuenca B obtenido por el Método Racional Modificado para un periodo de retorno de 5 años.

<b>DETERMINACIÓN DE GASTOS MÁXIMOS POR SUBCUENCA</b>				
<b>Método Racional Modificado</b>				
<i>Nombre de la cuenca</i>	<i>Área, km<sup>2</sup></i>	<i>intensidad, mm/hr</i>	<i>Coef. Ecurr. (adim)</i>	<i>q (m<sup>3</sup>/s)</i>
Cuenca B	373.78	14.66	0.20	<b>304.67</b>

De igual manera que para la cuenca A, se aplican los mismos criterios por el método de Ferrer y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años, para la cuenca B según Ferrer.

<b>Método FERRER</b>						
<i>Nombre de la cuenca</i>	<i>Área, km<sup>2</sup></i>	<i>intensidad, mm/hr</i>	<i>Coef. Ecurr. (adim)</i>	<i>A<sub>RF</sub></i>	<i>K</i>	<i>q (m<sup>3</sup>/s)</i>
Cuenca B	373.78	14.66	0.20	0.8285	1.7628	<b>444.59</b>

### 5.5.3 Cuenca C

Para el caso de la cuenca C, se aplicaron las mismas metodologías y se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 5.14 y Tabla 5.15

Tabla 5.14 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años en la cuenca, obtenido por el Método Racional Modificado.

<b>Método Racional Modificado</b>				
<i>Nombre de la cuenca</i>	<i>Área, km<sup>2</sup></i>	<i>intensidad, mm/hr</i>	<i>Coef. Ecurr. (adim)</i>	<i>q (m<sup>3</sup>/s)</i>
Cuenca C	28.70	28.01	0.20	<b>44.70</b>

Tabla 5.15 Gasto de diseño para un periodo de retorno de 5 años, para la cuenca C según Ferrer

<b>Método FERRER</b>						
<i>Nombre de la cuenca</i>	<i>Área, km<sup>2</sup></i>	<i>intensidad, mm/hr</i>	<i>Coef. Ecurr. (adim)</i>	<i>A<sub>RF</sub></i>	<i>K</i>	<i>q (m<sup>3</sup>/s)</i>
Cuenca C	28.70	28.01	0.20	0.903	1.386	<b>55.89</b>

Con los datos fisiográficos de la cuenca y los datos de precipitación que se presenta en la misma, con el método racional modificado se estimó un caudal para la cuenca A de 20.89 m<sup>3</sup>/s, para la cuenca B de 304.67 m<sup>3</sup>/s, y en la cuenca C de 44.70 m<sup>3</sup>/s

El segundo método empleado es el de Ferrer, cuya base de cálculo es el método racional, pero con los correspondientes ajustes en la precipitación, primero por tiempo y después por área, con este método se obtuvieron valores de 29.09 m<sup>3</sup>/s para la cuenca A, 444.59 m<sup>3</sup>/s para la cuenca B, y 55.89 m<sup>3</sup>/s para la cuenca C.

Conforme a los resultados estimados, y con la finalidad de no sobreestimar la geometría de los cauces por diseñar, se propone el gasto obtenido por el Método Racional Modificado para el diseño de los cauces, mismo que servirá como fronteras del modelo matemático.

## **5.6 Elaboración del modelo matemático.**

La conformación del modelo matemático, tiene dos fases de desarrollo, la primera consiste en conocer el comportamiento hidráulico de la red de ríos en condiciones naturales; es decir, sin plantear ninguna acción que mejore su funcionamiento, la segunda fase, depende de los resultados obtenidos en la primera fase, pues con base en ellos, se plantearán las acciones de mejora del sistema, que resultarán en obras de rectificación de cauces existentes o construcción de drenes nuevos u otras, las cuales dependerán de los criterios del modelador. En los siguientes subcapítulos se describen detalladamente estos procedimientos.

### **5.6.1 Modelo matemático en condiciones naturales.**

#### **5.6.1.1 Distribución de la red de ríos.**

Conforme con la distribución de las corrientes existentes en la zona de estudio, es conveniente y necesario definir la “topología” que se usará en el modelo matemático en condiciones naturales; ésta, obedece principalmente a los nombres de los cauces empleados en los levantamientos topográficos, y a su vez, a los establecidos en la cartografía de que se ha dispuesto durante el desarrollo del



Una vez extendidas las secciones, se procede a conformar el modelo matemático obteniendo como resultado un sistema interconectado de ríos, lagunas y vertedores. En las figuras siguientes se muestran las secciones topográficas que conforman al modelo, además se muestra de forma esquemática la conformación del mismo.

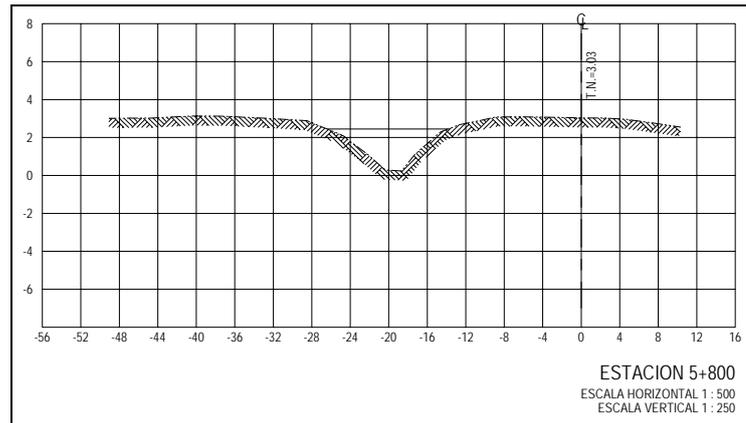


Figura 5.12 Sección transversal del cauce Zapotes III, tramo Zapotes T-4, obsérvese que el ancho máximo del cauce es de 30 m.

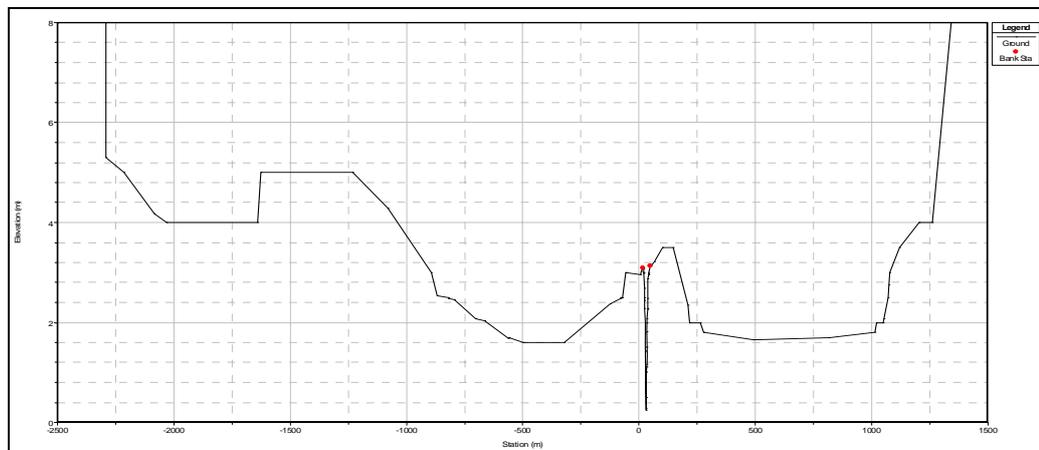


Figura 5.13 Sección extendida en la planicie, los puntos rojos indican la sección del cauce, en tanto que hacia sus extremos indica la llanura de inundación.

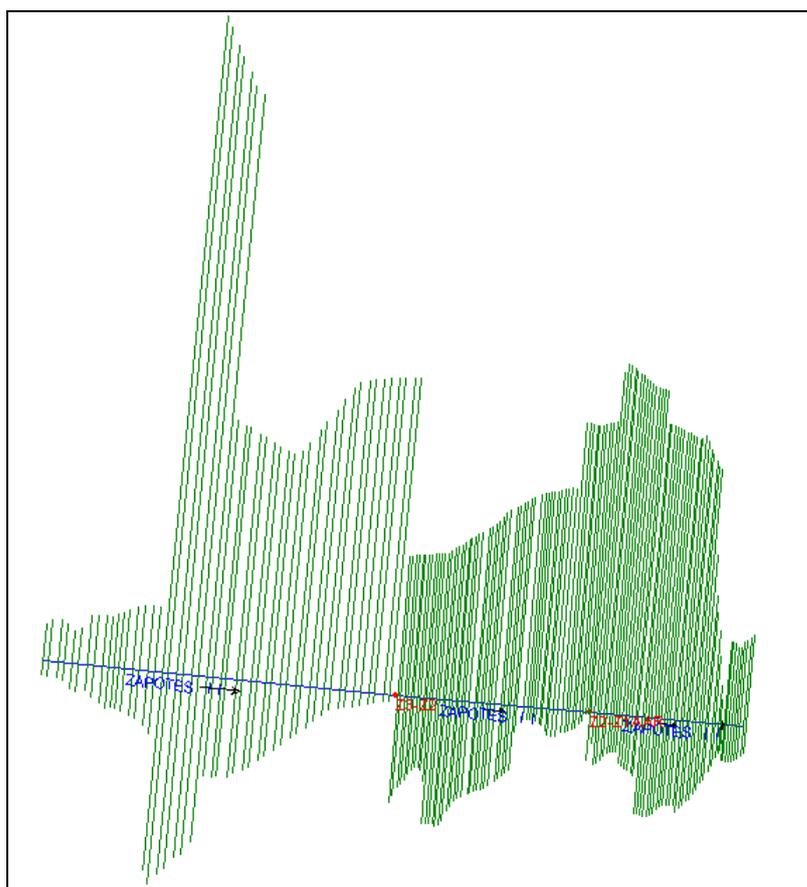


Figura 5.14 Esquema general del modelo matemático, en la figura se muestra el cauce Zapotes II en sus tres tramos.

Al igual que en el cauce mostrado en la figura anterior, en los otros cauces que conforman al sistema se aplicó la misma metodología, obteniéndose de esta manera la red completa de ríos, lagunas y vertedores.

Conforme a la distribución de los cauces y sus diferentes tramos se colocaron las uniones y bifurcaciones en las secciones correspondientes.

### 5.6.1.3 Distribución de gastos

Para la condición de flujo subcrítico, como en el presente estudio, una división de flujo (bifurcación) en dirección aguas abajo, el programa (Hec-Ras) requiere de un procedimiento de ensayo y error de la distribución de gastos hasta que las energías calculadas de los dos tramos aguas abajo de la bifurcación sean iguales.

En el caso de confluencias (unión de dos o más cauces), se acepta la suma de los gastos sin que se tenga un margen de error significativo, considerando de igual manera las ecuaciones de momento, energía y continuidad.

En las fronteras aguas arriba de los cauces, se consideraron en primera instancia los caudales que cada una de las subcuencas aportan hacia la zona de estudio, cada uno con su respectiva corriente, además para el caso de los ríos Pajonal y Zapotes III se consideraron los caudales provenientes del río La Sierra el cual corresponde a un total de 650 m<sup>3</sup>/s (valor supuesto), que sumado con los gastos por cuenca propia arroja un valor total de 1051.45 m<sup>3</sup>/s, que afectan a la zona de planicie. De acuerdo con lo anterior, en la tabla siguiente se muestra la distribución de gastos que inicialmente se consideró en la modelación matemática del sistema de ríos y lagunas de la zona de Los Zapotes.

Tabla 5.16 Distribución inicial de gastos en las diferentes corrientes que conforman el sistema de drenaje de Los Zapotes.

Corriente	Gasto inicial
Conexión Camino (El Chiflón)	1.45
Conexión Zapotes I y Zapotes II	36.70
Pajonal	345.89
Pajonal B	0.90
Zapotes III -T3	351.59
Zapotes III -T2	697.48
Zapotes III -T1	698.38
Zapotes III -T4	350.14
Zapotes I -T4	304.67
Zapotes I -T4 sección 228	349.37
Zapotes I -T3	249.37
Zapotes I -T2	349.37
Zapotes I -T1	386.07
Zapotes I -Isla	100.00
Zapotes II -T3	3.70
Zapotes II -T2	702.08
Zapotes II -T1	665.38

En la siguiente figura se muestra gráficamente la distribución inicial de gastos, la cual corresponde a la planteada en la tabla anterior.

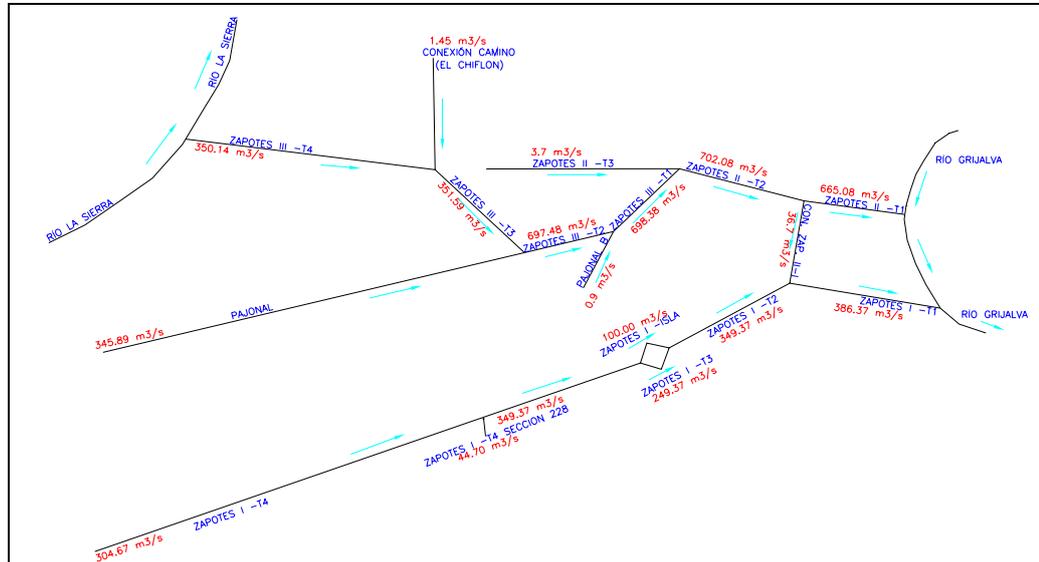


Figura 5.15 Distribución inicial de gastos, empleados como frontera en el modelo matemático.

#### 5.6.1.4 Condiciones de frontera

En los tramos aguas arriba de los cauces se empleó el tirante normal como condición de frontera, mientras que aguas abajo, para el caso específico de los cauces principales se obtuvo una curva elevaciones-gastos en la sección de control ubicada en los puentes Zapotes I y Zapotes II. Las pendientes empleadas en los cauces corresponden a las pendientes obtenidas de forma directa en los cauces. Para definir las pendientes que se muestran en la tabla siguiente, se obtuvieron en un mismo instante los niveles del espejo del agua por los diferentes cauces, es decir el valor de la pendiente utilizado para obtener el tirante normal, corresponde al de la pendiente del perfil hidráulico de cada cauce en los tramos en estudio. En la tabla siguiente se muestran los valores de las condiciones de frontera empleados en el modelo matemático.



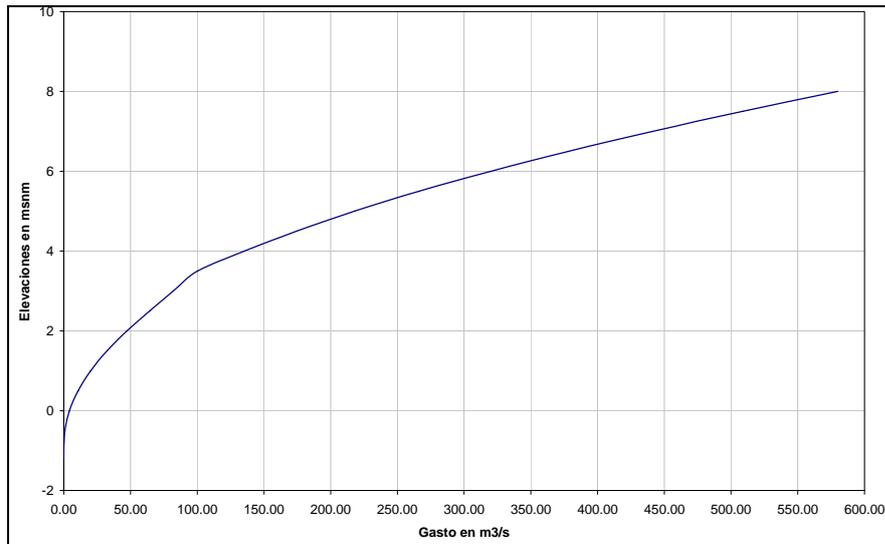


Figura 5.17 Curva Elevaciones-Gastos empleada como frontera aguas abajo del río Zapotes I

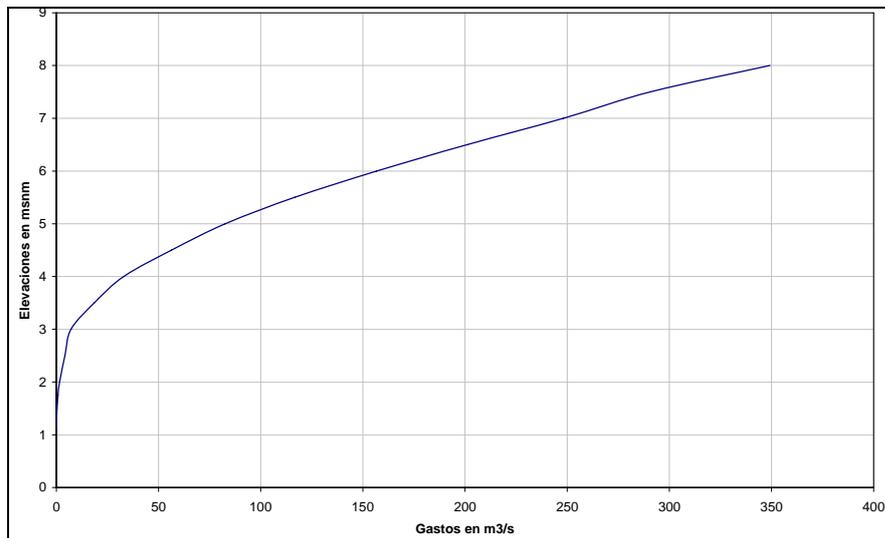


Figura 5.18 Curva Elevaciones-Gastos empleada como frontera aguas abajo del río Zapotes II

Con base en la conformación topográfica de la zona de estudio y su área de influencia, un papel determinante en el funcionamiento hidráulico es la llanura de inundación ubicada aguas arriba del inicio de los levantamientos topográficos, es por ello que en el modelo matemático se consideró esta zona como una zona de regulación conformada dentro de éste con curvas elevaciones-capacidades y conectada a los cauces por medio de vertedores naturales. En la figura siguiente se muestra esquemáticamente esta conexión y posteriormente se muestra la curva elevaciones capacidades correspondiente a la zona de regulación.

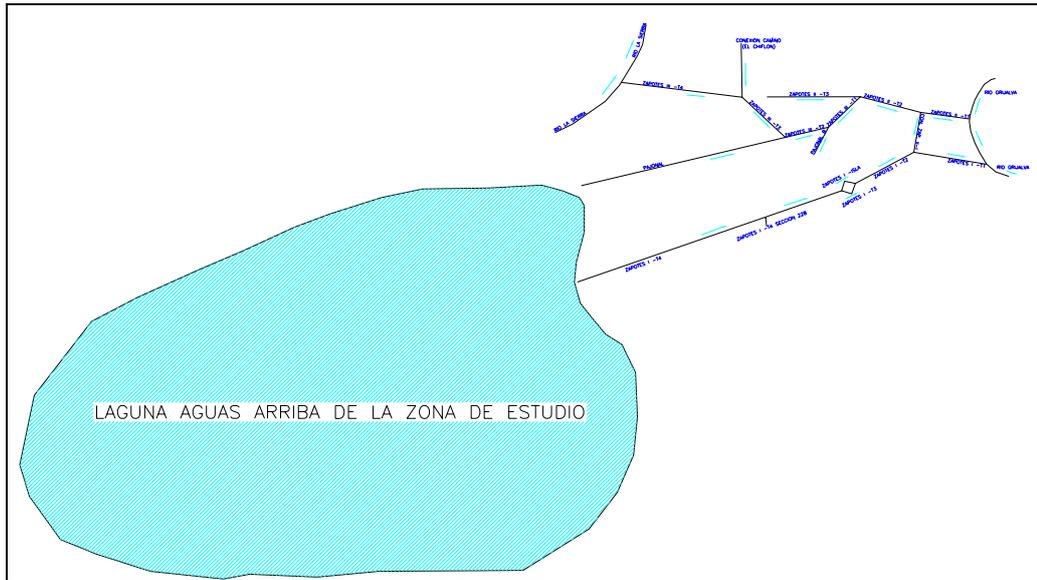


Figura 5.19 Localización de la zona de regulación ubicada aguas arriba de la zona de estudio.

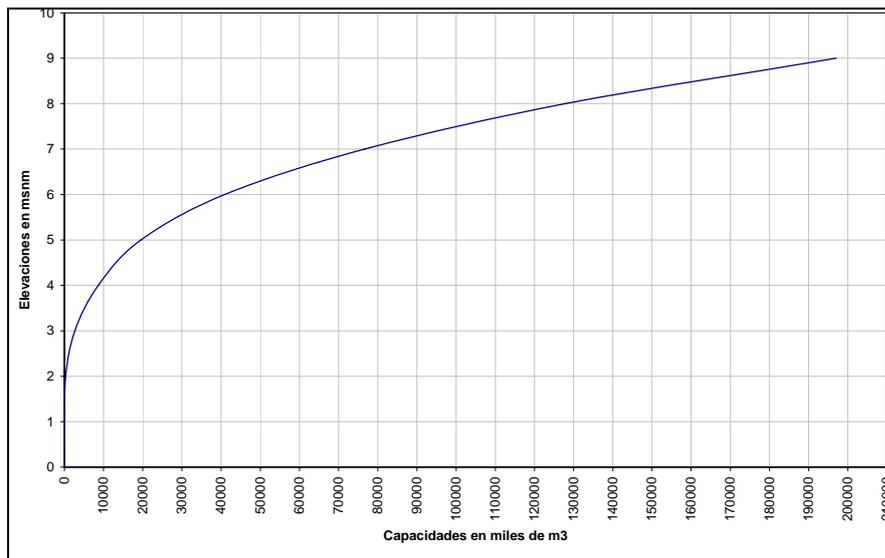


Figura 5.20 Curva elevaciones capacidades de la zona lagunar ubicada aguas arriba de la zona de estudio.

Como puede apreciarse en la Figura 5.19, la zona de regulación conformada por la laguna, se conecta directamente con los cauces Zapotes I y Pajonal, conexión que como ya se mencionó se realizó con vertedores naturales.

Otros elementos que recobran especial importancia en el modelo matemático son las estructuras de control tipo puentes que se localizan en el cruce de la carretera Villahermosa-Escárcega con los ríos Zapotes I y Zapotes II, estas estructuras se insertaron en el modelo matemático con sus propiedades tanto físicas,

geométricas como hidráulicas, en la figura siguiente se muestra la forma geométrica de estas estructuras.

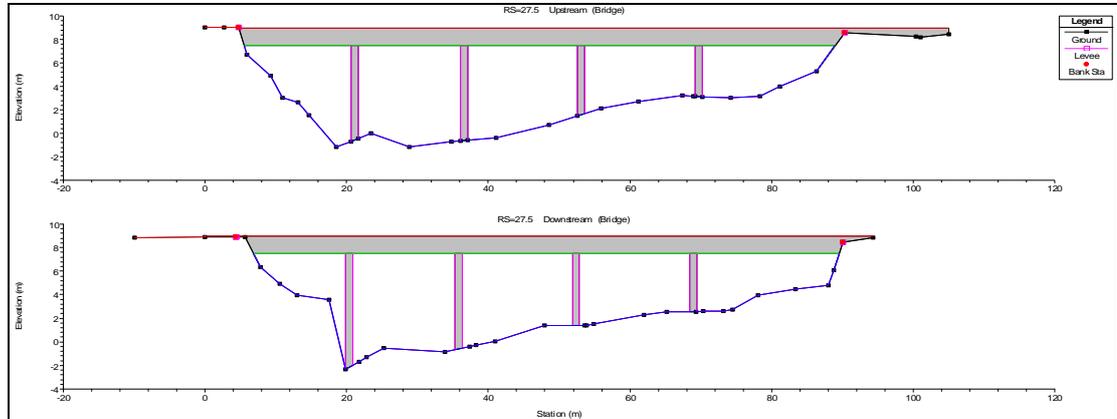


Figura 5.21 Sección transversal del puente Zapotes I.

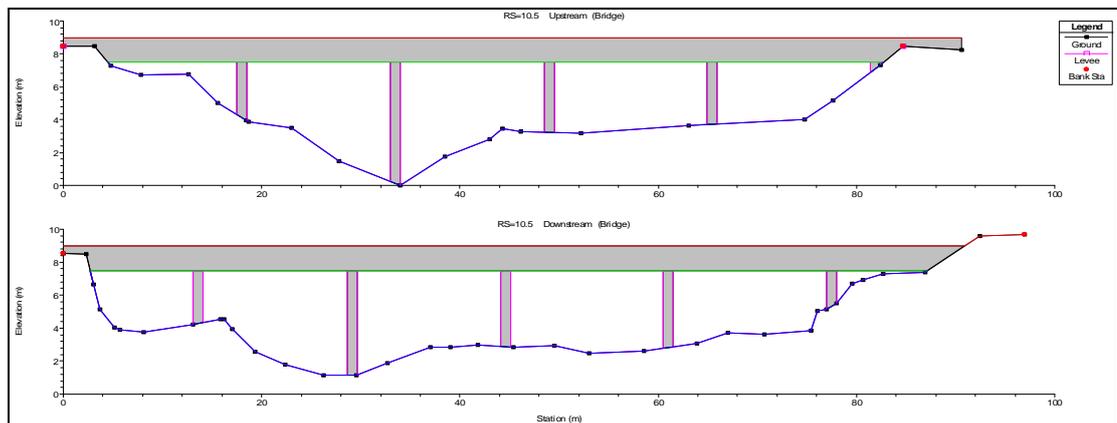


Figura 5.22 Sección transversal del puente Zapotes II.

Una vez conformado en su totalidad el modelo matemático, se procedió a realizar las simulaciones hidráulicas del sistema de drenaje, los análisis realizados así como los resultados obtenidos se muestran en el subcapítulo siguiente.

### 5.6.1.5 Modelación matemática y análisis de resultados

De acuerdo con la conformación del modelo matemático, se observa que además de la red de ríos y sus conexiones, un elemento que recobra gran importancia en el sistema es la zona lagunar que existe aguas arriba de la zona de estudio véase Figura 5.19, la cual es alimentada principalmente por los escurrimientos provenientes del río Zapotes I y parte de los escurrimientos del río Pajonal, que a su vez, provienen del río La Sierra. Es por ello que las simulaciones

hidráulicas oscilan en función del comportamiento de los niveles de esta zona lagunar, así como del comportamiento de los niveles aguas abajo de los puentes Zapotes I y II, donde se ubica la confluencia de ambos ríos con el río Grijalva.

De acuerdo con la distribución propuesta de gastos en los cauces, se realizaron diversas simulaciones proponiendo diferentes elevaciones en la zona lagunar, obteniéndose como resultado que para la elevación 6.70 msnm, los perfiles hidráulicos se optimizan en las uniones y bifurcaciones, así como en los vertedores, donde el flujo puede presentarse en forma positiva y negativa, según sea el nivel de los elementos conectados entre sí.

Aguas abajo de los puentes, en la confluencia de los ríos Zapotes I y Zapotes II, se obtuvieron niveles de 6.37 en el Zapotes I y 6.43 en el Zapotes II. Tal como se muestra en la Figura 5.23 y Figura 5.24. La nomenclatura que se muestra en las figuras es la siguiente:

Elevation (m)	=	Elevación en msnm
Main Channel Distance (m)	=	Cadenamiento del río en m.
EG PF I	=	Gradiente Hidráulico que arroja la propuesta 1.
WS PF I	=	Superficie libre del agua que arroja la propuesta 1.
LOB	=	Margen izquierda del cauce.
ROB	=	Margen derecha del cauce.

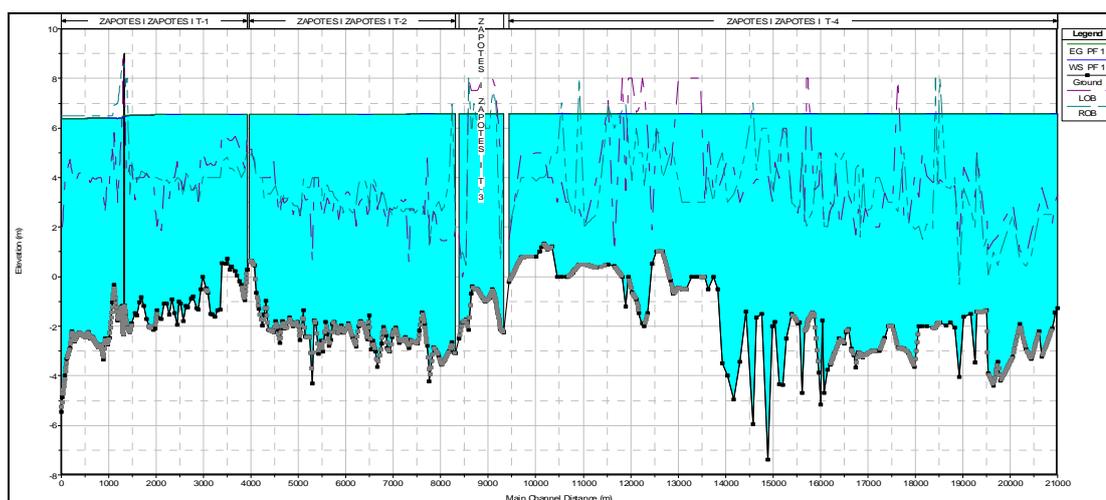


Figura 5.23 Perfil hidráulico del cauce Zapotes I desde su inicio aguas arriba hasta su descarga en el río Grijalva.

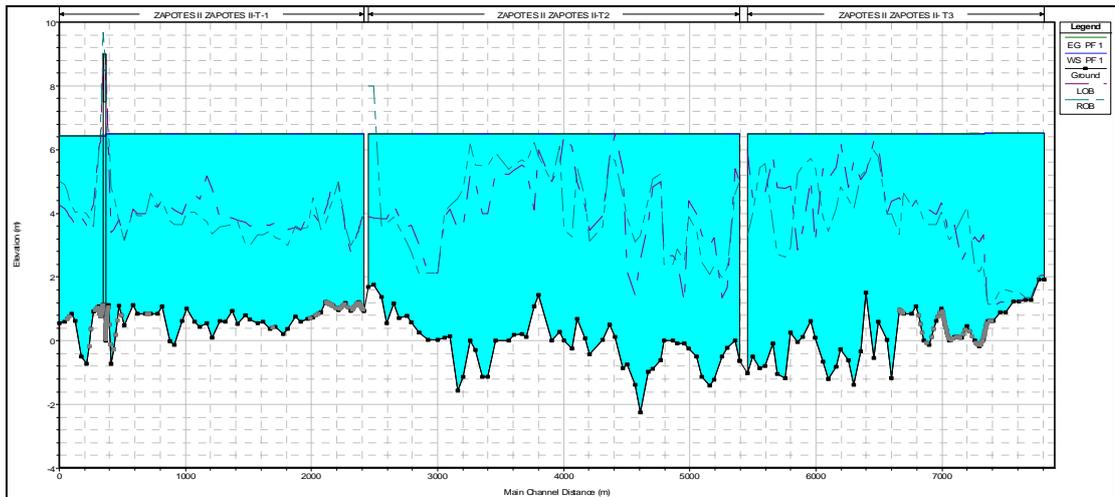


Figura 5.24 Perfil hidráulico del cauce Zapotes II desde su inicio aguas arriba hasta su descarga en el río Grijalva.

Para mostrar el comportamiento de los gastos de entrada y salida entre la laguna y los ríos Zapotes I y Pajonal a través de los vertedores naturales, se muestra la tabla siguiente:

Tabla 5.18 Comportamiento del flujo de entrada y salida de la zona lagunar.

Storage Area Output			
File Type Options Help			
Profile: PF 1			
SA: LAG AGUAS ARRIBA		Plan: MZAPOTESCOMP	
Plan: MZAPOTESCOMP Storage Area: LAG AGUAS ARRIBA Profile: PF 1			
W.S. Elev (m)	6.70	LS 264.5	335.86
SA Min El (m)	0.00	LS 263.5	-5.68
SA Area (1000 m <sup>2</sup> )	35798.25	LS 262.5	-10.54
SA Volume (1000 m <sup>3</sup> )	65963.28	LS 307.5	177.80
Inflow (m <sup>3</sup> /s)	513.66		
Outflow (m <sup>3</sup> /s)	16.22		
Net Flux (m <sup>3</sup> /s)	497.44		
Errors, Warnings and Notes			

La tabla anterior muestra los datos principales de la zona lagunar, así como los gastos de entrada y salida de la misma. Como puede observarse al final de la primera columna se indica el flujo neto que se queda en la laguna, el cual asciende a 497 m<sup>3</sup>/s, es decir, la laguna tiene capacidad para regular casi la mitad del gasto que llega a la zona lagunar de los Zapotes (1051 m<sup>3</sup>/s).

Los resultados anteriores pueden ser tabulados, de tal manera que se puedan apreciar con detalle las principales características hidráulicas de los cauces, como son: velocidad del flujo, tirante hidráulico, área hidráulica de la sección, Radio Hidráulico, elevación de la superficie libre del agua, elevación del gradiente hidráulico, número de Froude, tipo de flujo, etc. véase un ejemplo en la tabla siguiente:

Tabla 5.19 Ejemplo tabulado de los resultados obtenidos de la modelación matemática.

Río	Tramo de río	Estación	Gasto total	Elev. de la superficie libre del agua	Elev. del gradiente de energía	Velocidad en el cauce	Área hidráulica	Radio hidráulico	pendiente del fondo	Ancho de la sup. Libre del agua	Número de Froude	Tipo de flujo.
			(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)	m/m	(m)		
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	308.000	304.670	6.590	6.590	0.070	6670.340	4.480	0.004	1485.800	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	307.500	Lat Struct									
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	307.000	126.870	6.590	6.590	0.030	6404.070	4.430	0.011	1440.390	0.000	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	306.000	126.870	6.590	6.590	0.030	6248.430	4.610	0.005	1348.740	0.000	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	305.000	126.870	6.590	6.590	0.050	4432.670	4.410	-0.019	998.670	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	304.000	126.870	6.590	6.590	0.050	4337.820	4.320	0.007	998.180	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	303.000	126.870	6.590	6.590	0.040	5445.920	4.140	-0.004	1307.620	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	302.000	126.870	6.590	6.590	0.050	5315.600	4.040	-0.008	1308.070	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	301.000	126.870	6.590	6.590	0.110	2075.780	5.140	0.009	398.370	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	300.000	126.870	6.590	6.590	0.060	3661.260	2.820	0.004	1296.480	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	299.000	126.870	6.590	6.590	0.080	3187.680	2.960	-0.018	1075.780	0.010	Subcrítico
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	298.000	126.870	6.590	6.590	0.100	2592.430	3.020	0.009	856.340	0.010	Subcrítico

Para ilustrar de manera gráfica los resultados de la modelación, se procedió a dibujar en un plano la mancha de inundación que se generaría al presentarse la avenida de diseño. La superficie inundada asciende a 13289.19 has, las cuales en su mayoría son de uso agrícola y ganadero, véase Figura 5.25.

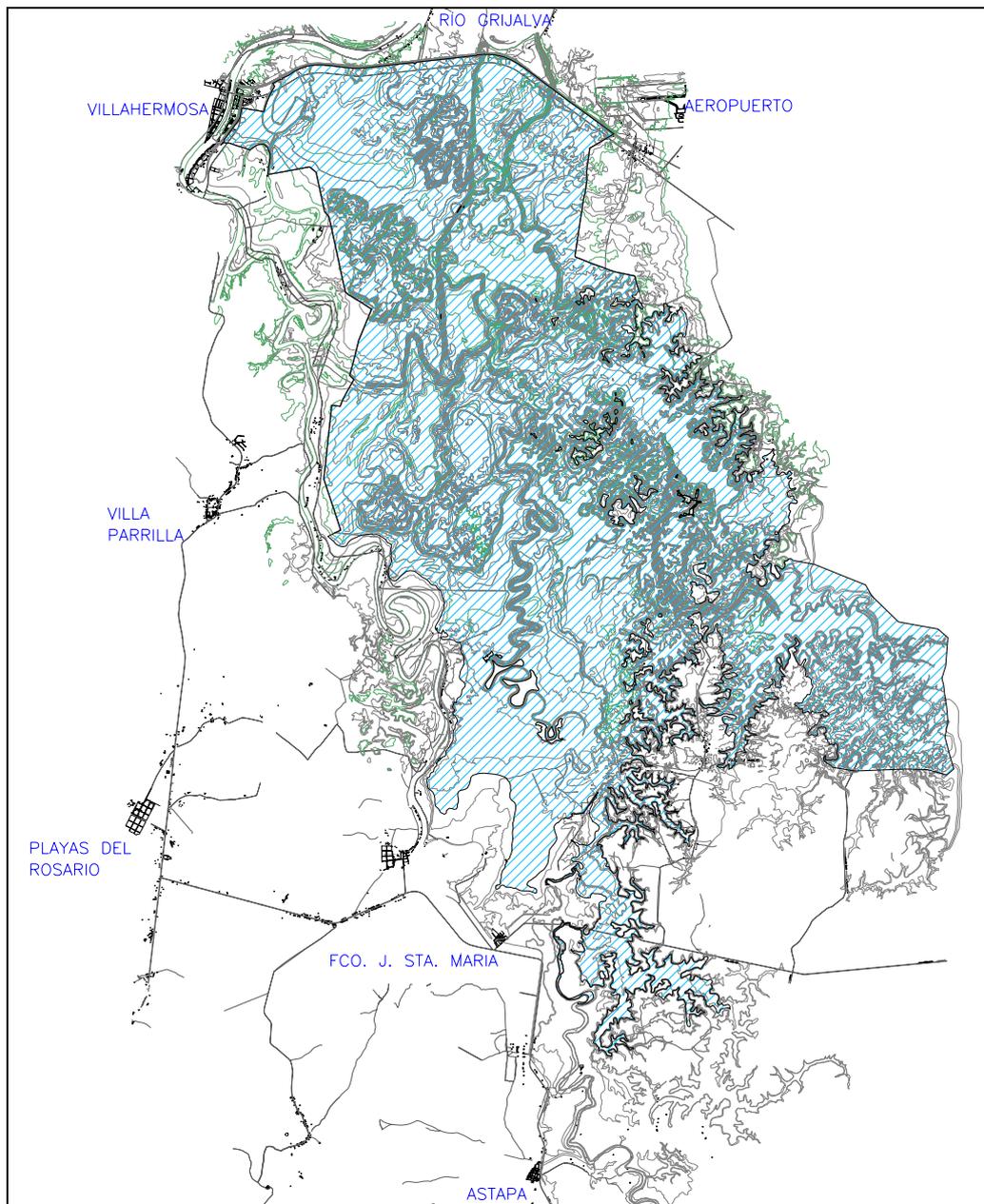


Figura 5.25 Mancha de inundación que genera la ocurrencia de una avenida de diseño de 5 años de periodo de retorno. Superficie inundada 13289.19 has, con tendencia de uso agrícola y ganadero.

En la Figura 5.25 puede observarse que la mancha de inundación que se forma con una avenida de 5 años de periodo de retorno, cubre casi en su totalidad a la zona de estudio incluyendo la gran extensión de tierra de la zona lagunar ubicada aguas arriba, lo que impide el crecimiento en la producción de los sectores agrícola y ganadero de la región.

## **5.6.2 Conformación del modelo matemático en las obras de rectificación.**

Con base en los resultados del modelo matemático en condiciones naturales, se pueden plantear las alternativas de solución que a criterio del modelador proporcionen un adecuado funcionamiento hidráulico. En este caso se plantearon dos cuya finalidad es reducir en lo posible los niveles de agua que se presentan en el sistema de drenes.

Para el planteamiento de las obras de rectificación es necesario considerar la capacidad hidráulica instalada, es decir, aprovechar al máximo los drenes existentes e incrementar la capacidad hidráulica con obras que resulten económicas pero que técnicamente brinden una solución adecuada. Con base en ello se propusieron dos alternativas, las cuales se describen a continuación:

### **5.6.2.1 Alternativa 1**

La primera alternativa consiste en aprovechar al máximo la capacidad de conducción de los ríos principales Zapotes I y Zapotes II. Estos dos cauces son comunicados a su vez por dos conexiones nuevas, la primera que nace en la laguna Santo Domingo y Sabanilla y atraviesa el río pajonal para llegar al río Zapotes I, aguas arriba de la comunidad de “La Isla”, la segunda conexión se propuso aguas abajo de la comunidad de La “Isla”, aproximadamente 3.5 km aguas arriba de sus respectivos puentes. En la figura siguiente se muestran esquemáticamente los trazos de las conducciones, tanto existentes como nuevas.

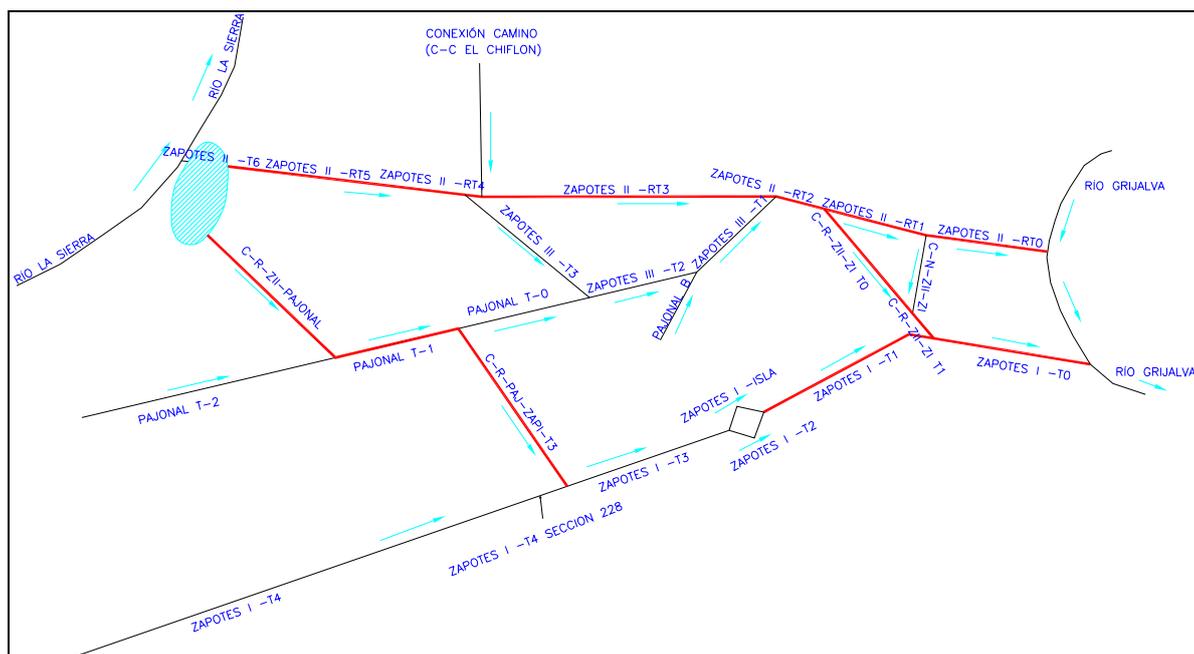


Figura 5.26 Esquema general de los drenes que conforman la alternativa de solución 1. Las líneas de mayor grosor representan a los cauces que se van a modificar.

De acuerdo con las características de los cauces y conforme con lo establecido en las directrices que rigen el estudio, se plantearon las dimensiones de las secciones transversales, las cuales quedaron como sigue:

Tabla 5.20 Características de las secciones transversales consideradas en la rectificación, Alternativa 1.

Nombre del cauce	Tramo	Ancho de plantilla (m)	Talud (H : V)	Pendiente (adim)
Zapotes I	Zapotes I T-0	55	1.5 : 1	0.00012
Zapotes I	Zapotes I T-1	50	1.5 : 1	0.00012
Zapotes II	Zapotes II T-0	45	1.5 : 1	0.00012
Zapotes II	Zapotes II T-1	45	1.5 : 1	0.00012
Zapotes II	Zapotes II T-2	45	1.5 : 1	0.00012
Zapotes II	Zapotes II T-3	45	1.5 : 1	0.00012
Zapotes II	Zapotes II T-4	30	1.5 : 1	0.00012
Zapotes II	Zapotes II T-5	30	1.5 : 1	0.00012
Con Zap II-Paj-Zap I	Con Zap II-Paj	40	1.5 : 1	0.00012
Con Zap II-Paj-Zap I	Pajonal 1	40	1.5 : 1	0.00012
Con Zap II-Paj-Zap I	Con Paj I – Zap I	40	1.5 : 1	0.00012
Con Zap II – Zap I	Con Zap II-Zap I T0	40	1.5 : 1	0.00012
Con Zap II – Zap I	Con Zap II-Zap I T1	40	1.5 : 1	0.00012

En los casos donde el fondo del río es mayor que el fondo calculado por la pendiente propuesta para la rectificación, la sección transversal estará compuesta por una parte natural y una parte rectificada, como se muestra en la siguiente figura.

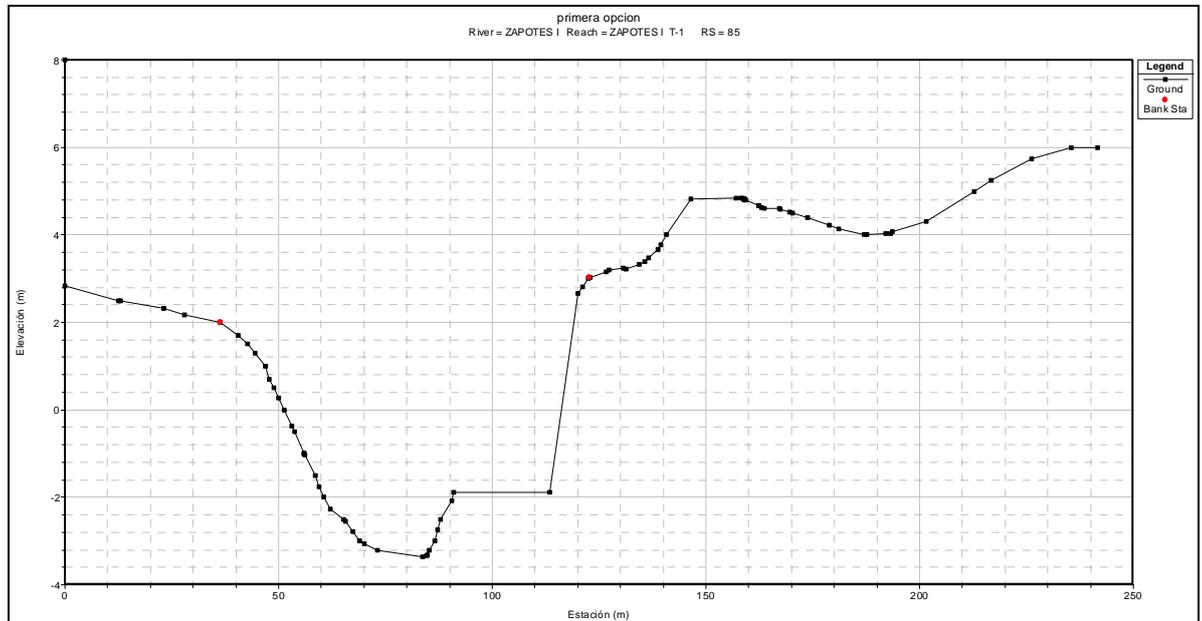


Figura 5.27 Sección transversal compuesta, donde el fondo del cauce es más profundo que el fondo de la rectificación.

#### 5.6.2.1.1 Análisis hidráulico de la alternativa 1

Para realizar el análisis hidráulico de la alternativa 1, se modificó el modelo matemático que simula el comportamiento hidráulico de las condiciones naturales, sustituyéndose los tramos de río que se modificaron y agregándose los tramos de cauces nuevos que se consideraron en las conexiones, lo anterior conforme con los trazos mostrados en la Figura 5.26 y la Tabla 5.20.

#### 5.6.2.2 Condiciones iniciales y de frontera

Las fronteras aguas abajo que se consideraron para el análisis fueron curvas Gasto-Elevación, las cuales fueron calculadas en la sección de control ubicadas inmediatamente aguas arriba de cada puente.

Adicionalmente a las curvas Q-H empleadas como frontera aguas abajo del modelo matemático, se consideraron también fronteras aguas arriba y fronteras

internas en las uniones. Similar a lo que se empleó en el modelo de condiciones actuales.

Una vez definidas las fronteras internas y externas del modelo, se plantearon diferentes distribuciones de gastos que obedecen a las directrices mencionadas en los subcapítulos anteriores, véase Tabla 5.21. Con estas distribuciones se realizaron las simulaciones correspondientes y se obtuvieron resultados, cuyos perfiles hidráulicos son congruentes en las uniones y bifurcaciones del sistema. La distribución que se muestra en la Tabla 5.21 fue con la que los resultados se consideraron mas adecuados.

Tabla 5.21 Distribución inicial de gastos empleada en el análisis hidráulico de la primera alternativa.

RÍO	TRAMO DE RÍO	UBICACIÓN	GASTO INICIAL
CONEXION CAMINO(EL CHIFLÓN)	C-C (EL CHIFLON)	70	1.45
CONEXION NATURAL ZII-ZI	C-N-ZII-ZI	31	80.72
CONEXION PAJ-ZAP I	C-R-PAJ-ZAPI-T3	5	181.27
CONEXION RECT ZAP II-ZAP I	C-R-ZII-ZI-T0	15	94.41
CONEXION RECT ZAP II-ZAP I	C-R-ZII-ZI-T1	4.5	175.13
CONEXION ZII-PAJ	C-R-ZII-PAJONAL	31	187.66
PAJONAL	PAJONAL 2	265	25.89
PAJONAL	PAJONAL T1	23	213.55
PAJONAL	PAJONAL-T0	47	32.28
PAJONAL B	PAJONAL B	20	0.9
ZAP3	ZAPOTES III- T3	62	55.88
ZAP3	ZAPOTES III-T2	31	88.16
ZAP3	ZAPOTES III-T1	19	89.06
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-4	308	304.67
ZAPOTES I SECCIÓN 228	ZAPOTES I T-4	228	349.37
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-3	200	530.64
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-2	181	431.79
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-1	85	530.64
ZAPOTES I	ZAPOTES I T-0	32	705.77
ZAPOTES I LA ISLA	ZAPOTES I ISLA	15	98.85
ZAPOTES II	ZAPOTES II T6	152	670.14
ZAPOTES II	ZAPOTES II R-T5	117	482.48
ZAPOTES II	ZAPOTES II T4	82	426.6
ZAPOTES II	ZAPOTES II R T-3	381	428.05
ZAPOTES II	ZAPOTES II R T-2	255	517.11
ZAPOTES II	ZAPOTES II R-T1	37	422.7
ZAPOTES II	ZAPOTES II RT-0	25	341.98

### 5.6.2.3 Modelación matemática y análisis de resultados

De acuerdo con la distribución de gastos planteada en la Tabla 5.21 y la sección geométrica propuesta en cada uno de los cauces por modificar, se realizaron diversas simulaciones en las cuales se consideraron diferentes elevaciones en la zona lagunar ubicada aguas arriba, obteniéndose como resultado que para la elevación 5.10 msnm, los perfiles hidráulicos se optimizan en las uniones y bifurcaciones, así como en los vertedores, donde el flujo puede presentarse en forma positiva o negativa, según sea el nivel de los elementos conectados entre sí.

Agua abajo de los puentes, en la confluencia de los ríos Zapotes I y Zapotes II, se obtuvieron niveles de 4.68 en el Zapotes I y 4.94 en el Zapotes II, en tanto que en las zonas intermedias de los diferentes cauces el nivel alcanzado por el agua alcanza una elevación que oscila alrededor de la cota 5 msnm.

En las figuras siguientes se muestran un ejemplo de los perfiles hidráulicos obtenidos de las simulaciones, tanto en cauces nuevos como existentes rectificados.

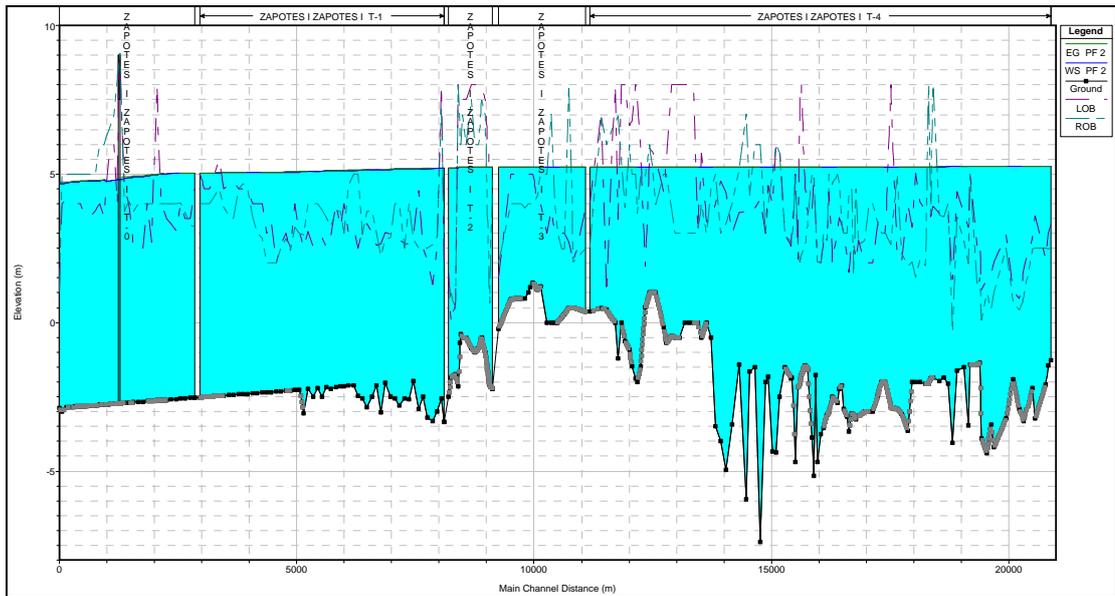


Figura 5.28 Perfil hidráulico del cauce Zapotes I desde su inicio en la estación 308 hasta su descarga en el río Grijalva.

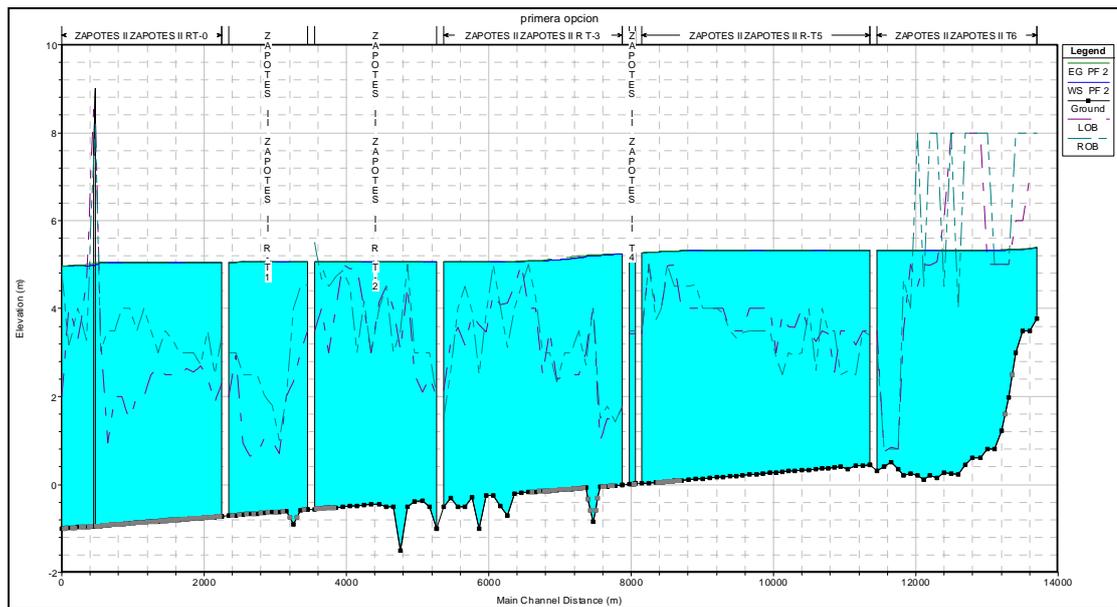


Figura 5.29 Perfil hidráulico del cauce Zapotes II desde su inicio en la laguna Sabanilla hasta su descarga en el río Grijalva.

Para mostrar el comportamiento de los gastos de entrada y salida entre la laguna y los ríos Zapotes I y Pajonal a través de los vertedores naturales que se consideraron en el modelo matemático, se muestra la tabla siguiente:

Tabla 5.22 Comportamiento del flujo de entrada y salida de los ríos Zapotes I y Pajonal hacia la zona lagunar.

Storage Area Output			
File Type Options Help			
Profile: PF 2			
SA:	LAG AGUAS ARRIBA	Plan:	prim-opcion
Plan: prim-opcion Storage Area: LAG AGUAS ARRIBA Profile: PF 2			
W.S. Elev (m)	5.10	LS 264.5	25.89
SA Min El (m)	0.00	LS 263.5	0.03
SA Area (1000 m <sup>2</sup> )	21398.96	LS 262.5	0.03
SA Volume (1000 m <sup>3</sup> )	21639.36	LS 307.5	100.25
Inflow (m <sup>3</sup> /s)	255.24	LS 306.5	123.05
Outflow (m <sup>3</sup> /s)	0.00		
Net Flux (m <sup>3</sup> /s)	255.24		
Errors, Warnings and Notes			

Como puede observarse al final de la primera columna se indica el flujo neto que regula la laguna, el cual asciende a 255.24 m<sup>3</sup>/s; es decir, con la rectificación propuesta en la Alternativa 1, la laguna regula aproximadamente una cuarta parte de los escurrimientos que llegan a la zona de estudio.

Para ilustrar de manera gráfica los resultados de la modelación, se dibujó en un plano la mancha de inundación que se generaría al presentarse la avenida de diseño. Donde se calculó una superficie inundada de 9494 has, las cuales en su mayoría tienen tendencia de suelo uso agrícola y ganadero, véase Figura 5.25.

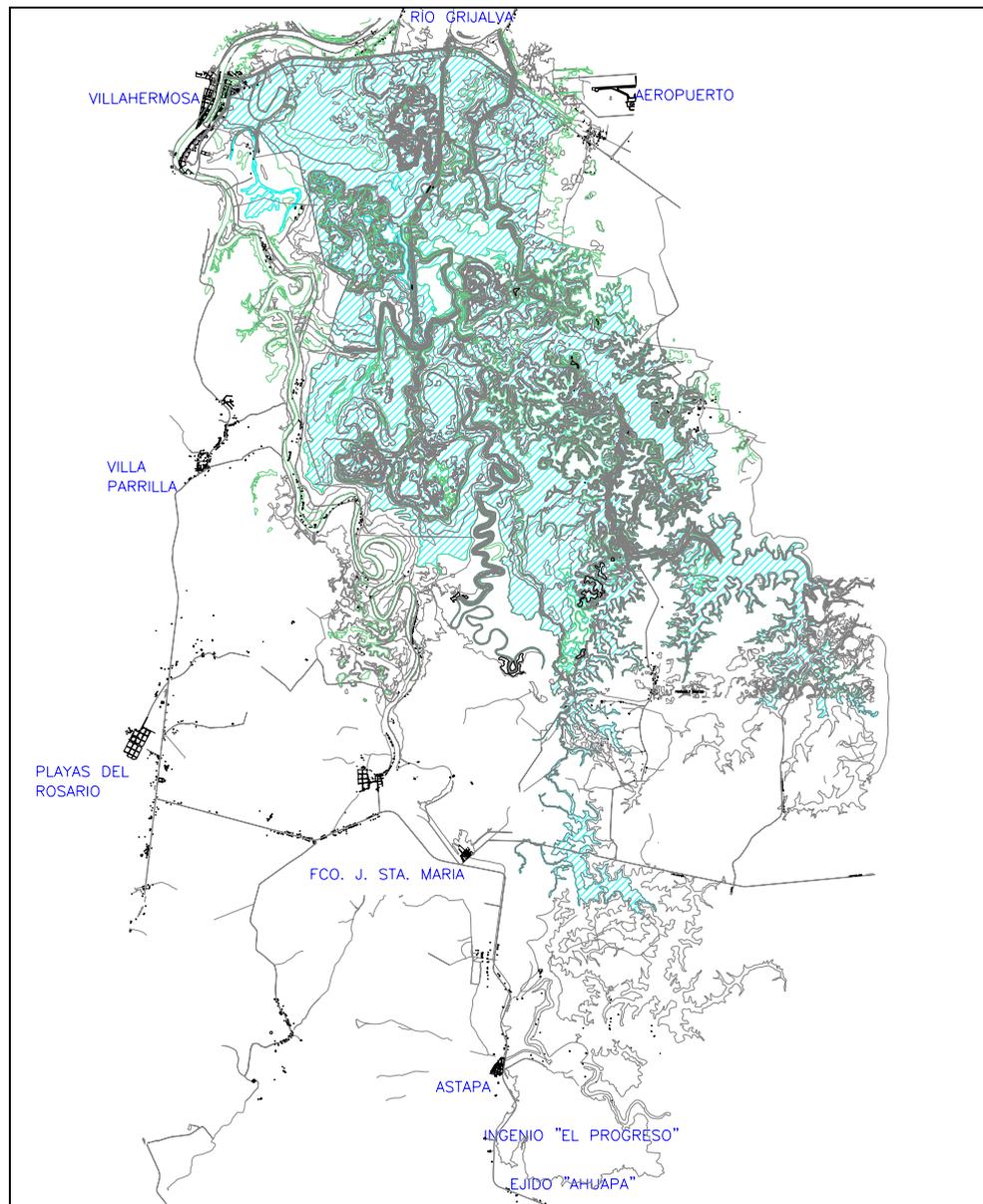


Figura 5.30 Mancha de inundación generada por la avenida de diseño. Superficie inundada 9,494 ha, con tendencia de uso de suelo agrícola y ganadero.

Al hacer la comparativa de la superficie que inunda esta alternativa con respecto a la inundación que genera la misma avenida en condiciones naturales, se

observó que los beneficios de la rectificación se manifiestan en 3,795 ha sin inundar, las cuales en su mayoría pueden ser aprovechadas para el desarrollo del sector agropecuario.

Para poder decidir cual será la mejor solución de las alternativas también se deberá de apoyar con el costo de cada una de ellas, ya que el factor técnico se puede cumplir de varias formas pero el costo de la construcción de ellas tendrá una variación según las cantidades de obra que se requiera ejecutar, es por esto que a continuación se muestra una tabla donde se presentan los conceptos básicos y las cantidades de obra de esta primera alternativa. Los precios cotizados fueron obtenidos para la región del estudio, en el cuarto trimestre del año 2006.

Tabla 5.23 Presupuesto aproximado de la alternativa 1, con precios de la zona de estudios en el cuarto trimestre del año 2006

CONCEPTO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
TRAZO Y NIVELACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO.	1,271,106.03	m2	3.74	4,753,936.55
RETIRO DE CERCAS DE ALAMBRE.	500.00	m	4.43	2,215.00
DESMONTE, DESENRAICE, DESHIERBE Y LIMPIA DEL TERRENO PARA PROPÓSITOS DE CONSTRUCCIÓN.	73.36	ha	5160.57	378,574.25
EXCAVACIÓN EN CUALQUIER TIPO DE MATERIAL EXCEPTO ROCA, PARA LA FORMACIÓN DE DRENES HASTA EL NIVEL DE PROYECTO.	3,532,192.49	m3	23.64	83,501,030.43
FORMACIÓN DE VADOS PARA LA CONEXIÓN DE ZONAS LAGUNARES CON EL SISTEMA DE DRENES, INCLUYE EXCAVACIÓN EN CUALQUIER TIPO DE MATERIAL EXCEPTO ROCA, HASTA EL NIVEL DE PROYECTO.	285.00	m	9462.9	2,696,926.50
CARGA Y ACARREO DE MATERIAL PRODUCTO DE EXCAVACIÓN HASTA UN KILÓMETRO SOBRE CAMINO DE TERRACERÍA, INCLUYE: TIRO DEL MATERIAL EN LAS PARTES BAJAS.	1,165,623.52	m3-km	9.29	10,828,642.51
TENDIDO DE MATERIAL PRODUCTO DE EXCAVACIÓN, DEPOSITADO EN ZONAS BAJAS O DONDE LO INDIQUE LA SUPERVISIÓN. INCLUYE BANDEADO DEL MATERIAL.	3,532,192.49	m3	4.98	17,590,318.59
SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CERCA DE ALAMBRE DE PÚAS Y POSTES DE MADERA A CADA 3 m, INCLUYE: MATERIALES, HERRAMIENTA, MAMO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	500.00	m	26.62	13,310.00
CONSTRUCCIÓN DE PUENTE TUBULAR, CON MATERIAL DE RECUPERACIÓN, PARA PASO VEHICULAR, DE 60 m DE LONGITUD, INCLUYE: PINTURA EPÓXICA EN DOS MANOS Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA CONSTRUCCIÓN.	1.00	pza	1350000	1,350,000.00
LIMPIEZA GENERAL DE LA OBRA.	733,590.00	m2	0.43	315,443.70
				121,430,397.54

#### 5.6.2.4 Alternativa 2

Con base en los resultados obtenidos de la primera alternativa y con la finalidad de reducir aún mas los niveles de la zona lagunar, se planteó una tercera descarga hacia el río Grijalva, la cual esta compuesta por una conducción a cielo abierto, formado principalmente por dos bordos longitudinales. Este cauce nace como una derivación del río Zapotes I y cruza la carretera Villahermosa-Escárcega a través de un puente propuesto, Zapotes III, véase Figura 5.31.

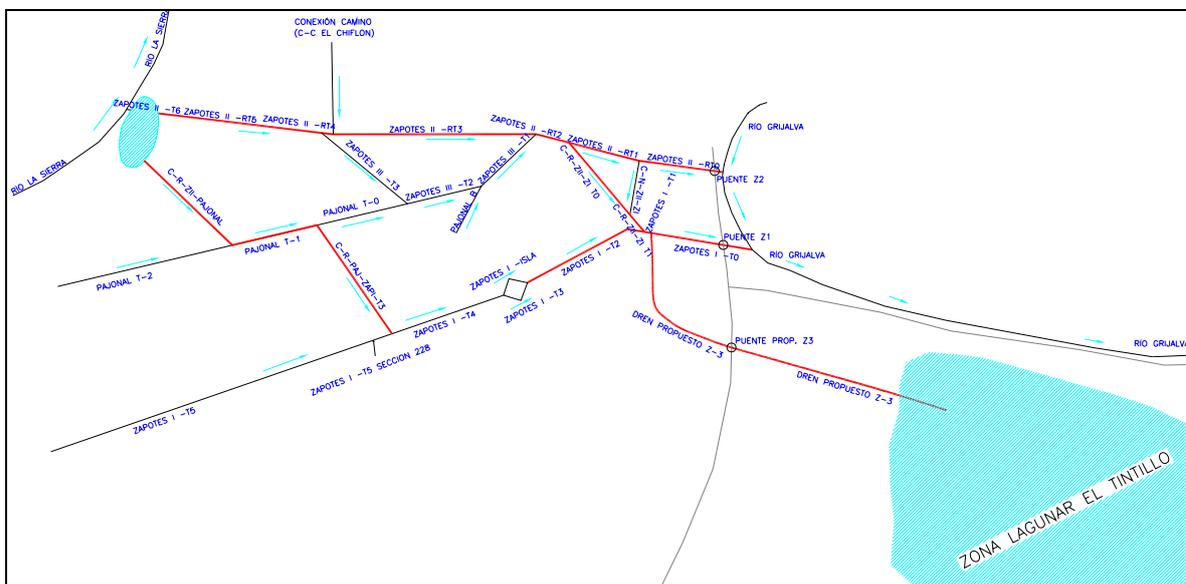


Figura 5.31 Esquema general de los drenes que conforman la alternativa 2. Las líneas de mayor grosor representan a los cauces que se van a modificar.

Como ya se mencionó, para la alternativa 1 se plantearon las dimensiones de los cauces por rectificar, estas mismas dimensiones se mantuvieron para la segunda alternativa, excepto para el nuevo cauce, para el cual se planteó una sección trapezoidal de 45 m de ancho de plantilla. Es una sección compuesta, como la que se muestra en la Figura 5.32.

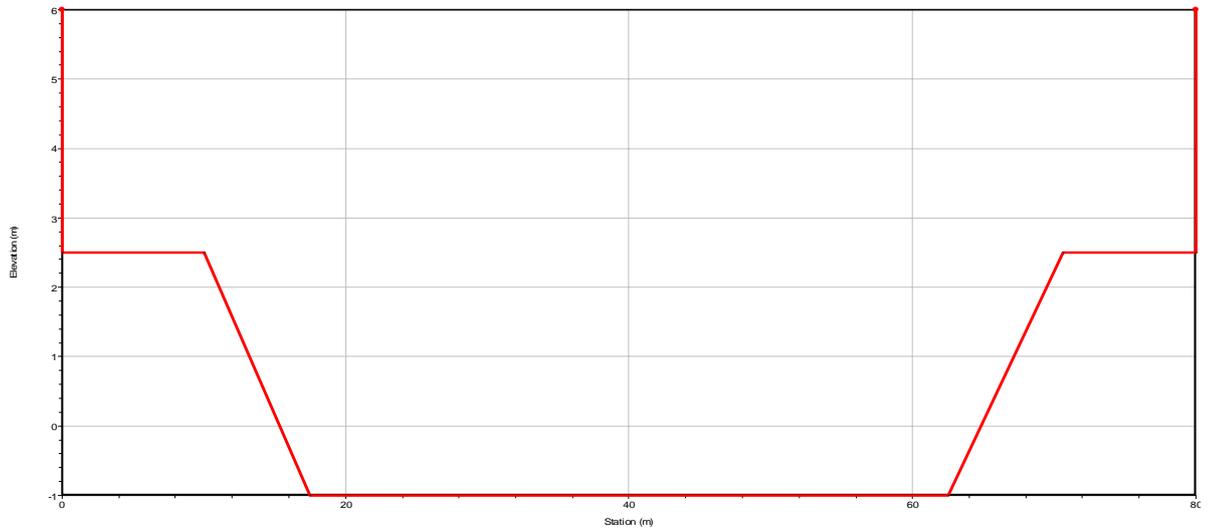


Figura 5.32 Sección tipo del canal propuesto para la conducción propuesta en la alternativa 2.

En el cruce de la carretera Villahermosa-Escárcega se propuso una sección trapezoidal, ocupada en parte por un puente similar a los que se encuentran en los ríos Zapotes I y II. La Figura 5.33 muestra la forma propuesta para dicho puente.

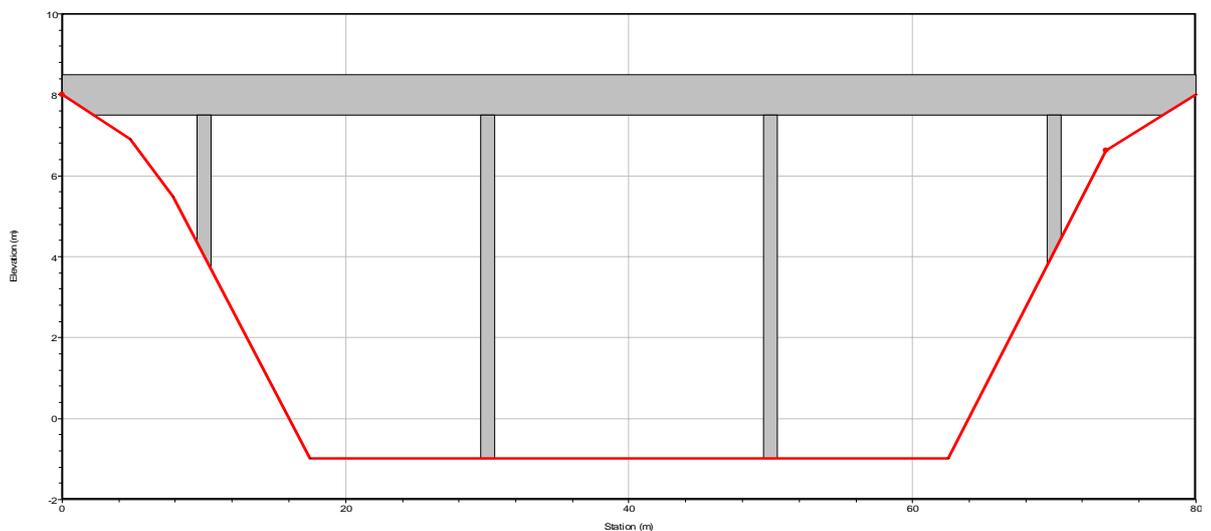


Figura 5.33 Sección propuesta para el puente vehicular que por donde cruzarán los escurrimientos en el canal propuesto en esta alternativa.

Con estas consideraciones generales se procedió a preparar el modelo matemático y a realizar las simulaciones correspondientes, cuyos resultados permitirán realizar una comparativa con los obtenidos en la Alternativa 1 y de esta manera decidir la viabilidad de cada una de ellas.

### 5.6.2.5 Análisis hidráulico de la alternativa 2

Para realizar el análisis hidráulico de esta alternativa, se modificó el modelo matemático agregándose el nuevo cauce propuesto, conforme a lo mencionado en el subcapítulo anterior. Previo a desarrollar las simulaciones, al igual que en la alternativa 1 se plantearon las condiciones iniciales y de frontera.

Al realizar las simulaciones, se obtuvieron como resultado que para la elevación 4.90 msnm en la laguna aguas arriba, los perfiles hidráulicos se optimizan en las uniones y bifurcaciones, así como en los vertedores.

Agua abajo de los puentes, en la confluencia de los ríos Zapotes I y Zapotes II, se obtuvieron niveles de 4.01 en el Zapotes I y 4.42 en el Zapotes II, mientras que en la nueva descarga propuesta (Puente Zapotes III) a la altura de la laguna El Tintillo se alcanza un nivel de 3.60 msnm.

En las figuras siguientes se muestran algunos ejemplos de los perfiles hidráulicos que se obtuvieron de las simulaciones.

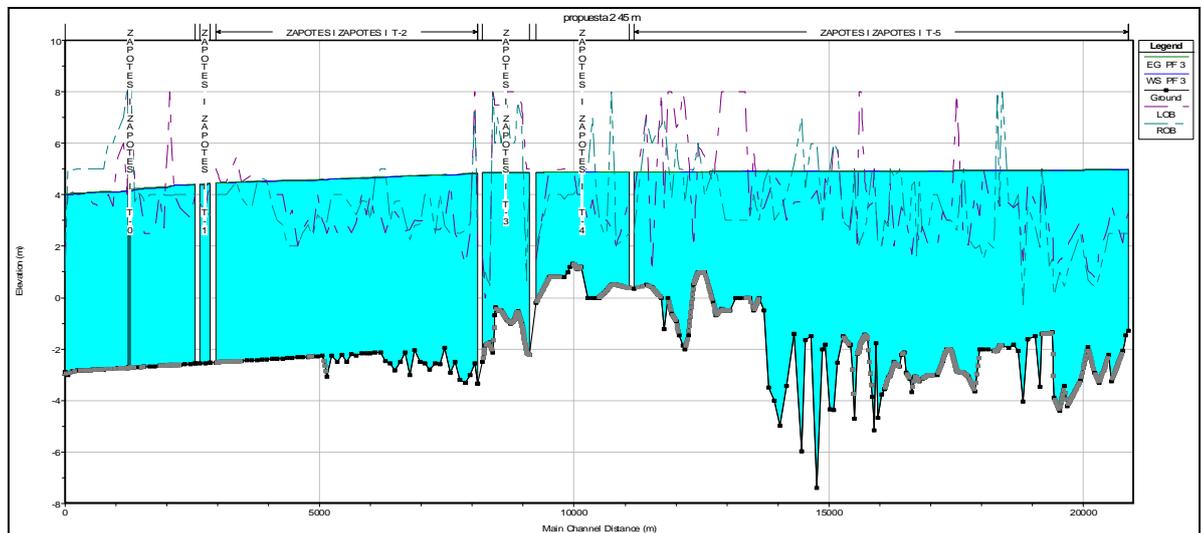


Figura 5.34 Perfil hidráulico del cauce Zapotes I desde su inicio en la estación 308 hasta su descarga en el río Grijalva, alternativa 2.

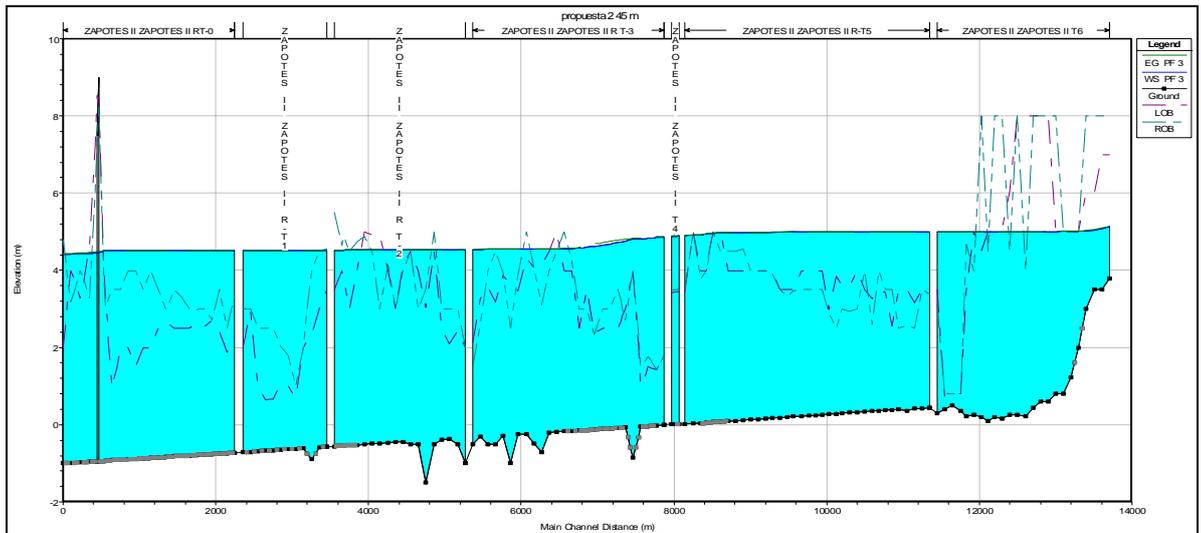


Figura 5.35 Perfil hidráulico del cauce Zapotes II desde su inicio en la laguna Sabanilla hasta su descarga en el río Grijalva, alternativa 2.

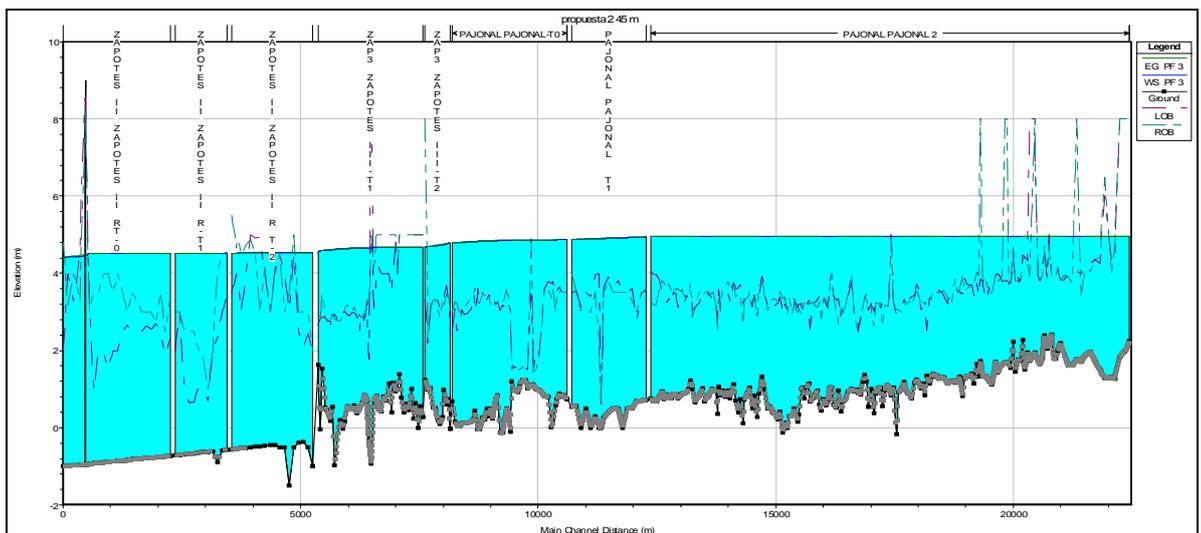


Figura 5.36 Perfil hidráulico de los ríos Pajonal, Zapotes III, Zapotes II hasta la descarga con el río Grijalva, alternativa 2.

Para ilustrar de manera gráfica los resultados de la modelación, se procedió a dibujar en un plano la mancha de inundación que se generaría al presentarse la avenida de diseño. La superficie inundada asciende a 9,306 ha, las cuales en su mayoría tienen tendencia de suelo uso agrícola y ganadero, véase Figura 5.37.

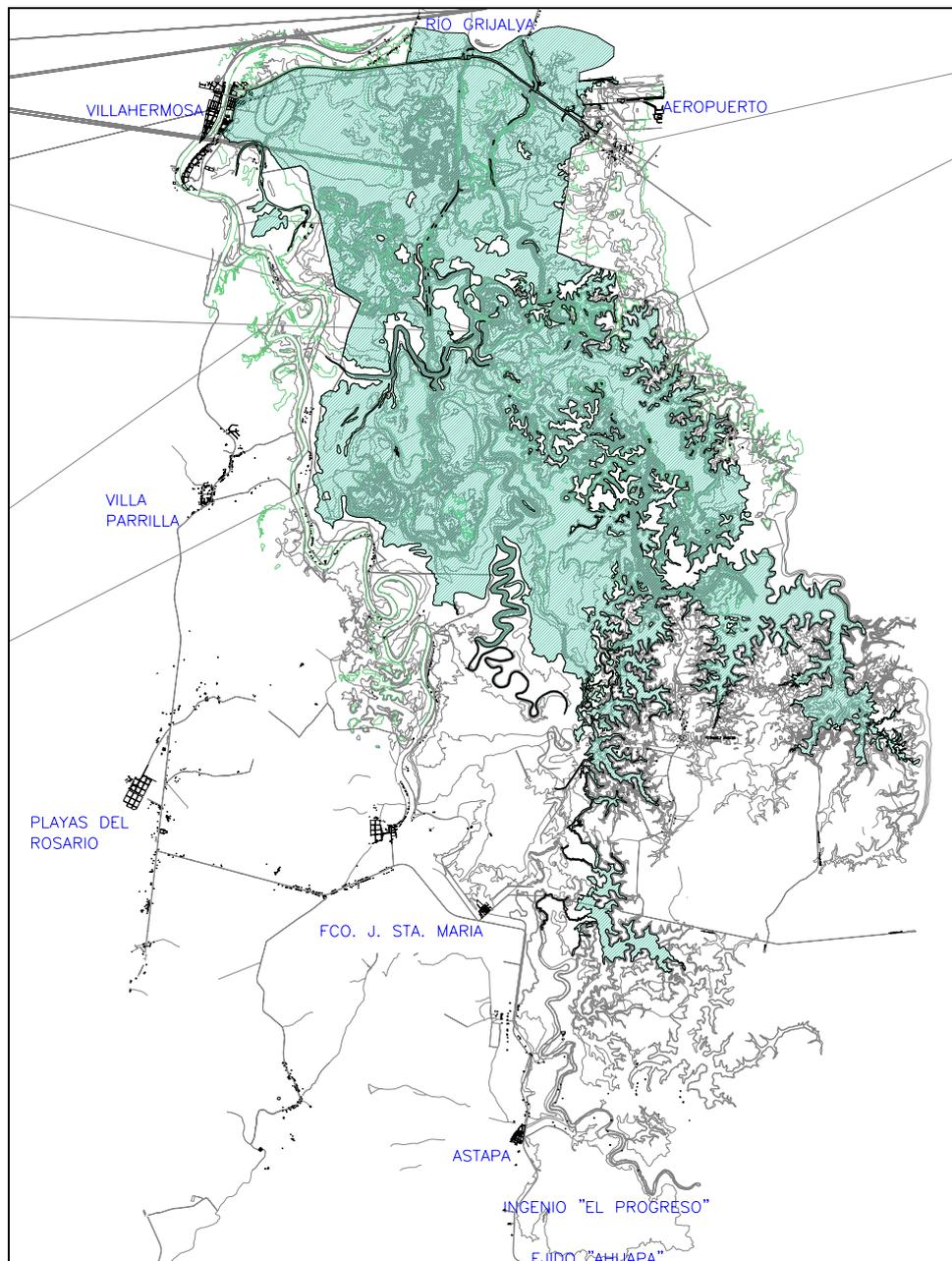


Figura 5.37 Mancha de inundación generada por la avenida de diseño. Superficie inundada 9,306 ha, con tendencia de uso agrícola y ganadero.

Al igual que en las propuestas de las dos alternativas, se pueden seguir planteando una infinidad de estas con variantes en la geometría de los cauces que hagan variar los niveles resultantes; sin embargo, esto depende en gran medida de la experiencia del modelador y de sus conocimientos de la zona de estudio. A fin de poder plantear en el menor número de propuestas la alternativa mas viable tanto técnica como económicamente hablando.

Para poder tener un parámetro de comparación se realiza un presupuesto de la alternativa con las mismas variables usadas en la opción 1,

Tabla 5.24 Presupuesto aproximado de la alternativa 2, con precios de la zona de estudios en el cuarto trimestre del año 2006

CONCEPTO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
TRAZO Y NIVELACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO.	1,810,106.03	m2	3.74	6,769,796.55
RETIRO DE CERCAS DE ALAMBRE.	600.00	m	4.43	2,658.00
DESMONTE, DESENRAICE, DESHIERBE Y LIMPIA DEL TERRENO PARA PROPÓSITOS DE CONSTRUCCIÓN.	93.36	ha	5,160.57	481,785.65
EXCAVACIÓN EN CUALQUIER TIPO DE MATERIAL EXCEPTO ROCA, PARA LA FORMACIÓN DE DRENES HASTA EL NIVEL DE PROYECTO.	4,984,575.49	m3	23.64	117,835,364.55
FORMACIÓN DE VADOS PARA LA CONEXIÓN DE ZONAS LAGUNARES CON EL SISTEMA DE DRENES, INCLUYE EXCAVACIÓN EN CUALQUIER TIPO DE MATERIAL EXCEPTO ROCA, HASTA EL NIVEL DE PROYECTO.	285.00	m	9,462.90	2,696,926.50
CARGA Y ACARREO DE MATERIAL PRODUCTO DE EXCAVACIÓN HASTA UN KILÓMETRO SOBRE CAMINO DE TERRACERÍA, INCLUYE: TIRO DEL MATERIAL EN LAS PARTES BAJAS.	1,165,623.52	m3-km	9.29	10,828,642.51
TENDIDO DE MATERIAL PRODUCTO DE EXCAVACIÓN, DEPOSITADO EN ZONAS BAJAS O DONDE LO INDIQUE LA SUPERVISIÓN. INCLUYE BANDEADO DEL MATERIAL.	4,984,575.49	m3	4.98	24,823,185.93
SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE CERCA DE ALAMBRE DE PÚAS Y POSTES DE MADERA A CADA 3 m, INCLUYE: MATERIALES, HERRAMIENTA, MAMO DE OBRA Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	600.00	m	26.62	15,972.00
CONSTRUCCIÓN DE PUENTE TUBULAR, CON MATERIAL DE RECUPERACIÓN, PARA PASO VEHICULAR, DE 60 m DE LONGITUD, INCLUYE: PINTURA EPÓXICA EN DOS MANOS Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA CONSTRUCCIÓN.	1.00	pza	1,350,000.00	1,350,000.00
CONSTRUCCIÓN DE PUENTE DE CONCRETO, EN CRUCE DE CARRETERA FEDERAL VILLAHERMOSA-ESCÁRCEGA	1.00	pza	8,000,000.00	8,000,000.00
FORMACIÓN DE BORDOS PARALELOS AL DREN	166,800.00	m3	32.00	5,337,600.00
LIMPIEZA GENERAL DE LA OBRA.	933,590.00	m2	0.43	401,443.70
				178,543,375.40

## 5.7 Conclusiones del método.

El estudio realizado como ejemplo de esta tesis, toma como base un modelo numérico elaborado con información topográfica e hidrológica.

Los trabajos topográficos consisten principalmente en levantamiento de secciones transversales de los cauces que se desea modelar y levantamientos batimétricos en lagunas que conforman la llanura de inundación.

Por su parte, los trabajos de hidrología toman como base las curvas de intensidad de lluvia que edita la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; sin embargo, la intensidad de precipitación puede también estimarse con otros métodos, siempre y cuando se tenga la información requerida en las estaciones climatológicas.

A pesar de existir una diversidad de modelos numéricos que simulan el comportamiento del agua en la superficie, el modelo empleado es apropiado, pues sus características son apropiadas para el manejo de flujo unidimensional en cauces y lagunas. Sin embargo, la conformación del modelo matemático y su interpretación de resultados, deben hacerse por personal altamente calificado, con la experiencia y conocimientos en hidráulica e hidrología adecuados para lograr un buen diseño de las obras hidráulicas.

Una vez conformado el modelo matemático de la planicie en estudio, se pudo estimar la superficie total que se inundaría al presentarse la avenida de diseño, así como el nivel máximo alcanzado por el agua en esa zona. También se observó el funcionamiento hidráulico de cada uno de los drenes que componen a la planicie y su comportamiento conjunto con todos los cuerpos lagunares que componen la llanura de inundación.

Con la ayuda del modelo matemático se pudieron plantear varias alternativas de solución a través de las cuales se observó el funcionamiento hidráulico de cada cauce rectificado y de todo el sistema de drenaje de forma integral.

A fin de optimizar la geometría de los cauces, con el modelo matemático es posible realizar las modificaciones que se deseen y conocer de cada uno su funcionamiento hidráulico, en conjunto con todo el sistema.

Para complementar la optimización de las obras que se plantean en la modificación de un sistema de drenaje, es preciso conocer los costos de obra de cada alternativa estudiada; es decir, técnicamente todas las alternativas pueden ser viables, por lo que es necesario contar con otro factor que ayude a determinar la viabilidad de la más factible.

Para el caso del ejemplo estudiado, se plantearon dos alternativas, con las cuales los niveles de inundación bajaron en 1.69 m y 2.36 m, al igual que la superficie inundada, la cual bajó de 13289 Ha a 9494 Ha en la primera alternativa y de 13289 Ha a 9306 Ha en la segunda alternativa; sin embargo, para lograr estas disminuciones, se propusieron obras que se estimaron en un costo de \$ 121,430,937 y \$178,543,375, respectivamente. Este factor de costo, permitió definir que la alternativa mas conveniente es la primera, pues construir un puente y un canal nuevo incrementa el costo hasta en un 48 %, lo cual no es económicamente factible.

Por lo anterior, emplear este método basado en herramientas computacionales transformadas en modelos matemáticos, permiten diseñar geométricamente obras que componen a un proyecto de drenaje pluvial, a través de conocer su funcionamiento hidráulico conjunto.

Con esta técnica y con conocimientos de ingeniería de costos, es posible lograr un diseño óptimo, donde intervengan los factores técnicos y económicos que resultan elementales en el diseño de las obras de ingeniería.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **Conclusiones**

Se obtuvo de forma satisfactoria el gasto de cuenca propia para la zona de estudio, sustentando la obtención de cada uno de los resultados con la teoría expuesta en la tesis.

Los resultados obtenidos en las opciones de solución derivadas de la modelación matemática son los suficientes para elegir entre ellas la alternativa económica más conveniente, ya que técnicamente las opciones mostradas tienen un buen funcionamiento hidráulico.

La conformación del modelo matemático es congruente al comparar los perfiles hidráulicos en cada enlace de los tramos independientes.

La tesis incorpora conocimientos de la ingeniería civil en la rama de la hidráulica, aportando un conjunto de metodologías lógicas para obtener técnicamente los resultados obtenidos.

La tesis se muestra como una medida estructural en la planeación de desastres naturales el realizar obras que tengan sustento en conocimientos científicos, elaborados con técnicas de ingeniería vanguardistas.

Los modelos matemáticos son una herramienta potente y útil para el cálculo del flujo de agua en cauces fluviales, sin embargo no dejan de ser una aproximación a la realidad. Los resultados que de ellos se obtienen deben ser interpretados para incorporarlos a problemas reales.

La facilidad de uso de los modelos comerciales y su atractiva presentación de resultados pueden hacer creer que los resultados que de ellos se obtienen siempre se corresponden con la realidad, lo que muchas veces puede no ser cierto. El obtener un resultado no implica que el cálculo sea correcto. Es necesario un análisis crítico de los resultados obtenidos.

Así con base en lo anterior, se puede hacer las siguientes recomendaciones:

a) Al realizar un estudio de drenaje de canales a superficie libre es importante la utilización de software adecuados para cada caso y que se familiarizarse con su uso para obtener el máximo de ventajas de éste.

b) Se debe de tener especial cuidado con el sistema de unidades que maneja cada software, ya que la mayor parte de ellos son realizados en diferentes países y no siempre usan el sistema internacional como principal sistema de medidas.

c) Es importante obtener un buen registro de lo características físicas de la zona de estudios ya que de ellos resultarán los coeficientes de infiltración, rugosidad, contracción, porosidad, etc.

d) Cualquier dato impreciso en la información básico para la conformación del modelo hará obtener resultados fuera de la realidad o también imprecisos, por esto es importante cerciorar dicha información antes de utilizarla dentro de la modelación hidráulica. Es necesario conocer lo mayormente posible la zona donde se realice un estudio, a fin de obtener información del comportamiento hidráulico de la zona de estudios.

## BIBLIOGRAFÍA

Ray K. Linsey JR, Max A. Koheler, Josph L. H. Paulhus (1977)

Hidrología para ingenieros

Ed. Mac Graw Hill

---

Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays (1993)

Hidrología aplicada.

Ed. Mc Graw Hill

---

Monsalve Sáenz German (1999)

Hidrología en la Ingeniería

Ed Alfaomega

---

Aparicio Mijares Francisco Javier (1999)

Fundamento de Hidrología de Superficie

ED Limusa 7ª reimpresión

---

Richard H French (1988)

Hidráulica de Canales para Ingenieros

Ed. Mc Graw Hill

---

José Antonio Nungaray Núñez

Tesis de maestría Optimización integral del Dimensionamiento de las obras de protección contra inundaciones

Universidad Autónoma de Querétaro

---

Masa Álvarez, José Antonio (1990)

Obras de control contra inundaciones

UNAM

---

Masa Álvarez Jose A. y Franco Victor (1985)

Monografía sobre control de inundaciones

Sria. de Agricultura y recursos hídricos.

---

Summerfield, M. A.(1991)

Global Geomorphology

---

Way, D. S. (1978)

The interaction Between Urbanization and Land. Quality and Quantity in Environmental Planning and Design,

---

Strahler, A.N.

Handbook of Applied Hydrology,

Chow, V.T., New York, McGraw-Hill

---

Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado

Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos

---

Manual Hec Ras for windows (River Analysis System)

US Army Corps of Engineering Center

---

Direcciones electrónicas de consulta

[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)

[www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

[www.oas.org](http://www.oas.org)

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

[www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)

<http://web.usal.es>

<http://www.dot.state.tx.us>

<http://www.flumen.upc.es>

## BIBLIOGRAFÍA

AACC. 1976. *Methods of Analysis*. American Association of Cereal Chemists. Ed. Washington, D.C. EEUUA.

AACC. 1983. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. 8ª Ed. Aprobados en septiembre de 1978, revisados en octubre 1982. St. Paul, MN, EEUUA.

Acevedo, A.E. 2004. Almidón aislado de maíces pigmentados nixtamalizados: caracterización parcial. En Memorias del 1<sup>er</sup> Congreso Nacional de Nixtamalización: Del maíz a la tortilla. Ref009. Querétaro, Qro. México.

Anadha-Raho, M. 1998. *Rheology of Fluids and Semisolids*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. P. 116. San Antonio, Texas, EEUUA.

Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeiffer, V.F., Griffin, E.L. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today*. 14(1):5-13.

AOAC. 1984. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, EEUUA.

ASTM. 1999. Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. **ASTM Book of Standards, General Test Methods, 14.02. Washington, DC, EEUUA.**

Baduí-Dergal, S. 1988. *Química de los alimentos*. Ed. Alhambra Mexicana. Pp. 97-101. Madrid, España.

Barbosa-Cánovas, G., Welti, J. 1995. *Food preservation by moisture control. Fundamentals and applications*. Technomic Publishing Co. Inc. Pp. 62-125. Lancaster, PA, EEUUA.

Barros-Neto, B., Scarminio, I.S., Bruns, R.E. 1995. *Planejamento e otimização de experimentos*. Editora da Unicamp, Pp.80-112. Campinas, Brasil.

Battacharya, M., Hanna, M.A. 1987a. Influence on process and product of variables on extrusion energy and pressure requirements. **J. Food Eng.** 52(6):153-163.

Battacharya, M., Hanna, M.A. 1987b. Kinetics of starch gelatinization during extrusion cooking. **J. Food Eng.** 52:764-766.

Bedolla, S., De Palacios, M.G., Rooney, L.W., Ciehl, K.C., Khan, M.N. 1983. Cooking characteristics of sorghum and corn for tortilla preparation by several cooking methods. *Cereal Chem.* 60:263-268.

Benz, B.F. 1997. Diversidad y distribución prehispánica del maíz mexicano. *Revista Arqueología Mexicana. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.* 5(25):16-23.

Beveridge, G.S.G., Schechter, R.S. 1970. *Optimization: Theory and Practice*. McGraw-Hill. P. 54. Nueva York, EEUUA.

BIOSA. 1996. *Boletín de Información Oportuna del Sector Alimentario*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI y Comisión Nacional de Alimentación, CONAL. Núm. 121. México D.F. México.

Bonfil, G. Editor. 1987. *El maíz, fundamento de la cultura popular mexicana*. Museo Nacional de las Culturas Populares. SEP, Dirección General de Culturas Populares. G.V. Editores, S.A. ISBN 968-29-0326-2. P. 22. México D.F. México.

Bourne, M.C. 1980. *Food texture and viscosity concepts and measurements*. Academic Press. P. 325. Nueva York, EEUUA.

Box, G.P.G., Hunter, W.G., Hunter, J.S. 1999. *Estadística para investigadores*. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos. Ed Reverté, S.A. Pp. 525-550. Barcelona, España.

Braham, J.E., Bressani, R. 1966. Utilization of calcium from home treated maize. *Nutr. Bromatol. Toxicol.* **5**(1):14-19.

Bressani, R. 1972. *La importancia del maíz en la nutrición humana, en América Latina y otros países*. En R. Bressani, J.E. Braham y M. Béhar, eds. Mejoramiento nutricional del maíz. Pub. INCAP, L-3, p. 5-30. Guatemala, Guatemala.

Bressani, R., Paz-y-Paz, R., Scrimshaw, N.S. 1958. Chemical changes in corn during preparation of tortillas. *J. Agric. Food Chem.* **6**:770-777.

Brenner, P.E., Richmond, P., Smith, A.C. 1986. Aqueous dispersion rheology of extrusion-cooked maize. *J. Texture Studies.* **17**(1):51-60.

Bull, B.H. 1971. *An Introduction to the Physical Biochemistry*. 2ª Ed. F.A. Davis Co. Cap. 17. Pp. 425-445. Philadelphia, PA, EEUUA.

Burros, B.C., Young, L.A., Carroad, P.A. 1987. Kinetics of corn meal gelatinization at high temperature and low moisture. *J. Food Sci.* **52**:13-72.

Burton, K.W.C., Nickless, G. 1987. Optimization Via Simplex. Part I. Background, definitions and a simple application. *Chemometrics Intell. Lab. Syst.* **1**:135-149.

Cabrera, L. 2002. *Diccionario de Aztequismos*. 5ª. Ed. Colofón, S.A. ISBN 968-867-038-3. México D.F. México.

Cabrera, E., Durán-de-Bazúa, C., Pineda, J. C., Segurajáuregui, J. S., Vernon, E. J. 1986. Estudio de la difusión acuosa y grado de dextrinización en almidones de maíz sujetos a cocción. *Rev. Acad. Nal. Ing. (Méx.)* **5**(3):83-88.

Camacho, M.E., Nieto-Villalobos, Z., Morales-de-León, J., Durán-de-Bazúa, C. 1998. *Estudios in vivo de dietas de harinas nixtamalizadas y extrudidas de maíz, sorgo y mezclas 60:40 maíz:sorgo con diferentes concentraciones de calcio*. Informe de proyecto de investigación. MA-SO-01-98. Pp. 12-20. UNAM, Facultad de Química. México D.F. México.

Camacho, M.E., Nieto-Villalobos, Z., Morales-de-León, J., Durán-de-Bazúa, C. 2002. *Estudios in vivo de dietas de harinas nixtamalizadas y extrudidas de maíz, sorgo y mezclas 60:40 maíz:sorgo con diferentes concentraciones de calcio* / In vivo studies of diets made with “nixtamalized” and extruded corn, sorghum and mixtures 60:40 corn:sorghum diets with different calcium concentrations. *Industria Alimentaria*. 24(6):4-5, 7-10, 12, 15-21.

Camacho-Parra, M.E. 1999. *Estudio para evaluar el efecto de la concentración de calcio presente en harinas extrudidas y nixtamalizadas de maíz, sorgo y sus mezclas empleando ratas Wistar*. Tesis profesional (QFB, Tecnología de Alimentos). Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Camire, M.E., Camire, A., Krumhar, K. 1990. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Crit. Revs. Food Sci. Nutr.* 29(1):35-57.

Camacho, M.E., Nieto-Villalobos, Z., Morales-de-León, J., Durán-de-Bazúa, C. 2002. Estudios *in vivo* de dietas de harinas nixtamalizadas y extrudidas de maíz, sorgo y mezclas 60:40 maíz:sorgo con diferentes concentraciones de calcio / *In vivo* studies of diets made with “nixtamalized” and extruded corn, sorghum, and mixtures 60:40 corn:sorghum diets with different calcium concentrations. *Industria Alimentaria*, 24(6):4-5,7-10,12,15-21.

Cárdenas, R., Caroti, A., Grosclaude, G., Lerat, L. 1993. *Instrumentation d'un extruder bi vis*. INRA. Servicio de Estudios de Realizaciones Tecnológicas. Pp. 72-80. Nantes, Francia.

Charbonniere, R., Duprat, P., Guilbot, A. 1973. Changes in various starches by cooking extrusion processing. II. Physical structure of extruded products. *Cereal Sci. Today*. 18(5):280-286.

Chen, J., Serafin, F.L., Pandya, R.N., Henryk, D. 1991. Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *J. Food Sci.* 56(1):27-33.

Chiang, B.Y., Johnson, J. A. 1977. Gelatinization of starch in extruded products. *Cereal Chem.* 54:436-443.

Chiang, B.Y., Wang, S.S. 1998. *Advances in Extrusion Technology*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 15-112. San Antonio, Texas, EEUUA.

Colonna, P., Doublier, J.L., Melcion, J.P., Demonredon, F., Mercier, C. 1984. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch, physical and macromolecular modifications. *Cereal Chem.* 61:538-543.

Cravioto, R., Cervantes, M. 1965. Eficiencia proteica de la harina de masa enriquecida con harina de soya y de la adicionada con proteínas de ajonjolí. *Ciencia*. 24:159-161.

Cravioto, Y.O., Cravioto, R., Huerta, R., Guzmán, J. 1950. Comparación del valor biológico de las proteínas del maíz, tortillas y tortilla-soya. *Ciencia*. **10**:145-148.

Crowley, P.R. 1975. *Evaluation of low cost extrusion-cooker for use in less developed countries*. Comunicación personal. UNAM. México D.F. México.

Díaz-León, M.A., Cruz-León, A. Compiladores. 1998. *Nueve mil años de agricultura en México. Homenaje a Efraím Hernández Xolocotzi*. 1ª. Ed. Grupo de Estudios Ambientales, A.C. Pub. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN 968-884-514-0. Chapingo, Méx. México.

Díaz-Núñez, M.C. 1999. Estudio de prefactibilidad técnico-económica de una línea de extrusión alcalina para harinas y/o masas precocidas de maíz para tortillas. **Tesis profesional (Ingeniería Química)**. Facultad de Química, UNAM. Pp. 15-59. México D.F. México.

Diosady, L., Paton, D., Rosen, N., Rubin, L.J., Athanassoulis, C. 1985. Degradation of wheat starch in a single screw extruder: Mechanic-Kinetic breakdown of cooked starch. *J. Food Sci.* **50**:1697-1699.

Dowschrak, E. 1981. Nonenzymatic browning and its effect on protein nutrition. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **13**:1.

Durán, C. 1972. *Proyecto de investigación interno: Extrusión de maíz / Internal Research Project: Corn extrusion*. Departamento de Ciencias de la Nutrición. Universidad de California. Berkeley, EEUUA.

Durán, C. 1977. *Sorgo como fuente potencial de alimentos. Mezclas de maíz y sorgo como productos tradicionales*. Informe interno de investigación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Chapingo, Méx. México.

Durán, C. 1978. *Procedimiento para cocer maíz por medio de extrusión*. Pat. 173038. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Departamento de Patentes. Dirección General de Invenciones y Marcas. México D.F. México.

Durán, C. 1987. *Reaprovechamiento de los efluentes de la industria del maíz*. Informe final de Proyecto. Pub. UNAM- PNUMA. Impresora Azteca, S.A de C.V. ISBN 968-36-1644-5. México D.F. México.

Durán, C., Guerra, R. 1980. Los centros de investigación y educación superior y el desarrollo de agroindustrias, dos problemas tipo. Parte II. Nuevos productos agrícolas procesados. *Tecnol. Alimen. (Méx.)*. **5**(6):4-16.

Durán, C., Guerra, R., Sterner, H. 1979. Extruded corn flour as an alternative to lime heated corn flour for tortilla preparation. *J. Food Sci.* **44**:940-941.

Durán-de-Bazúa, C. 1986. Design basis for rotational biological reactors used in aerobic wastewater treatment systems. En Proceedings *III World Congress of Chemical*

**Engineering.** Japan Society of Chemical Engineers. Septiembre 21-25. Pp. 819-822. Tokio, Japón.

Durán-de-Bazúa, C. 1987. Effluents of the food industry in Mexico: Environmental impacts on soil and water resources and possible solution using the biotechnological approach. Case problem: The corn industry. En **Biotechnology Applied to Environmental Problems. Global Bioconversions**. Ed. D.L. Wise. Vol. II. Chapter 4. Pp. 75-119. Ed. D.L. Wise. CRC Press Inc. ISBN 0-8493-4509-x. Boca Raton, FL. EEUUA.

Durán-de-Bazúa, C. 1988. Una nueva tecnología para la extrusión alcalina de maíz y sorgo. **Monografía Tecnológica No. 2**. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. O.E.A. 71 pags. Pub. UNAM-Proy. Multinal. Tecnol. Alimentos. ISBN 968-36-0576-1. México D.F. México.

Durán-de-Bazúa, C. 1998. Concepts on energy savings in the agroindustry-food chain. Sustainable agriculture for food, energy, and industry: strategies towards achievement. En. Proceedings of the International Joint Conference Held in Braunschweig, RFA. Panel session "**Energizing the food production chain for the attainment of food security**". Eds. N. El Bassam, R.K. Behl, B. Prochnow. Vol. 2, pp. 722-725. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Society of Sustainable Agriculture and Resource Management, Hisar, India, Federal Agricultural Research Center, Braunschweig, RFA. Junio 22-28, 1997. James X James Sci. Pub. Ltd. ISBN 1 873936 76 1. Londres, Inglaterra.

Durán-de-Bazúa, C., Rangel-Silva, J. M., Maya-Jasso, A., Gaitán-Zamora, N. 2004. Patentes del PIQAYQA, propuestas de ayuda social de la UNAM. En **Exposición Sobre Inventiones E Innovaciones Tecnológicas IMPI-UNAM**. Pabellón Banamex. Secretaría de Economía. Noviembre 1-5. México D.F., México.

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 1987. **Die biologische Behandlung und Verwertung von Abwässern der Maisverarbeitung in Mexiko**. Reihe 15: Umwelttechnik. Nr. 51. VDI Verlag. Düsseldorf, Alemania.

Eiras, S.P., Cuelbas, C.J., de Andrade, J.C. 1994. Um Estudo Comparativo sobre a Eficiência de Estratégias Quimiométricas de Otimização. **Química Nova**. 16:216-219.

Elwood, F., Caldwell, R.B., Fast, Ch., Lauhoff, R., Miller, C. 1989. **Unit operation and equipment in blending and cooking in breakfast cereal and how they are made**. Caldwell Eds. AACC. Pp. 35-120. St Paul, Minnesota, EEUUA.

Fabila, G.R. 1991. **Métodos numéricos en diseño de experimentos industriales**. Apuntes de la Cátedra de Diseño de Experimentos impartida por el Ing. Gilberto Fabila, Profesor "A" del Posgrado en Ciencias de Alimentos (Ingeniería). Departamento de Alimentos y Biotecnología, Facultad de Química. Pp. 80-102 UNAM, México D.F. México.

Fisher, R.A. 1935. **The Design of Experiments**. Oliver & Boyd. Pp. 25-110. Edimburgo, Gran Bretaña.

Fito, P., Ortega-Rodríguez, E., Barbosa-Canovas, G. 1998. **Food Engineering**. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 60-78. San Antonio, Texas, EEUUA.

- Flory, P.J. 1971. *Principles of Polymer Chemistry*. Cornell University Press. Pp.86-118. Ithaca, NY, EEUUA.
- Frame, N.D. 1998. *Technology of Extrusion Cooking*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 96-114. San Antonio, Texas, EEUUA.
- Fryer, P.J., Pyle, D.L., Rielley, D.C. 1998. *Chemical Engineering for the Food Industry*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 92-104. San Antonio, Texas, EEUUA.
- Gómez, M.H., Aguilera, J.M. 1983. Changes in starch fraction during extrusion cooking. *J. Food Sci.* **48**:378-385.
- Gómez, M.H., Aguilera, J.M. 1984. A physicochemical model in extrusion of corn starch. *J. Food. Sci.* **49**:40-43.
- Gómez, M.H., McDonough, C.M., Rooney, L.W., Waniska, R.D. 1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *J. Food Sci.* **54**:330-336.
- Gómez, H.M., Waniska, R.D., Rooney, L.W. 1992. Corn starch changes during tortilla and tortilla chip processing. *Cereal Chem.* **69**: 275-279.
- González-Dávalos, M.L., Rojas-Molina, J.L., Fernández-Muñoz, J.L., Rodríguez García, M.E. 2004. Efecto de la temperatura, tiempo de cocción y tiempo de reposo sobre la calidad nutricional de harinas de maíz elaboradas mediante el proceso tradicional de nixtamalización. En Memorias del 1<sup>er</sup> Congreso Nacional de Nixtamalización: Del maíz a la tortilla. Ref 073. Querétaro, Qro. México.
- Harma, S.K., Mulvaney, S.J., Rizvi, S.H. 1998. *Food Process Engineering*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 74-145. San Antonio, Texas, EEUUA.
- Harper, J.M. 1981. *Extrusion of foods*. CRC Press Inc. Pp.10-185. Boca Ratón, Florida, EEUUA.
- Harper, J.M. 1988. Effects of extrusion processing on nutrients. En *Nutritional Evaluation of Food Processing*. Eds. Karmas, E., Harris, R.S. Ed. Avi Book Van Nostrand Reinhold Co. Pp. 10-185. Nueva York, EEUUA.
- Hartel, R.W., Howell, T.A., Hyslop, D.B. 1998. *Math Concepts for Food Engineering*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 10-150. San Antonio, Texas, EEUUA.
- Heldman, D.R., Singh, R.P. 1981. *Food Processing Engineering*. Avi Pub. Co. Pp. 82-189. Westport, CN, EEUUA.
- Hernández-Ayala, E., Nieto-Villalobos, Z., Durán de Bazúa, C. 1996. Determinación del efecto de la nixtamalización y la extrusión alcalina sobre el valor nutricio en tortillas de maíz y sorgo, parte II: Contenido de triptofano y niacina. *Industria Alimentaria*. **18**(3):45-48.

Hernández-Xolocotzi, E. 1990. Comunicación personal. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Méx. México.

Hsieh, F., Peng, I.C., Huff, H.E. 1990. Effects of salt, sugar, and screw speed on processing and product variables of cornmeal extruded with a twin-screw extruder. *J. Food Sci.* **55**(1):65-70.

Illescas, R. 1943. La teoría química de la formación del nixtamal. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* (Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural). **4**(3-4):129-136.

Johnson, B.A., Rooney, L.W., Khan, M.N. 1980. Tortilla-making characteristics of micronized sorghum and corn flours. *J. Food Sci.* **45**:671-674.

Jugenheimer, R.W. 1981. *Maíz. Variedades mejoradas, métodos de cultivo y producción de semillas*. Limusa. ISBN 968-1221-2. Pp. 12-25. México D.F. México.

Khan, M.N., Desrosiers, M.C., Rooney, L.W., Morgan, R.G., Sweat, V.E. 1982. Corn tortillas: evaluation of corn cooking procedures. *Cereal Chem.* **59**:279-284.

Kokini, J.L., Chi-Tang Ho, Makun-Kwar, V. 1998. *Food Extrusion Science and Technology*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 116-164. San Antonio, Texas, EEUUA.

Labuza, T.P. 1972. Nutrient losses during drying and storage of dehydrated foods. *Crit. Rev. Food Technol.* **9**(1):217-218.

Legret, M., Divet, L. 1988. Application of factorial-designs in optimization of the determination of lead by electrothermal atomization. *Analysis*, **16**:97-106.

Levenspiel, O. 1982. *Chemical Reactions Engineering*. John Wiley and Sons. Pp. 20-110. Nueva York, EEUUA.

Levenspiel, O. 1998. *Ingeniería de las reacciones químicas*. Ed. Reverté. Pp. 103-173, Barcelona, España.

Linko, P., Linko, Y.-Y., Olkku, J. 1983. Extrusion cooking and bioconversions. *J. Food Eng.* **2**:24.

López-Munguía, A., Segurajáuregui, J. 1986. Efecto de la variedad de maíz en la cinética de nixtamalización. *Tecnol. Aliment. (Méx)*. **21**(5):20-24.

Lund, D., Wirakartaksumah, M.A. 1984. Model of starch gelatinization phenomena. En *Engineering and Food*. Vol. 1. Engineering Science in the Food Industry. Ed. McKenna, B.M. Institution of Engineers of Ireland. Agricultural Engineering Division. Pp. 25-92. Republic of Ireland.

Mackey, L.K., Ofoli, R. 1990. Rheological properties of corn starch doughs at low to intermediate moisture. *J. Food Sci.* **55**(2):417-423.

- Malli, E., Grossmann, M.V.E. 2001. Preparation of acetylated distarch adypates by extrusion. **Lebsmn-Wiss. u.-Technol**, **34**:384-389.
- Matthey F.P., Milfor, A.H. 1997. Physical and functional properties of twin-screw extruded whey protein, concentrate-corn starch blends. **Lebsmn-Wiss. u.-Technol**, **30**:359-366.
- Matz, A.S. 1962. **Food Texture**. The AVI Pub. Co. Inc. Pp. 46-80. Wesport, CN, EEUUA.
- Mercier, C., Feuillet, P. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion cooking of cereal products. En **Polysaccharides in Foods**. Eds. Blanchard, J.M., Mitchel, J.R. P. 100. Butterworths, Londres, Gran Bretaña.
- Mercier, C., Charboniere, R., Gallandt, D., Guilbot, A. 1979. Structural modification of various starches by extrusion cooking with a twin screw French extruder. En **Polysaccharides in Foods**. Eds. Blanchard, J.M., Mitchel, J.R. P. 153. Butterworths, Londres, Gran Bretaña.
- México, Enciclopedia de. 1978. **Tomo VIII (Maíz), Tomo XII (Tortillas)**. 3ª. Ed. Porrúa, México D.F. México.
- Miller, R.C. 1985. Moisture extrusion: Effects of cooking moisture in food characteristics. **J. Food Sci.** **50**:249-253.
- Molina, M.R., Letona, M. y Bressani, R. 1977. Drum-drying for the improved production of instant tortilla flour. **J. Food Sci.**, **42**:1432-1434.
- Montañez, C.H. 1991a. **El maíz, política institucional y crisis agrícola**. Banco de México, Organismo para la Difusión de la Agricultura. No. de clasificación SB191. M2/M65. Pp. 10-35. México D.F. México.
- Montañez, C.H. 1991b. **Cultivos de maíz y frijol en México, participación del FIRA (Fondo Institucional de Recursos Agrícolas) en su producción**. Banco de México, Organismo para la Difusión de la Agricultura. No. de clasificación SB191. M2/M68. Pp. 42-54. México D.F. México.
- Moreira, T., Lo, R.G., Catell, R., Pérez, E. 1999. Rheological properties of corn meal dough. **Food Sci. Technol. Intl.** **5**(1):59-65.
- Moshenin, N.N. 1973. **Physical properties of plants and animal materials**. Vol.1. Part II. Gordon & Breach Inc. Pp. 26-54. Nueva York, EEUUA.
- Muller, H.G. 1979. **Uses of the amylograph in the baking industries**. Artículo de origen industrial incluido en el manual del uso del viscoamilógrafo Brabender por el fabricante. Duisburg, Alemania.
- Nelder, J.A., Mead, D.R. 1965. A simplex method for function minimization. **Computer J.** **7**:308-312.

NOM-F46-S-1980. Sepafin. 1980. Norma Oficial Mexicana para harina de maíz nixtamalizado. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas. México D.F. México.

NOM. 2003. Productos y servicios. Masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración y establecimientos donde se procesan. Especificaciones sanitarias. Norma Oficial Mexicana NOM-187-SSA1-2001. Diario Oficial de la Federación. México D.F. México.

Norad, M.N., Iskander, F.Y., Rooney, L.W., Erp, C.F. 1986. Physico-chemical properties of alkali-cooked corn using traditional and presoaking procedures. *Cereal Chem.* 63:255-259.

Owusu-Anasah, J., Van de Voort, F.R., Stanley, D.W. 1983. Physicochemical changes in corn starch as a function of extrusion variables. *Cereal Chem.* 60:319.

Ott, D. B. 1992. *Manual de laboratorio de ciencia de alimentos*. Práctica 3: Amilosa/amilopectina - Gelatinización y gelificación. P. 64. AMV Ediciones, Madrid, España.

Padmanabhan, M., Bhattacharya, M. 1993. Effect of ingredients on the rheological properties of extruded corn meal. *J. Food Eng.* 18(4):335-349.

Pedrero D.L., Pangborn, R.M. 1989. *Evaluación sensorial de los alimentos. Métodos analíticos*. Ed. Alhambra. Madrid, España. 1ª. Ed. Pp.113-152. México D.F. México.

Pérez, R., Rodríguez, J. 1988. Estudio de las características reológicas de tortillas de maíz sorgo y sus mezclas. *Tesis profesional (QFB, Tecnología de alimentos)*. Facultad de Química, UNAM. Pp. 10-94 México D.F. México.

Porter, R.S., Casale, A. 1995. Recent studies of polymer reactions caused by stress. *Polymer Eng. Sci.* 25:129-156.

Pravisani, C.I., Califano, A.N., Calvelho, A.A. 1985. Kinetics of starch gelatinization in potato. *J. Food Sci.* 50:657-660.

Raffi, J.J., Agnel, J.L. 1993. Influence of the physical structure of irradiated starches and their electron spin resonance kinetics. *J. Phys. Chem.* 87:2369-2373.

Rangel, M., Durán-de-Bazúa, C. 1992. **Sistema mecánico para procesar semillas gramíneas**. Registro: Sept. 18, 1992. Cesión irrestricta de derechos a la UNAM. Patente Núm. 178789. Dirección General de Invenciones y Marcas. Departamento de Patentes. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.

Rangel-Silva J. M. 1996. Diseño de un sistema de máquinas para el procesamiento de granos y semillas. estudio de caso: La semilla de amaranto. *Tesis profesional* (Diseñador Industrial). Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón, UNAM. Febrero 9. México D.F. México.

Rangel-Silva, J. M., Calderón Villagómez, H. E., Durán-de-Bazúa, C. 1996. Diseño de una máquina limpiadora, acondicionadora y reventadora de granos. En **Taller Cuba-México. Potencialidades y usos del amaranto**. Universidad de La Habana, Cuba y UNAM, México. Abril 11-12. La Habana, Cuba.

Rangel-Silva, J.M., Cruz-Chávez, A., Calderón-Villagómez, H.E., Durán-de-Bazúa, M. C. 1995. Procesamiento de maíz, sorgo y amaranto para la elaboración de alimentos reventados tradicionales. *Informe Técnico de Proyecto MA-AM-01-95*. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 153 pags. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Rangel-Silva, J.M., Sánchez-Tovar, S.A., Calderón-Villagómez, H.E., Durán-de-Bazúa, M.C. 1992. Procesamiento de amaranto y maíz para la elaboración de alimentos tradicionales. *Informe Interno de Trabajo MA/AM-01-92*. UNAM-PIQAYQA. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím. Amb. 57 pags. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Rangel-Silva, M., Sánchez-Tovar, S.A., Durán-de-Bazúa, C. 1994. El maíz (*tlaolli*) y el amaranto (*huautli*), dos granos vitales para los mexicanos: su procesamiento usando tecnologías más limpias. En **Primer Congreso Mexicano de Etnobiología**. Asociación Etnobiológica Mexicana, A.C. y Universidad Autónoma del Estado de México. Agosto 10-12. Toluca, Mex., México.

Reguera, E., Mendoza S., Martínez B. R., Ortiz P., De la Luz, M.J. 2001. Kinetic Approach to Nixtamalization of Corn Pericarp. *Cereal Chem.* **78**(2):107-110.

Reguera, E., Valor, A., González, R., Ortiz, P., Fernández, J., Hernani, Yee. 2004. On the physicochemical changes in the corn grains during its cooking in an aqueous solution of Ca(OH)<sub>2</sub>. En Memorias del **1<sup>er</sup> Congreso Nacional de Nixtamalización: del Maíz a la Tortilla**. Ref 005, Querétaro, Qro. México.

Reyes-Castañeda, P. 1986. *Fitogenética básica aplicada*. Limusa. ISBN-968-4653-02102. Pp. 14-31. México D.F. México.

Reyes-Castañeda, P. 1990. *El maíz y su cultivo*. Limusa. ISBN-968-MZ R495. Pp. 13-28. México D.F. México.

Ríaz, N. M. 1998. *Extruders in Food Applications*. Ed. Culinary and Hospitality Industry Publication Services. Pp. 116-194. San Antonio, Texas, EEUUA.

Rizvi, S.S.H., Mittal, G.S. 1993. *Experimental Methods in Food Engineering*. Van Nostrand-Reinhold. Pp. 100-154. Nueva York, EEUUA.

Robles-de-la-Torre, R.R. 1986. Cambios fisicoquímicos del almidón en la nixtamalización del maíz. *Tesis de Maestría* (Ingeniería Bioquímica en Alimentos). Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. México D.F. México.

Robles, R.R., Murray, E.D., Paredes-López, O. 1988. Physico-chemical changes of maize starch during the lime-heat treatment for tortilla making. *J. Food Sci.* **23**:91-98.

Rojas, E. Gutiérrez-Cortés, J., Pons, L., Rodríguez, M. E. 2004. Composición nutrimental de harinas de maíz QPM, en función de la temperatura de cocimiento y el tiempo de reposo. En Memorias del **1<sup>er</sup> Congreso Nacional de Nixtamalización: del Maíz a la Tortilla**. Ref 012. Querétaro, Qro. México.

Routh, M.W., Swartz, P.A., Denton, M.B. 1977. Performance of the super modified simplex. *Anal. Chem.* **49**:1422-1428.

Rubio, M.J. 1972a. *Tortilla and process using epichlorohydrin*. US Patent 3,690,893. Washington, DC, EEUUA.

Rubio, M.J. 1972b. *Tortilla and process using carboxylic acids and their anhydrides*. US Patent 3,694,224. Washington, DC, EEUUA.

Rubio, M.J. 1973. *Tortilla and process using hydrophylic inorganic gels*. US Patent 3,709,696. Washington, DC, EEUUA.

Rubio, M.J. 1974a. *Tortilla and process using sorbic acid and its salts*. US Patent 3,853,997. Washington, DC, EEUUA.

Rubio, M.J. 1974b. *Tortilla and process using methyl, ethyl, butyl and propyl esters of parahydroxy benzoic acid*. US Patent 3,853,998. Washington, DC, EEUUA.

Rubio, M.J. 1975. *Tortilla and process using acetic and propionic acid*. US Patent 3,859,449. Washington, DC, EEUUA.

Saldaña, G., Brown, H.E. 1984. Nutritional composition of corn and flour tortillas. *J. Food Sci.* **49**:1202-1203.

Saldaña-Morales, M.V. 1987. Comparación química y biológica de mezclas de maíz y sorgo nixtamalizadas y extrudidas. *Tesis profesional (QFB, Tecnología de alimentos)*. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Sánchez-Tovar, S. 1993. Estudio del uso de modelos de superficie de respuesta para correlacionar características sensoriales y de textura de masas y tortillas elaboradas con harinas de maíz extrudidas alcalinamente. México D.F. *Tesis de Maestría en Ciencias de los Alimentos (Ingeniería de Alimentos)*. Facultad de Química, UNAM. Pp. 1-110. México D.F. México.

Sánchez-Tovar, S.A., Calderón, H.E., Durán-de-Bazúa, C. 1997. Alkaline extrusion of cornmeals for tortilla production: Rheological and sensory relationships. En *ENGINEERING AND FOOD, ICEF 7*. R. Jowitt, Ed. Pp. H57-60. Parte 2. International Association for Engineering and Food, European Society of Agricultural and Mechanical Engineers. ISBN 1-85075-814-X. Sheffield, Inglaterra.

Sánchez-Tovar, S., Calderón-Villagómez, H., Durán-de-Bazúa, C. 1993. *Extrusión alcalina de maíz blanco y amarillo, evaluaciones reológicas y sensoriales de masas y tortillas*. Vol. 3. Serie: Tecnologías más limpias. Pub.Prog. Ing. Quim. Amb. Pp- 20-184. Facultad de Química, UNAM. ISBN 968-36-3322-6. México D.F. México.

Sánchez-Tovar, S., Díaz-Nuñez, C., Durán-de-Bazúa, C. 2001. Factibilidad económica de una línea de producción de harina de maíz para tortillas usando extrusión termoalcalina. *Rev. IMIQ (Méx)*, **42**(1-3):24-33.

Sánchez-Tovar, S., Díaz-Nuñez, C., Durán-de-Bazúa, C. 1999. Evaluación técnico-económica de una línea de producción de harinas y masas para tortillas de maíz elaboradas por extrusión termoalcalina. Presentado en la **XXXIX Convención Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos**. Sesiones Técnicas. IMIQ, Directiva Nacional. Octubre 6-8. León, Gto., México.

Sánchez-Tovar, S., Durán-de-Bazúa, C. 1998. Modelos de superficie de respuesta para determinar la calidad molinera y reológica de las harinas de maíz extrudidas alcalinamente. En: Memorias del **XIX Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería**. Pp. 24-31. Acapulco, Guerrero, México.

Sánchez-Tovar, S., Durán-Domínguez-de-Bazúa, C. 2005. *Proceso por extrusión termoalcalina y/o ácida de granos y esquilmos agroindustriales para producir sémolas y/o harinas precocidas en forma de hojuelas para la elaboración de masas y tortillas y de otros productos alimenticios*. Patente. Solicitud de Registro: Junio 16, 2005. IMPI. PA/a/2005/006459 (En trámite). México D.F. México.

Sánchez-Tovar, S.A., Salazar-Zazueta, A., Mena-Iniesta, B., Durán-de-Bazúa, M. 2004. Viscoamylographic studies on *zea mays* corn starch (mexican white tuxpeño maize) partial gelatinization with calcium hydroxide. *Starch-Stärke*. **56**(11):526-534.

Sánchez-Tovar, S.A., Salazar-Zazueta, A., Mena-Iniesta, B., Durán-de-Bazúa, C. 2000. Cinética de reacción para la gelatinización bajo tratamiento térmico alcalino del almidón de maíz en un extrusor considerado como un reactor continuo de flujo de tipo pistón. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. **15**(2):90-99.

Schweizer, T.F., Reimann, S., Solms, J., Eliasson, A.C. 1986. Influence of drum drying and twin screw extrusion in wheat carbohydrates. A comparison between of wheat starch and extractions of different flours. *Cereal Sci*. **4**:249-260.

Seethammraju, K., Bhattacharya, M. 1994. Effect of ingredients on the rheological properties of extruded cornmeal. *J. Rheol.* **38**(4):1029-1044.

Senouci, A., Smith, A.C. 1988. An experimental study of food melt rheology. I. Shear viscosity using a slit die viscometer and a capillary rheometer. *J. Rheol. Acta*. **27**(5):546-554.

Spendley, B. W., Hext, G.R., Himsforth, F.R. 1962. Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation. *Technometrics*. **4**:441-461.

Trejo-González, A. 2004. Nuevos aportes científicos sobre el proceso de nixtamalización, sus modificaciones y aplicaciones. Memorias del **1<sup>er</sup> Congreso Nacional de Nixtamalización: Del maíz a la tortilla**. Ref 074. Querétaro, Qro. México.

Trejo-González, A., Fera-Morales, A., Wild-Altamirano, C. 1982. The role of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. *Adv. Chem. Ser.* **198**:245-263.

Ureta-Barrón, E. 1989. *Polímeros, estructura, propiedades y aplicaciones*. Pp. 8-54. Limusa. México D.F. México.

Uribe-Velasco, M. 1985. *Los polímeros (Síntesis y caracterización)*. Noriega Editores. Pp. 45-79. México D.F. México.

Vásquez-Reyes, V.M., Martínez, L., Durán de Bazúa, C. 1996. Determinación del efecto de la nixtamalización y la extrusión alcalina sobre el valor nutritivo en tortillas de maíz y sorgo, parte I: Contenido de tiamina, niacina y riboflavina. *Industria Alimentaria*. **18(2)**:24-25,28-29,31-34.

Vázquez, L. F., Ramírez, W. B., Cinco, M. F. J., Mercado, R. J. N. 2001. **Efecto del tiempo de cocimiento alcalino sobre la textura de la masa de la tortilla de maíz.** *Biociencia (Hermosillo, Mex.)*. **2(3)**:98-102.

Vergnes, B., Villemare, J.P. 1993. *Étude du comportement visqueux de l'amido fondu en phase peu hydratée*. Centre de Mise en Forme des Matèriux, UA 852. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Pp.152. Valbonne, Francia.

Vidal, Q. R. I. 2001. Role of oil on physical properties of corn masa flours and sensory characteristics of corn tortillas. *Food Proc. Preserv.* **25**:1-14.

Villegas, E., Ortega, E., Bauer, R. 1990. *Métodos químicos usados en CIMMYT para determinar la calidad proteínica y nutricional de los cereales*. Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y el Trigo. Pp. 4-30. El Batán, Méx. México.

Wankhede, D., Umadevi, S. 1987. Determination of some physicochemical properties of pyrodextrines of rogi, wheat, jowar, and rice starches. *Starch/Staerke*. **34**:162-165.

Wellhausen, E.J., Roberts, L.M., Hernández-Xolocotzi, E., con la colaboración de Mangelsdorf, P.C. 1951. *Razas de maíz en México. Su origen, características y distribución*. Folleto Técnico No. 5. SAG, OEE. 237 pags. México D.F. México.

Zurima, G., Pérez, E. 2002. Evaluation of lentil starches modified by microwave irradiation and extrusion cooking. *Food Research International*. **35(5)**:415-420.

#### CITAS DE REDES INTERNACIONALES (INTERNET)

Anónimo. 2006a. Molécula de amilosa ([www.um.es/molecula/gluci05.htm](http://www.um.es/molecula/gluci05.htm))

Anónimo. 2006b. Molécula de amilopectina ([www.cepis.ops-oms.org/eswww/.../anexo4.html](http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/.../anexo4.html))

ARCRIDE. 1997. Excelente bactericida contra el “*Vibrio cholerae*”. En experimentos de campo y de laboratorio se encontró que el hidróxido de calcio, mejor... <http://www.arcride.edu.ar/servicios/comunica/vibrio.htm>

ASTM. 2005. Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry (Modificado de 1999). <http://webstore.ansi.org/ansidocstore/product.asp?sku=ASTM+E1269%2D05>

Barron, C., Buleon A., Colonna, P., Del Valle, G. 2000. Structural modifications of low hydrated pea starch subjected to high thermomechanical processing. Unité de Recherches

sur Polysaccharides leurs Org. Institute National de la Recherche Agronomique, Nantes, Francia. Carbohydrate Polymers, 43, 171-181. Elsevier, [www.elsevier.com/locate/Carbpol](http://www.elsevier.com/locate/Carbpol)

Calderón, G., Domínguez, S. 1997. Extrusión de una mezcla de maíz-salvado, selección de los parámetros de operación mediante superficies de respuesta. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Bioquímica. México D.F.

<http://bios.encb.ipn.mx/server/publica/analencb/analencb/bespa.htm>

Cremana. 1997. División Industrial (70% Productos Presentaciones (Division C...)). **Summary:** DIVISION CREMENA, CREMENA, FÉCULA DE MAÍZ NATURAL 1/20 /750 **URL:** [http://imsa.com.mx/con\\_cre\\_prod.html](http://imsa.com.mx/con_cre_prod.html)

Escher, F. 1995. (Thermodynamic Investigation on Thermoplastic Starch, NSC Food Starch Division: Starch Bases. NSC Food Division Starch Bases Applications Starch Bases. Infoseek, Eurospider Information Retrieval System). <http://www.foodstarch.com/Ie.htm>

FAO. 1993. El maíz en la nutrición humana (Colección FAO: Alimentación y nutrición, N° 25). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. ISBN 92-5-303013-5 1 . Maíz 2. Nutrición humana I. Título II. Serie Código FAO: 86 AGRIS: S01 <http://www.fao.org/docrep/T0395S/T0395S00.htm>

Gutiérrez-Díaz, L.J., Güemes, M.J. 1997. (Manejo poscosecha del maíz en el Estado de Morelos). <http://tztetzal.dcaa.unam.mx/-pual01/notitec3/.html>

Nabehima, E., Grossmann, M.V.E. 2001. Functional properties of pregelatinized and cross linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. Carbohydrate Polymers, 45, 2001, 347-353, Elsevier, [www.elsevier.com/locate/Carbpol](http://www.elsevier.com/locate/Carbpol)

Peña-Hurtado, S. 1997a. (Maíz el alimento de los Dioses, considerado por los indígenas de México como planta sagrada. El teocinte).

<http://www.elsalvador.com/hpedhlow/turismo/low/gastro/1/maíz1.htm>

Peña-Hurtado, S. 1997b. (El maíz en México. La conquista de México permitió poner a las órdenes del mundo algunas especies agrícolas de... <http://www.udg.mx:81/Ingles/UdG/Red/CUCBA/maíz1.htm>

Steeneken, P.A.M., Wortman, A.J., Sanders, P. 1995. (Starch granule, structure and reactivity. NSC Food Starch Division: Starch Bases Applications / Netherlands Institute for Carbohydrate Research, Infoseek, Eurospider Information Retrieval System). <http://www.foodstarch.com/Ie.htm>

## **BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA (no citada en el texto)**

Fletcher, S.I., Richmond, P., Smith, A.C. 1985. An experimental study of twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *J. Food Eng.* **4**(4):291-312.

Fletcher, S.I., McMaster, T.J., Richmond, P., Smith, A.C. 1985. Physical and rheological assessment of extrusion cooked maize. *Thermal processing and quality of foods*. FSTA 17 G4A9. European Cooperation in Scientific and Technical Research (Thermal Processing Symposium). ARC Food Res. Inst., Colney Lane, 1984, Pp. 223-234. Norwich, Reino Unido.

Janssen, L.P.B.M., Van Zuilichem, D.J. 1980. *Rheology of reacting biopolymers during extrusion*. Lab. Phys. Technol., Delft Univ. Technol., Delft, Neth. Rheol., (Proc. 8th Int. Congr.). Eds. Astarita, G., Marrucci, G., Nicolais, L. Vol. 3. Pp. 711-714. Code: 44JVAK. Pub. Plenum Press. Nueva York, NY, EEUUA.

**MATERIAL ADICIONAL**

**PATENTE**

1 **NOMBRE DE LA INVENCION**

2 PROCESO POR EXTRUSION TERMOALCALINA Y/O ACIDA DE GRANOS Y OTROS ESQUILMOS  
3 AGROINDUSTRIALES PARA PRODUCIR SEMOLAS Y/O HARINAS PRECOCIDAS EN FORMA DE  
4 HOJUELAS PARA LA ELABORACION DE MASAS Y TORTILLAS Y DE OTROS PRODUCTOS  
5 ALIMENTICIOS

6  
7 **CAMPO DE APLICACION DEL CONOCIMIENTO**

8 La presente invencion es un proceso, el cual se ubica en la Ciencia Quimica en el campo de la Ingenieria  
9 Quimica con su aplicacion a la Ingenieria Alimentaria y Agroindustrial. Es el resultado de la aplicacion de las  
10 investigaciones realizadas en la Universidad Nacional Autonoma de Mexico, por el Grupo de Desarrollo de  
11 Tecnologias mas Limpias del Programa de Ingenieria Quimica Ambiental y de Quimica Ambiental de la  
12 Facultad de Quimica de la UNAM.

13  
14 **ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

15 La presente invencion se llevo a cabo con base en la problematica descrita a continuacion y es el resultado de  
16 investigaciones realizadas a nivel de laboratorio, de escala de banco y de escala prototipo, asi como en  
17 algunas industrias cooperantes.

18  
19 **Problematica por resolver a traves de la presente invencion**

20 En Mexico se producen y consumen una gran variedad de productos con base en el maiz y otros granos, como  
21 el sorgo, el arroz, el frijol, etc. En la mayor parte de los procesos de elaboracion de estos alimentos se  
22 consumen energia e insumos que incrementan su costo y generan problemas ambientales. Por ejemplo, para el  
23 maiz, el grano con el mayor cultivo en Mexico, cuyo consumo mas extendido es en forma de tortillas, aunque  
24 hay otros productos como los tamales, el atole, el pozole, los tlacoyos, dulces como gelatinas y  
25 "temblorosos", utiliza el proceso de nixtamalizacion tradicional, el cual genera grandes cantidades de aguas  
26 residuales y consume cantidades muy importantes de energia. Tomando como otro ejemplo al segundo grano  
27 mas cultivado en Mexico, el sorgo, grano que llego al pais en la decada de los setenta en el Siglo XX y que se  
28 emplea para consumo pecuario, en su lugar de origen es un grano para consumo humano, por lo que puede  
29 procesarse como el maiz para producir tortillas y otros productos similares a los del maiz si el proceso es  
30 adecuado. Asimismo, las leguminosas como el frijol conocido como "diente de burro" o *Canavalia ensiformis*  
31 puede contener de manera natural sustancias toxicas, las cuales impiden que pueda ser aprovechado como  
32 alimento, tanto para animales como para los humanos. Los esquilmos agroindustriales como el salvado de  
33 arroz no pueden aprovecharse de manera integral como ocurre en otros paises ya que las condiciones  
34 climatologicas hacen que se deteriore muy rapidamente, por lo que se convierte en residuo en vez de ser un  
35 subproducto util.

36  
37 Esta invencion se basa en la cocci6n de las particulas de los granos o esquilmos en presencia de cal y/o acido  
38 clorhidrico o muriatico cuando es impuro y agua, por medio del calor generado, ya sea por la friccion  
39 mecanica de ellas contra las paredes metalicas del equipo utilizado, conocido como extrusor, o adicionando  
40 ademais calor por medio de resistencias electricas y/o vapor de agua y/o gases de combusti6n.

41  
42 Este proceso produce masas y/o semolas y/o harinas precocidas que tienen características químicas y  
43 nutrimentales similares a las de sus contrapartes procesadas por métodos tradicionales con la ventaja de  
44 requerir menos energía y menos insumos como agua, vapor y otros.

45  
46 Tomando el ejemplo del maiz para producir tortillas, este proceso novedoso de extrusion alcalina es similar,  
47 desde el punto de vista quimico, al proceso tradicional de nixtamalizacion del maiz.

48  
49 **Ventajas del proceso de extrusion alcalina y/o acida**

50 Tomando el ejemplo de la extrusion alcalina del grano de maiz, las ventajas de este proceso son las siguientes:

- 51  
52 1. Ahorro de agua, ya que solamente se consume la estequiometricamente necesaria para las reacciones  
53 quimicas de gelatinizacion parcial de los almidones del grano y de la desnaturalizacion parcial de las  
54 proteinas que forman la cubierta de los granulos de almidon.

2. Generación nula de aguas residuales de la cocción, ya que solamente el agua que forma parte del producto cocido es la que se utiliza y no un exceso en el que deben cocerse los granos y que se contamina con parte de los productos del grano que se lixivian a ella.
3. Ahorro de tiempo ya que solamente se consume el tiempo necesario para realizar las reacciones de los puntos anteriores en partículas pequeñas y no se necesita un tiempo largo para realizar las reacciones de difusión de masa y calor a través de un grano entero.
4. Ahorro de energía ya que se da solamente la energía necesaria para realizar estas reacciones y no para calentar una masa excesiva de agua que, después, debe eliminarse.

Para los otros granos y subproductos agroindustriales se tienen ventajas similares a las descritas anteriormente.

### **Trabajos de investigación que dieron origen a la presente invención**

Tomando el ejemplo de la nixtamalización como proceso tradicional para la cocción del maíz para consumo humano directo, desde 1978 se solicitó la patente de un procedimiento que realizara las mismas reacciones químicas que el proceso tradicional de nixtamalización, presentada por: Durán-Domínguez, en 1978. Este procedimiento se basó en los resultados de un proyecto de investigación que se inició en 1969 para generar tecnologías apropiadas para el procesamiento del maíz y otros granos, no solamente en las ciudades para las zonas suburbanas y urbanas sino también en el campo buscando reducir las pérdidas post-cosecha y minimizar los efectos de negativos de la falta de almacenamiento adecuado. Los resultados están plasmados en las conferencias presentadas por: Durán, en 1972 y 1977 y Bazúa, en 1978a,b, 1979 y 1989. Este proyecto, que aún continúa, desembocó de varios paquetes tecnológicos, tanto para generar una tecnología más limpia para producir harinas precocidas y masas listas para preparar tortillas y otros productos alimenticios, como para minimizar la generación de aguas residuales de las tecnologías tradicionales y aprovechar los residuos y esquilmos de los procesos agroindustriales, presentados por Bazúa y Guerra, 1980; Bazúa y col., 1976, 1979; Durán-de-Bazúa, 1987, 1988a,b, 1989, 1996, 1998; Durán-de-Bazúa y col., 1991; Durán-de-Bazúa y Pedroza, 1985; Saldaña-Morales, 1987 y otros.

La extrusión alcalina se ha propuesto para sustituir el cocimiento tradicional del maíz para producir tortillas, tanto a escala industrial como en molinos urbanos y suburbanos y empresas familiares. Para cocer leguminosas como el frijol endurecido y aquéllas que contienen sustancias tóxicas como la *Canavalia ensiformis*, grano conocido como “diente de burro”, inactivando los compuestos tóxicos, se utiliza la extrusión ácida. Esta última también se usa para estabilizar subproductos como el salvado de arroz que se descompone en cuestión de minutos por la presencia de enzimas que degradan los ácidos grasos presentes en el salvado y que hacen imposible su aprovechamiento para extraer aceite de calidad nutritiva excelente a partir de este subproducto. Para aprovechar el sorgo que solamente se utiliza como grano forrajero cuando podría usarse para consumo humano directo para producir tortillas de la misma calidad que las hechas con maíz, se utiliza la extrusión alcalina. Información sobre estas aplicaciones está presentada por Alarcón y col., 1985; Calderón y col., 1997; Calderón-Villagómez y col., 1995; Camacho y col., 1998; Díaz-Núñez, 1999; Díaz-Núñez y col., 1999, 2001; Guerra y col., 1983; Hernández-Ayala y col., 1996; Nieto y Durán-de-Bazúa, 1988; Nieto y col., 1986; Pérez y Rodríguez, 1988; Rangel-Silva y col., 1994; Sánchez-López y col., 1999; Sánchez Tovar y col., 1993, 1997, 2000, 2004; Solís y Durán-de-Bazúa, 1990; Solís-Fuentes y col., 1998; Vara-Flores y col., 1997; Vásquez-Reyes y col., 1990, 1996.

### **OTRAS PATENTES DE EXTRUSIÓN PARA PRODUCIR MASAS O SÉMOLAS**

En el Banco Nacional de Patentes, en la página electrónica “Internet” del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, [www.impi.gob.mx](http://www.impi.gob.mx), y en la dirección electrónica de la Oficina Europea de Patentes, correspondiente al portal de “Internet” de la Oficina para España [http://es.espacenet.com/search97cgi/s97\\_cgi.exe?Action=FormGen&Template=es/ES/home.hts](http://es.espacenet.com/search97cgi/s97_cgi.exe?Action=FormGen&Template=es/ES/home.hts) se encontraron más de 250 patentes relacionadas con la extrusión para la producción de cereales instantáneos para el desayuno así como para productos de granos dextrinizados o pastas para sopa. Con respecto a la “masa” o a la “nixtamalización” del primer ejemplo sobre el maíz se encuentran más de 200. La lista de estas patentes se muestra impresa directamente del portal mencionado en el Apéndice A-2. Algunas de ellas tiene

1 algunas secciones parecidas a esta innovación, pero ninguna se acerca a la presente invención. Dentro de las  
2 más relacionadas con alguna de las partes de la presente invención se tienen las siguientes:

3  
4 La patente US4985269, "Continuous extrusion for tortilla chip production", proceso patentado en el año 1991,  
5 define un proceso de extrusión termoalcalina que incluye pocas condiciones de ingeniería, particularmente  
6 consumo energético y tiempo de residencia, y que ha sido utilizado por Frito Lay para producir "totopos"  
7 triangulares, nombre derivado del náhuatl, que significa "cosa caliente y esponjada" por medio de un extrusor  
8 co-rotativo o de doble tornillo; sin embargo, no define si las condiciones de operación son aplicables a  
9 cualquier tipo de maíz, ni menciona tampoco otro producto para el que se tenga como fin esta invención  
10 además de los totopos. Esta patente utiliza grano entero quebrado y únicamente le es útil el extrusor de doble  
11 tornillo o co-rotativo, sus temperaturas de extrusión están por arriba de los 125°C y por debajo de los 200°C,  
12 no se definen la presión; pero define la potencia de 300 a 550 Watt hora/kg y esfuerzos cortantes de 70 a 130  
13 s<sup>-1</sup> que pueden considerarse como muy altos esfuerzos. Se menciona que se utilizan concentraciones de  
14 hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> para alcalinizar del 0.1 al 2.5% produciéndose valores de pH entre 6 y 7, lo cual  
15 podría ser un error ya que estos valores de cal darían potenciales hidrógeno mayores en condiciones similares.  
16 Estos valores ácidos o neutros podrían deberse a errores del método de medición de pH que utilizaron. En  
17 nuestra invención, con concentraciones de 0.5% de Ca(OH)<sub>2</sub> para alcalinizar se obtienen valores por encima  
18 de 8 para el pH de las mezclas. La humedad inicial de las materias primas que se alimentan al extrusor  
19 tampoco se define. Puede definirse como un proceso de ALTA TEMPERATURA Y ALTO ESFUERZO  
20 CORTANTE.

21  
22 La patente USSS 5532013 del CINVESTAV-IPN, México, de julio de 1996, "Method for the preparation of  
23 instant fresh corn dough or masa" la cual es una patente EXPIRADA por falta de pago, según la información  
24 de la Página consultada, reivindicó la producción directamente de MASA FRESCA PARA USO  
25 INMEDIATO EN TORTILLADORAS, sin mencionar otros productos como sémolas u hojuelas que pueden  
26 conservarse ni usarse para otros fines, como lo plantea nuestra invención. El proceso menciona intervalos de  
27 humedades del 25 al 60% sin definir si son en base húmeda o en base seca; cabe mencionar que lo que se  
28 define como una verdadera masa no se presenta sino en humedades por arriba del 45% b.s. cuestión que debió  
29 haberse comprobado experimentalmente. Al igual que la patente anterior se habla también de utilizar  
30 concentraciones de hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> para alcalinizar del 0.1 al 2.5% produciéndose valores de pH  
31 entre 6 y 7.5 lo cual es también pudiera tener errores de medición, ya que estos valores son ácidos o neutros y  
32 con el Ca(OH)<sub>2</sub> para alcalinizar se obtienen valores por encima de 8, cuando se adiciona en concentraciones  
33 de 0.5% en base seca o mayores. Se mencionan temperaturas de entre 45 y 60 con máximos de 60 a 95°C. No  
34 se definen los valores de los esfuerzos cortantes ni de la presión a que deben operar. Mencionan tiempos de  
35 residencia de entre 1.5 a 7 min con las operaciones combinadas de extrusión y enfriamiento. No mencionan  
36 cuál es el tiempo promedio de extrusión. Tampoco definen si estas condiciones son aplicables a cualquier  
37 tipos de maíz de endospermo duro o tipo criollo, que es el más usado para producir masas y harinas  
38 precocidas para tortillas.

39  
40 Este grupo también presentó en septiembre de 1996 una segunda patente, la USSS 5558886, "Extrusion  
41 apparatus for the preparation of instant fresh corn dough or masa", la cual repite exactamente todo lo mismo a  
42 la anterior, inclusive con las mismas condiciones de operación mencionadas en la anterior. Sin embargo, en la  
43 parte de las reivindicaciones, éstas se dirigen a proteger un extrusor diseñado por el grupo, mas no por el  
44 proceso.

45  
46 El método para producir frituras de tortillas de maíz, Patente US56522010, pretende patentar un proceso  
47 precolombino como es la "nixtamalización tradicional", en una sola línea en extremo ortodoxa. Puede  
48 comentarse que este proceso milenario no está completamente definido y que varía inclusive por regiones  
49 etnogeográficas. Para mayores referencia consultar a Bressani, 1972; Bressani y col., 1958; Díaz-León y  
50 Cruz-León, 1998; Hernández-Xolocotzi, 1990; Illescas, 1943; Wellhausen y col., 1951.

51  
52 Con lo que respecta al proceso de esta invención, a diferencia de los anteriores, se tienen características  
53 propias que lo hacen versátil y efectivo y, sobre todo, mucho mejor a los ya patentados, ya que no se limita a  
54 maíz, sino que pueden procesarse con esta invención sorgo, frijol, otras leguminosas como *Canavalia*  
55 *ensiformis*, e incluso, esquilmos agroindustriales, como el salvado de arroz. Se ha probado a nivel de  
56 laboratorio, a escala de banco, a nivel prototipo e incluso se han hecho corridas a nivel industrial, lo que ha

1 permitido mostrar su bondad. Se describen en el apartado siguiente sus características pero antes, en los  
2 siguientes párrafos, se presentan algunas patentes relacionadas con los otros granos diferentes al maíz para  
3 ubicar la originalidad de esta invención que presenta diferencias importantes con respecto de las anteriores  
4 patentes, ya que es un proceso de ALTA TEMPERATURA, CORTO TIEMPO DE RESIDENCIA, BAJA  
5 HUMEDAD inicial, en b.s., ALTA PRESIÓN Y ALTO ESFUERZO CORTANTE, además de poder operar  
6 con humedad suficiente para también producir masas listas para proceso.

7  
8 La patente **WO9717858** describe el proceso para producir frijoles refritos instantáneos usando un extrusor de  
9 doble tornillo co-rotativo donde el fríjol previamente molido se humidifica por adición de agua potable del 25  
10 al 40% de humedad dentro del mismo extrusor y se eleva temperatura hasta 180°C. El uso del extrusor  
11 corrotativo es para reducir el esfuerzo cortante en la boquilla o “dado” y así mantener intacta la estructura del  
12 gránulo de almidón en la masa final de fríjol, para después proceder al secado. En el proceso presentado en  
13 esta invención no es necesario usar un extrusor de doble tornillo ni elevar la temperatura hasta niveles tan  
14 altos, que pueden modificar negativamente las características nutritivas de las proteínas de origen vegetal, ya  
15 que el contenido de agua adicionado es menor.

16  
17 Sobre la extrusión ácida y/o alcalina de esquilmos agroindustriales no se encontraron patentes en la búsqueda  
18 realizada, por lo que en esta parte, esta invención es también original.

## 19 20 **BIBLIOGRAFÍA**

21 Alarcón, A.L., Guerra, R., Pedroza-de-Brenes, R., Nieto-de-Meléndez, Z., Durán-de-Bazúa, C. 1985. Mezclas  
22 nixtamalizadas de maíz y sorgo. Evaluaciones en masas y tortillas. Pruebas reológicas y sensoriales. *Tecnol.*  
23 *Aliment. Mex.*, **20**, 1, 6-11.

24  
25 Bazúa, C.D. de. Global Responsible. 1978a. Corn and Sorghum Tortillas: Chemical and Physical Evaluations.  
26 Presentado en Sixth International Cereal and Bread Congress. American Society of Cereal Chemists.  
27 Winnipeg, Canadá.

28  
29 Bazúa, C.D. de. Global Responsible. 1978b. Opaque-2 Corn Tortillas: Processing Conditions for the Alkaline  
30 Cooking Traditional Method. Presentado en Sixth International Cereal and Bread Congress. American Society  
31 of Cereal Chemists. Winnipeg, Canadá.

32  
33 Bazúa, C.D. de. Global Responsible. 1979. Biological and rheological evaluations for corn-sorghum tortillas.  
34 Presentado en **ICEF-2**, Second International Congress on Engineering and Food. Segundo Congreso  
35 Internacional Sobre Ingeniería y Alimentos,. American and European Societies of Agricultural Engineers.  
36 Agosto. Helsinki, Finlandia.

37  
38 Bazúa, C.D. de. Global Responsible,. 1989. Corn and sorghum alkaline extrusion-cooking. A promising  
39 technology to solve the food problems of some Latin American countries. Presentado en **ICEF-5**, Fifth  
40 International Congress on Engineering and Food. German Federal Research Center for Nutrition. Mayo 29-  
41 Junio 2. Colonia, RFA.

42  
43 Bazúa, C.D. de, Guerra, R. 1980. Los centros de investigación y educación superior y el desarrollo de  
44 agroindustrias. Dos problemas tipo. Parte II. Nuevos productos agrícolas procesados. *Tecnol. Aliment. Mex.*,  
45 **15**, 6, 4-16.

46  
47 Bazúa, C.D. de, Guerra, R., Rodríguez, A. 1976. High-lysine corn traditional Mexican products. Presentado  
48 en **ICEF-1**, First International Congress on Engineering and Food. American Society of Agricultural  
49 Engineers. Agosto. Boston, Massachusetts, EEUUA.

50  
51 Bazúa, C.D. de, Guerra, R., Sterner, H. 1979. Extruded corn flour as an alternative to lime-heat corn flour for  
52 tortilla preparation. *J. Food Sci.*, 44, 3, 940-941.

- 1 Bressani, R. 1972. La importancia del maíz en la nutrición humana, en América Latina y otros países. En R.  
2 Bressani, J.E. Braham y M. Béhar, eds. Mejoramiento nutricional del maíz. Pub. INCAP L-3, p. 5-30.  
3 Guatemala, INCAP.  
4
- 5 Bressani, R., Paz y Paz, R., Scrimshaw, N.S. 1958. Chemical changes in corn during preparation of tortillas. J.  
6 Agric. Food Chem., 6:770-77  
7
- 8 Calderón, H., Durán-de-Bazúa, C., Nieto, Z., Pedroza, R., Solís, J. 1997. Alkaline extrusion cooking applied  
9 to better food processing. Case histories: Beans, maize, and rice by-products. **Achema 97, International**  
10 **Meeting on Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology**. Deutsche Gesellschaft  
11 für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Junio 9-14. Frankfurt, RFA.  
12
- 13 Calderón-Villagómez, H.E., Castellanos-Hernández, M.T., Durán-de-Bazúa, C., Luna-Pabello, V.M., Paredes,  
14 L., Pedroza-Islas, R., Rojano, F.I., Rosas, C., Rullán, A., Sánchez, A., Solís-Fuentes, J.A., Yamamoto, A.  
15 1995. Handling, stabilization and disposal of agroindustrial residues. Case problems: maize, rice, and coffee  
16 industries / Manejo, estabilización y disposición de residuos agroindustriales. Casos tipo: Industrias del maíz,  
17 el arroz y el café. En Proceedings of the **THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WASTE**  
18 **MANAGEMENT PROBLEMS IN AGRO-INDUSTRIES**. Germán Buitrón, Ed. Pub. ISSSTE. Pp. 252-263.  
19 México D.F. México.  
20
- 21 Camacho, M.E., Nieto-Villalobos, Z., Morales-de-León, J., and Durán-de-Bazúa, C. 1998. Estudios *in vivo* de  
22 dietas de harinas nixtamalizadas y extrudidas de maíz, sorgo y mezclas 60:40 maíz:sorgo con diferentes  
23 concentraciones de calcio. Informe de proyecto de investigación. MA-SO-01-98. UNAM, Facultad de  
24 Química. México D.F. México.  
25
- 26 Díaz-León, M.A., Cruz-León, A. Compiladores. 1998. **Nueve mil años de agricultura en México.**  
27 **Homenaje a Efraim Hernández Xolocotzi**. 1ª. Ed. Grupo de Estudios Ambientales, A.C. Pub. Universidad  
28 Autónoma Chapingo. ISBN 968-884-514-0. Chapingo, Méx. México.  
29
- 30 Díaz-Núñez, M.C. 1999. Estudio de prefactibilidad técnico-económica de una línea de extrusión alcalina para  
31 harinas y/o masas precocidas de maíz para tortillas. Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México  
32 D.F. México.  
33
- 34 Díaz-Núñez, M.C., Sánchez-Tovar, S.A. Salazar-Zazueta, A., Mena-Iniesta, B., Durán-de-Bazúa, C. 1999.  
35 Evaluación técnico-económica de una línea de producción de harinas y masas para tortillas de maíz  
36 elaboradas por extrusión termoalcalina. Presentado en la Convención Nacional del Instituto Mexicano de  
37 Ingenieros Químicos. León, Guanajuato, México.  
38
- 39 Díaz-Núñez, M.C., Sánchez-Tovar, S.A. Salazar-Zazueta, A., Mena-Iniesta, B., Durán-de-Bazúa, C. 2001.  
40 Factibilidad económica de una línea de producción de harina de maíz para tortillas usando extrusión  
41 termoalcalina. Revista IMIQ **Méx**, **42**, 1-3, 24-33.  
42
- 43 Durán, C. 1972. Extrusion of corn, *Zea mays*, for "tortilla" preparation. Proyecto de investigación interno.  
44 Departamento de Ciencias de la Nutrición. Universidad de California. Berkeley, EEUUA.  
45
- 46 Durán, C. 1977. Sorgo como fuente potencial de alimentos: Mezclas de maíz-sorgo como productos  
47 tradicionales. Informe interno de investigación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, SARH.  
48 Chapingo, Méx., México.  
49
- 50 Durán-de-Bazúa, C. 1987. Effluents of the food industry in Mexico: Environmental impacts on soil and water  
51 resources and possible solution using the biotechnological approach. Case problem: The corn industry. En  
52 **"BIOTECHNOLOGY APPLIED TO ENVIRONMENTAL PROBLEMS. GLOBAL BIO-**  
53 **CONVERSIONS"**. VOL. II. Chapter 2. Pp. 75-119. CRC Press Inc. ISBN 0-8493-4509-x. Boca Raton, FL.  
54 EEUUA.  
55

- 1 Durán-de-Bazúa, C. 1988a. Recycling of corn processing wastes / Reaprovechamiento de efluentes de la  
2 industria del maíz. C. *Informe Final de Proyecto .1987.*, 100 pags. Pub. UNAM/UNEP. ISBN 968-36-1644-  
3 5. Impresora Azteca, S.A de C.V. México D.F. México.  
4
- 5 Durán-de-Bazúa, C. 1988b. Una nueva tecnología para la extrusión alcalina de maíz y sorgo. *Monografía*  
6 *Tecnológica No. 2.* Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. O.E.A. 71 pags. Pub.  
7 UNAM-Proy. Multinal. Tecnol. Alimentos. ISBN 968-36-0576-1. México D.F. México.  
8
- 9 Durán-de-Bazúa, C. 1996. La extrusión alcalina, una tecnología útil para procesar granos. *Industria*  
10 *Alimentaria*, **18.6**,:20,22,24-25,28-29.  
11
- 12 Durán-de-Bazúa, C. 1998. Concepts on energy savings in the agroindustry-food chain. **Sustainable**  
13 **agriculture for food, energy, and industry: strategies towards achievement.** Proceedings of the  
14 International Joint Conference, Braunschweig, RFA. Panel session “*ENERGIZING THE FOOD*  
15 *PRODUCTION CHAIN FOR THE ATTAINMENT OF FOOD SECURITY*”. Eds. N. El Bassam, R.K. Behl y  
16 B. Prochnow. Vol. 2, pp. 722-725. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Society of  
17 Sustainable Agriculture and Resource Management, Hisar, India, Federal Agricultural Research Center,  
18 Braunschweig, RFA. Junio 22-28, 1997. James X James Sci. Pub. Ltd. ISBN 1 873936 76 1. Londres,  
19 Inglaterra.  
20
- 21 Durán-de-Bazúa, C., Pedroza, R. 1985. Laboratory performance of a rotating biological contactor RBC, for  
22 nejayote corn processing wastewater, biological degradation. Presentado en **ICEF 4, FOURTH**  
23 **INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD.** Universidad de Alberta. Julio 4-11.  
24 Edmonton, Canadá.  
25
- 26 Durán-de-Bazúa, C., Pedroza, R., Peña, S., Solís, J., Almaraz, Y., Burgos, A.I., Calderón, H.E., Jiménez,  
27 R.R., Nájera, H., Rullán, A., Yamamoto, A., Zapata, V. 1991. Food extrusion, applications for foods and  
28 feeds in third world countries *Canavalia ensiformis*, rice bran, microbial protein,. Presentado en **8th World**  
29 **Congress of Food Science and Technology.** Canadian Institute of Food Science and Technology,  
30 International Union of Food Science and Technology. Sept. 30-Oct. 4. Toronto, Canadá.  
31
- 32 Durán-Domínguez, Carmen. 1978. **PROCEDIMIENTO PARA COCER MAÍZ POR EXTRUSIÓN.**  
33 Registro: Abril 7, 1978. Dirección General de Invenciones y Marcas. Departamento de Patentes. Secretaría de  
34 Patrimonio y Fomento Industrial. México. Núm. Registro Patente 172126. México D.F. México.  
35
- 36 Guerra, R., Rodríguez, A., Durán-de-Bazúa, C. 1983. Extrusion of high-lysine corn and applications in  
37 Mexican foods. *Trans. ASAE*, 26.2,:618-623.  
38
- 39 Hernández-Ayala, E., Nieto-Villalobos, Z., Durán-de-Bazúa, C. 1996. Determinación del efecto de la  
40 nixtamalización y la extrusión alcalina sobre el valor nutricio en tortillas de maíz y sorgo, parte II:  
41 CONTENIDO DE TRIPTOFANO Y NIACINA. *Industria Alimentaria*, **18.3**,:45-48.  
42
- 43 Hernández-Xolocotzi, E. 1990. Comunicación personal. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo,  
44 Méx. México.  
45
- 46 Illescas, R. 1943. La teoría química de la formación del nixtamal. *Revista de la Sociedad Mexicana de*  
47 *Historia Natural*, 4, 3-4, 129-136.  
48
- 49 Nieto, Z., Durán-de-Bazúa, C. 1988. Protein quality evaluations of sorghum products for human consumption  
50 using biological tests, NPU and PER. *Chimica Oggi*, 6, 3, 55-58.  
51
- 52 Nieto, Z., Durán-de-Bazúa, C., Laso, F., Núñez, V. 1986. Calidad molinera de mezclas de maíz y sorgos  
53 perlado e integral. *Tecnol. Aliment. Mex.*, **21**, 2, 17-21.  
54

- 1 Pérez, R., Rodríguez, J. 1988. Estudio de las características reológicas de tortillas de maíz, sorgo y sus  
2 mezclas. Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México. Premio IMIQ-México,  
3 1988.  
4
- 5 Rangel-Silva, M., Sánchez-Tovar, S.A., Durán-de-Bazúa, C. 1994. El maíz, *Tlaolli*, y el amaranto, *Huautli*,  
6 dos granos vitales para los mexicanos: Su procesamiento usando tecnologías más limpias. Presentado en el  
7 **Primer Congreso Mexicano de Etnobiología**. Asociación Etnobiológica Mexicana, A.C. y Universidad  
8 Autónoma del Estado de México. Agosto 10-12. Toluca, Mex., México.  
9
- 10 Saldaña-Morales, M.V. 1987. Comparación química y biológica de mezclas de maíz y sorgo nixtamalizadas y  
11 extrudidas. Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.  
12
- 13 Sánchez-López, L., Solís-Fuentes, J.A., Durán-de-Bazúa, C. 1999. La estabilización del salvado de arroz  
14 mediante tratamiento combinado químico dieléctrico. *Industria Alimentaria*, **21**, 6, 13,15-18,20.  
15
- 16 Sánchez-Tovar, S., Calderón-Villagómez, H. y Durán-de-Bazúa, C. 1993. Extrusión alcalina de maíz blanco y  
17 amarillo, evaluaciones reológicas y sensoriales de masas y tortillas. Vol. 3. Serie: Tecnologías más limpias. Pub.  
18 Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental. Facultad de Química. UNAM. ISBN 968-  
19 36-3322-6. 184 p. México D.F. México.  
20
- 21 Sánchez Tovar, S.A., Calderón, H.E., Durán-de-Bazúa, C. 1997. Alkaline extrusion of cornmeals for tortilla  
22 production: Rheological and sensory relationships. Presentado en **ICEF-7, SEVENTH INTERNATIONAL**  
23 **CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD / SÉPTIMO CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE**  
24 **INGENIERÍA Y ALIMENTOS**. International Association for Engineering and Food, European Society of  
25 Agricultural and Mechanical Engineers. Abril 13-17. Brighton, Inglaterra.  
26
- 27 Sánchez-Tovar, S.A. Salazar-Zazueta, A., Mena-Iniesta, B., Durán-de-Bazúa, C. 2000. Cinética de reacción  
28 para la gelatinización bajo tratamiento térmico alcalino de almidón de maíz en un extrusor considerado como  
29 un reactor continuo de flujo tipo pistón. *Tecnol. Ciencia Ed. IMIQ, México*, 15, 2, 94-103.  
30
- 31 Sánchez-Tovar, S.A., Salazar-Zazueta, A., Mena-Iniesta, B., Durán-de-Bazúa, C. 2004. Viscoamylographic  
32 studies on *Zea mays* corn starch [Mexican white Tuxpeño maize] partial gelatinization with calcium  
33 hydroxide. *Starch-Stärke*, 56, 11, 526-534.  
34
- 35 Solís, J.A., Durán-de-Bazúa, C. 1990. Estudio del efecto de la extrusión sobre la estabilidad y calidad nutricia  
36 de esquilmos agropecuarios y subproductos agroindustriales. Caso tipo: Extrusión de salvado de arroz. En  
37 Memorias de la **XXX Convención Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos**. Pub. IMIQ.  
38 Eds. A. Anaya, O. Canales, H. Gómez, J. Bellido, L. Miramontes. Guadalajara, Jal. Tomo I. Pp. 86-94.  
39
- 40 Solís-Fuentes, J.A., Castellanos-Hernández, M.T., Jiménez-Bermúdez, M., Méndez-Dauzón, J., Rojano-  
41 Hernández, F.I., Sánchez-López, L., Durán-de-Bazúa, C. 1998. Residuos agroindustriales, su potencialidad de  
42 uso, cinco ejemplos. *Vol. 4, Serie: TECNOLOGÍAS más LIMPIAS*. Pub. Prog. Ing. Quím. Amb. y de Quím.  
43 Amb. 154 pags. Facultad de Química, UNAM. ISBN 968-36-6748-1. México D.F. México.  
44
- 45 Vara-Flores, E., Nieto-Villalobos, Z., Durán-de-Bazúa, C. 1997. Extrusión alcalina de frijol endurecido, usos  
46 potenciales en la industria alimentaria. *Industria Alimentaria*, **19**, 6, 12-18.  
47
- 48 Vásquez-Reyes, V.M., Durán-de-Bazúa, C., Gallardo-Navarro, Y., Jiménez-García, E. 1990. Estudio sobre el  
49 efecto del procesamiento térmico-alcalino en el contenido de vitaminas tiamina, niacina y riboflavina, en  
50 sorgos blanco 86 y rojo decortinado. *Alimentos, CHILE Y LATINOAMÉRICA*, 15, 5, 23-29.  
51
- 52 Vásquez-Reyes, V.M., Martínez, L., Durán-de-Bazúa, C. 1996. Determinación del efecto de la  
53 nixtamalización y la extrusión alcalina sobre el valor nutricio en tortillas de maíz y sorgo, parte I: Contenido  
54 de tiamina, niacina y riboflavina. *Industria Alimentaria*, **18**, 2, 24-25,28-29,31-34.  
55

1 Wellhausen, E.J., Roberts, L.M., Hernández-Xolocotzi, E. con la colaboración de Mangelsdorf, P.C. 1951.  
2 **Razas de maíz en México. Su origen, características y distribución.** Folleto Técnico No. 5. SAG, OEE.  
3 237 pags. México D.F. México.  
4

#### 5 **DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION**

6 El presente proceso se realiza con diferentes granos y subproductos y esquilmos agroindustriales. A  
7 continuación, por ser el proceso que se ha encontrado en forma más amplia en la bibliografía de patentes  
8 consultada, se da el ejemplo del maíz y, específicamente, del conocido como “maíz criollo”, el más apto para  
9 realizar la elaboración de tortillas, *Zea mays*., de endospermo duro, el cual contiene de 25 a 35% de amilosa y  
10 el resto del almidón está presente como amilopectina. En éste se presenta la opción de utilizar un cereal, el  
11 segundo en orden de importancia en México, el sorgo como posible grano para producir tortillas. También se  
12 dan dos ejemplos adicionales sobre una leguminosa que posee compuestos antinutricios y del salvado de arroz  
13 un subproducto del beneficio del arroz. El proceso general se describe a continuación. En el Anexo se muestra  
14 los diagramas de flujo en las Figuras 1,2 y 3.  
15

#### 16 **PROCESO PARA PRODUCIR HOJUELAS EXTRUDIDAS TERMOALCALINAMENTE A PARTIR** 17 **DE MAIZ INTEGRAL Y/O DE MEZCLAS DE MAIZ INTEGRAL-SORGO AL 70-30 Y 80-20% EN** 18 **PROPORCIÓN PESO A PESO, RESPECTIVAMENTE O, INCLUSO, DE SORGO AL 100%:** 19

20 El Paso 1 consiste en limpiar el maíz y/o el sorgo por medio de una cernidora de cualquier marca,  
21 representada por CE-101, para eliminar “tamo”, granos rotos y cualquier clase de grano dañado o de basura.  
22 Ya limpio el grano se alimenta en una tolva dosificadora, también de cualquier marca, representada por TV-  
23 101.  
24

25 El paso 2 consiste en introducir el grano después de la tolva para a un molino donde se reduce a una malla de  
26 200-250 en un molino de discos, tambor o martillos MD-101, de cualquier marca. Se le determina su  
27 humedad en base seca. Esta sémola integral de maíz o de sorgo o de sus mezclas es la que se alimenta al  
28 extrusor una vez realizado el pasos 3.  
29

30 El paso 3 consiste en preparar una “lechada de cal” apagada, hidróxido de calcio con agua,  $\text{Ca(OH)}_2$ , del 0.1  
31 al 0.9% b.s., según el tipo de maíz, usando agua con la que “humedece” la sémola integral de maíz para  
32 asegurar un contenido de humedad entre 24.0% y 30.0%, en base seca, y un contenido de hidróxido de calcio  
33 entre 0.1% y 0.5%, en base seca, dependiendo también del tipo de maíz que se use. Esta suspensión se  
34 dosifica a la salida del molino por medio de una bomba dosificadora, de diafragma o peristáltica, de cualquier  
35 marca, representadas por FA-101 y BD-101, homogeneizando la mezcla con una mezcladora de cualquier tipo  
36 o marca, durante 5 a 10 minutos dependiendo de la cantidad de agua que se adicione.  
37

38 El paso 4 consiste en transportar la sémola o harina húmeda y alcalinizada por medio de un transportador de  
39 gusano o banda, de cualquier tipo o marca, representado por TC-101, o incluso manualmente a un extrusor, de  
40 cualquier tipo o marca, de un solo tornillo o de dos tornillos. Tomando el ejemplo de un extrusor de bajo  
41 costo, tipo CIATECH de un solo tornillo, que procesa entre 50 y 100 kg/h, cuyo tornillo gira a 550-850 rpm,  
42 que cuenta con resistencias de banda para tener una fuente de calor homogénea que dé un precalentamiento a  
43 50-60°C y una temperatura a la salida en la boquilla o “dado”, de 105-125°C. Se tienen tiempos de residencia  
44 en el reactor o extrusor de 30 a 50 segundos. La abertura de la salida o “dado” considerado, que es del tipo de  
45 cono truncado, es de 0.5-1.0 cm.  
46

47 El paso 5 consiste en obtener del proceso de extrusión hojuelas de 0.01 a 5.0 cm x 0.01 a 1.0 cm de espesor,  
48 aproximadamente. Estas hojuelas tienen una humedad en base seca entre 16.0 y 21.0% b.s. Estas hojuelas  
49 pueden secarse hasta una humedad en base seca de  $10.0 \pm 1.0\%$  b.s. por cualquier método de secado y en  
50 cualquier tipo de secador y, posteriormente, remolerse a tamaños de malla 200-250 para almacenarse y  
51 después utilizarse para producir masas y tortillas, como sigue.  
52

53 El paso 6 consiste en humedecer la harina precocida entre 45.0 y 60.0% b.s., dependiendo del tipo de grano  
54 del que se obtuvo para que tenga características similares a la masa de maíz nixtamalizado.  
55

1 El paso 7 consiste en tortear la masa para preparar tortillas y cocerlas en un comal, palabra de origen náhuatl  
2 para designar a las superficies calientes sobre las cuales se cuecen las tortillas o emplear cualquier tipo de  
3 máquina tortilladora manual o automática para hacer tortillas y cocerlas. Con las masas pueden prepararse  
4 otros productos de maíz como tamales, atole, etc., que ahora podrán tener una proporción de sorgo desde cero  
5 hasta 100 por ciento, sin importar que este grano sea muy pequeño ya que el proceso permite su  
6 aprovechamiento integral, especialmente de las variedades con bajo contenido de taninos y polifenoles,  
7 desarrolladas en México.

8  
9 La Figura 1 es representativa de este proceso.

10  
11 Ahora se presenta otro ejemplo de la aplicación de esta invención, tomando ahora a un grano tipo leguminosa.

### 12 13 **PROCESO PARA PRODUCIR HARINA DE FRIJOL PRECOCIDO A PARTIR DE FRIJOL TIPO** 14 ***Canavalia ensiformis* EXTRUDIDO**

15  
16 El paso 1 consiste en limpiar el frijol canavalia por medio de una cernidora, CE-101, de cualquier tipo y/o  
17 marca, para eliminar “tamo” de basura. Ya limpio se alimenta en una tolva dosificadora de cualquier tipo y/o  
18 marca, representada por TV-101.

19  
20 El paso 2 consiste en moler el grano en cualquier tipo y/o marca de molino que permita obtener sémolas y/o  
21 harinas determinando la humedad de la sémola molida para definir el siguiente paso de humidificarla  
22 previamente al paso de alimentarla al extrusor.

23  
24 El paso 3 consiste en preparar una solución de ácido clorhídrico en agua con la que se “humedece” la sémola  
25 o harina de frijol para asegurar un contenido de humedad del 25.0% al 30.0% en base seca y un contenido de  
26 HCl del 0.1% al 0.5% en base seca, dependiendo del tipo de frijol que se use. Esta suspensión se dosifica a la  
27 salida del molino por medio de una bomba dosificadora de diafragma o peristáltica, representada por: FA-  
28 101. La mezcla se homogeniza con cualquier tipo de mezcladora durante 5 a 10 minutos, dependiendo del tipo  
29 de frijol empleado.

30  
31 El paso 4 consiste en transportar la sémola o harina de frijol por medio de un transportador de gusano de  
32 cualquier marca y/o tipo, TC-101, a un extrusor de cualquier tipo y/o marca, de uno o dos tornillos,  
33 representado por EX101. Tomando el ejemplo de un extrusor de bajo costo, tipo CIATECH que procese entre  
34 50 y 100 kg/h, cuyo tornillo gira a 650 rpm, que cuenta con resistencias de banda para tener una fuente de  
35 calor homogénea, que dé un precalentamiento a 60°C y que permita una temperatura a la salida, en la boquilla  
36 o “dado” de 105-120°C. Se tienen tiempos de residencia en el reactor o extrusor de 30 a 35 segundos. La  
37 abertura de la salida o “dado”, de tipo de cono truncado, considerada es de 0.5 a 1.0 cm.

38  
39 El paso 5 consiste en realizar el secado y remolienda de las hojuelas obtenidas del proceso de extrusión, del  
40 que se obtienen hojuelas de 0.01 cm x 2.0cm de largo y ancho respectivamente y de aproximadamente 0.01 a  
41 1.0 cm de espesor, aproximadamente. Estas hojuelas tienen una humedad en base seca entre 18.0 y 20.0%. y  
42 pueden secarse hasta una humedad en base seca de 10.0±1.0% por cualquier método de molienda y secado  
43 empleando cualquier marca o tipo de equipos.

44  
45 El paso 6 consiste en almacenar las harinas en bolsas de papel encerado o plástico inocuo para su posterior  
46 preparación en mezclas con maíz, sorgo u otros cereales produciendo tortillas o tamales tipo *tlacoyo* o  
47 *tlatlaoyo*, palabras de origen náhuatl que significan una especie de empanada hecha de una tortilla gruesa de  
48 forma oblonga o triangular que se rellena con masa de frijol y/o yerbas comestibles o para utilizarse en  
49 piensos o forrajes de animales como una fuente de proteína y carbohidratos, ya sin los compuestos tóxicos.  
50 Para otras variedades de leguminosas que tengan problemas de endurecimiento este proceso es especialmente  
51 benéfico ya que su consumo de energía por unidad de masa es muy bajo y permite obtener sémolas precocidas  
52 de excelente calidad.

53  
54 La Figura 2 es representativa de este proceso.

1 El último ejemplo que se dará de esta invención es de la estabilización de salvado de arroz para su uso  
2 posterior en otros procesos.

### 3 4 **PROCESO PARA LA ESTABILIZACIÓN A PARTIR DE SALVADO DE ARROZ EXTRUDIDO** 5 **ÁCIDAMENTE**

6  
7 El paso 1 consiste en limpiar el salvado de arroz por medio de una cernidora representada por CE- 101, de  
8 cualquier tipo y/o marca, para eliminar “tamo” o basuras. Ya limpio se alimenta en una tolva dosificadora,  
9 TV-101, de cualquier tipo y/o marca.

10  
11 El paso 2 consiste en determinar su humedad en base seca. Este salvado de arroz se humidificará y se  
12 alimentará al extrusor de acuerdo con los siguientes pasos.

13  
14 El paso 3 consiste en preparar una solución de ácido clorhídrico o muriático, como se conoce industrialmente,  
15 en agua con la que se “humedece” el salvado de arroz para asegurar un contenido de humedad del 25.0% al  
16 30.0% en base seca y un contenido de HCl del 0.1% al 0.5% en base seca, dependiendo del tipo de salvado de  
17 arroz que se use. Esta suspensión se dosifica a la salida del molino por medio de una bomba dosificadora de  
18 diafragma o peristáltica, representada por FA-101, de cualquier tipo o marca. La mezcla se homogeniza con  
19 una mezcladora de cualquier tipo o marca durante 5 a 10 minutos.

20  
21 El paso 4 consiste en transportar el salvado de arroz húmedo y acidificado por medio de un transportador de  
22 gusano, representada por TC-101, de cualquier tipo, a un extrusor de cualquier tipo o marca, de un solo  
23 tornillo o de dos tornillos. Tomando el ejemplo de un extrusor de bajo costo, tipo CIATECH de 50 a 100 kg/h,  
24 cuyo tornillo gira a 650 rpm, que cuenta con resistencias de banda para tener una fuente de calor homogénea  
25 que dé un precalentamiento a 60°C y una temperatura a la salida en la boquilla o “dado” de 105-130°C. Se  
26 tienen tiempos de residencia en el reactor o extrusor de 30 a 55 segundos. La abertura de la salida o “dado”,  
27 que es un cono truncado, considerada es de 0.5-1.0 cm.

28  
29 El paso 5 consiste en secar y moler las hojuelas obtenidas del extrusor, que tienen dimensiones de 0.01 a 2.0  
30 cm de largo por 0.01 a 1.0 cm de ancho para su procesamiento posterior. Estas hojuelas tienen una humedad  
31 en base seca entre 18.0 y 20.00% y pueden secarse hasta una humedad en base seca de 10.0±1.0% por  
32 cualquier método de secado, con cualquier equipo comercial.

33  
34 El paso 6 consiste en almacenar las harinas para su posterior procesamiento como es la extracción del aceite  
35 comestible y/o la preparación de alimentos ricos en vitaminas del complejo B y fibra como galletas, panes  
36 “integrales” y otros alimentos o para utilizarse en dietas balanceadas para animales.

37  
38 La Figura 3 es representativa de este proceso.

### 39 40 **REIVINDICACIONES DE LA INVENCION**

41 **Reivindicación 1.** Proceso de extrusión termoalcalina de granos como maíz, sorgo o cualquier semilla  
42 comestible, así como la extrusión térmico-ácida de esquilmos agroindustriales como el salvado de arroz y de  
43 granos que contienen sustancias tóxicas en forma natural que impiden su consumo humano o forrajero que  
44 consta de:

- 45 a) Limpiar mediante una cernidora de cualquier tipo y de cualquier marca los granos enteros y molerlos  
46 con cualquier tipo de molino de cualquier marca, hasta obtener un molido de textura fina tipo polvo  
47 o harina seca.
- 48 b) Mezclar los granos o harinas molidas con solución alcalina, que puede ser de cal grado alimenticio,  
49 usando una mezcladora de cualquier tipo y de cualquier marca o manualmente, según se requiera  
50 hasta obtener una harina húmeda que aún conserva sus características granulares.
- 51 c) Acidificar los esquilmos o los granos limpiados previamente con cualquier cernidora de cualquier  
52 marca, ya sean enteros o molidos con cualquier tipo de molino de cualquier marca mezclándolos con  
53 cualquier tipo de mezcladora de cualquier marca o manualmente, con solución ácida, que puede ser  
54 de ácido clorhídrico, y dejarlos reposar el tiempo necesario, según el tipo de producto a elaborar.
- 55 d) Extrudir empleando equipos conocidos como extrusores, siempre y cuando operen a condiciones que  
56 permitan tener altos esfuerzos cortantes y presiones altas a la salida del extrusor; además de alta

- 1 temperatura y baja humedad; así como corto tiempo de residencia. En casos especiales que se  
2 requiera de obtener masas directamente, se aumentará el contenido de humedad para que éstas salgan  
3 con el contenido de agua necesario para procesarlas directamente para otros usos dando un tiempo de  
4 proceso mayor dependiendo del contenido de humedad deseable en el producto extrudido.
- 5 e) Obtener hojuelas o conglomerados de baja humedad los cuales se someten a secado por cualquier  
6 método para mejorar sus propiedades de conservación.
  - 7 f) Moler las hojuelas o conglomerados extrudidos para producir sémolas o harinas que se pueden  
8 almacenar durante varios meses en empaques plásticos o de papel encerado o plastificado en un  
9 almacén fresco y a baja humedad ambiental.
  - 10 g) Tomando como ejemplo el maíz como grano preferido, originario de México, y el sorgo, grano de  
11 origen extranjero pero ya perfectamente adaptado a las condiciones de México, las hojuelas  
12 precocidas y estabilizadas que pueden remolerse e hidratarse para obtener harinas precocidas  
13 estables que se utilizan para la elaboración de masas y tortillas. También puede introducirse más  
14 agua durante el proceso de extrusión para que se obtengan masas frescas, las cuales pueden utilizarse  
15 en forma directa para producir tortillas, tamales y otros productos tradicionales mexicanos. Estos  
16 productos pueden ser de maíz 100%, de sorgo 100% o de mezclas de ambos, usando en el caso del  
17 sorgo preferentemente los granos mejorados producidos por la investigación mexicana con bajos  
18 contenidos de taninos y polifenoles.
  - 19 h) Tomando como ejemplo el frijol, otro grano originario de México, puede procesarse por extrusión  
20 ácida para reducir el consumo energético, especialmente cuando el grano está endurecido, generando  
21 sémolas que pueden emplearse en productos tradicionales mexicanos. También puede usarse para  
22 procesar leguminosas que contengan sustancias tóxicas en forma natural como la canavalina o la  
23 canavanina, que se descomponen en este proceso de extrusión ácida y que permiten aprovechar las  
24 sémolas resultantes para alimentos balanceados para animales o incluso para consumo humano, al  
25 igual que las sémolas de frijol.

26  
27 **Reivindicación 2.** Proceso de extrusión termoalcalina y/o térmico ácida de acuerdo con la reivindicación 1  
28 inciso (d), es térmico ya que aprovecha el calor generado en forma autógena por la fricción y la presión del  
29 material introducido al equipo, sobre todo en la etapa de expulsión del equipo, a través de los orificios de  
30 salida conocidos como boquillas o “dados”. También se pueden usar sistemas auxiliares para mantener la  
31 temperatura del proceso constante, como las resistencias eléctricas de banda de 30 kilowatts o “camisas” a las  
32 que se inyecta vapor de agua saturado o sobrecalentado para tener temperaturas de 120 a 130°C. La  
33 temperatura puede controlarse digitalmente por medio de sensores o termopares comerciales permitiendo  
34 tener un control más preciso de la temperatura de cocción en el equipo. Para garantizar un ahorro de energía,  
35 el extrusor comercial debe estar aislado por medio de lana de vidrio o lana mineral evitando pérdidas  
36 de energía por radiación y que éstas sean menores del 1-2% de la energía térmica aplicada, para su máximo  
37 aprovechamiento. Incluye dentro del equipo de extrusión una zona de precalentamiento definida por el  
38 fabricante del equipo, que puede ser de 25 al 30% de la longitud total del tornillo en la que, por medio de una  
39 resistencia eléctrica de banda o una camisa de vapor de agua, se garantiza una temperatura de 30 a 60°C en las  
40 harinas o sémolas húmedas que son extrudidas.

41  
42 **Reivindicación 3.** Proceso de extrusión termoalcalina de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (b), es alcalino,  
43 cuando para aprovechar la ventaja química de tener una base débil, incluye la adición de hidróxido de calcio,  
44  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , grado comestible, conocido como grado “nixtamal”, ya que esto reduce costos, aunque puede  
45 usarse grado analítico. En cualquier caso debe tener un tamaño de partícula con una malla de 200-250 y con  
46 una humedad no mayor a 1% en base seca. Esta adición da variaciones en el valor del potencial hidrógeno de  
47 las sémolas, pH, de entre 8 y 14, mejorando su valor nutritivo y sus características de conservación. Los  
48 ejemplos presentados son los casos del maíz y el sorgo.

49  
50 **Reivindicación 4.** Proceso de extrusión térmica ácida de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (c), es ácido,  
51 cuando, para aprovechar la ventaja química de tener un ácido diluido, incluye la adición de ácido clorhídrico  
52 conocido comercialmente como muriático, HCl. Esta adición da variaciones en el valor del potencial  
53 hidrógeno de las sémolas, pH, de entre 4 y 6, mejorando su valor nutritivo y sus características de  
54 conservación. Los ejemplos presentados son los casos del salvado de arroz y el frijol canavalia.

1 **Reivindicación 5.** Proceso de extrusión térmico alcalino, de acuerdo a la reivindicación 1 incisos (a) y (b), se  
2 utilizan granos integrales de los que no se remueve el pericarpio o cascarilla durante la molienda inicial, la  
3 cual se realiza con cualquier tipo de molino de cualquier marca; ya que esto desde el punto de vista nutricio  
4 aumenta el contenido de fibra dietética y desde el punto de vista reológico aumenta la plasticidad del flujo  
5 granular anterior a la zona de cocimiento y del flujo plástico no newtoniano en la zona de cocimiento del dado  
6 o boquilla.

7

8 **Reivindicación 6.** Proceso de extrusión térmica ácida, de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (c), se utilizan  
9 esquilmos enteros o molidos o granos tipo leguminosa u oleaginosa de cualquier clase, empleando cualquier  
10 tipo de molino de cualquier marca.

11

12 **Reivindicación 7.** Proceso de extrusión térmica alcalina y/o térmica ácida de acuerdo a la reivindicación 1  
13 incisos(d ), y (e), operando a baja humedad, sean las condiciones de extrusión ácidas o alcalinas. La materia  
14 prima que se alimenta al extrusor se humedece entre el 20.0 y 35.0% en base seca dependiendo de las  
15 condiciones previas del grano; a manera de que se mantengan como harinas húmedas sin perder su  
16 consistencia granular. La humedad de las materias primas por debajo del 20.0%, en b.s., dificultará el flujo en  
17 el extrusor y producirá la "fusión" de los gránulos de almidón y la desnaturalización excesiva de las proteínas  
18 y grasas formando compuestos secundarios como los de las reacciones de Maillard que darán mal sabor o  
19 inducirán la rancidez oxidativa. Una humedad superior al 35.0%, en b.s., en las materias primas daría  
20 características plásticas al fluido dentro del extrusor haciéndolo más parecido a una masa, lo que no permitiría  
21 alcanzar el grado de gelatinización del almidón adecuado para los usos posteriores de los productos  
22 extrudidos en tiempos cortos de residencia en el interior del extrusor, de menos de un minuto. Si se desean  
23 obtener masas listas para el siguiente proceso es necesario al aumentar el contenido de humedad aumentando  
24 el tiempo de proceso a un poco más de un minuto para lograr el grado de gelatinización deseable en esas  
25 masas listas para procesarse. Los esquilmos al ser procesados con contenidos de humedad relativamente  
26 bajos, tampoco pierden su estructura de cascarilla húmeda, ni se vuelven pastosos ni con consistencia de una  
27 masa ya que en este caso se desea inactivar enzimas indeseables y aumentar la vida de anaquel de los  
28 productos extrudidos obtenidos.

29

30 **Reivindicación 8.** Proceso de extrusión termoalcalina y/o térmico-ácida de acuerdo a la reivindicación 1  
31 incisos (d) y (e) se considera en lo general, como de EXTRUSIÓN SEMISECA o DE HUMEDAD  
32 INTERMEDIA o de HUMEDAD LIGERAMENTE ALTA, modificando el tiempo de proceso en función de  
33 la humedad de salida deseable, ya que son directamente proporcionales.

34

35 **Reivindicación 9.** Proceso de extrusión termoalcalina y/o térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1  
36 inciso (d), el tiempo de residencia de la materia prima durante la extrusión tanto en la zona de  
37 precalentamiento no debe de ser mayor a 30 a 90 segundos y en el dado u orificio de 5 a 15 segundos por lo  
38 que se pueden considerar, en lo general, como de EXTRUSIÓN DE CORTO TIEMPO DE RESIDENCIA.

39

40 **Reivindicación 10.** Proceso de extrusión termoalcalina y/o térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1  
41 inciso (d), se alcanzan presiones manométricas entre 10 y 20 bares; cuando la humedad inicial es baja, lo que  
42 permite desarrollar esfuerzos cortantes entre 180 y 250 s<sup>-1</sup>, por lo que se pueden considerar en lo general  
43 como de EXTRUSIÓN DE ALTA PRESIÓN Y ALTO ESFUERZO CORTANTE. Si se desea aumentar la  
44 humedad inicial deberá aumentarse el tiempo de residencia manteniendo una alta presión y un alto esfuerzo  
45 cortante.

46

47 **Reivindicación 11.** Proceso de extrusión termoalcalina, de acuerdo a la reivindicación 1 incisos (a), (b) y (e)  
48 se producen hojuelas o sémolas extrudidas termoalcalinamente a partir de maíz integral y/o de mezclas de  
49 maíz integral-sorgo al 70-30 y 80-20% en proporción peso a peso, respectivamente o, incluso, de sorgo al  
50 100%.

51

1 **Reivindicación 12.** Proceso de extrusión termoalcalina, de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (a), se debe  
2 limpiar el maíz y/o el sorgo por medio de una cernidora de cualquier marca, representada por CE-101, para  
3 eliminar “tamo”, granos rotos y cualquier clase de grano dañado o de basura. Ya limpio el grano se alimenta  
4 en una tolva dosificadora, también de cualquier marca, representada por TV-101.  
5

6 **Reivindicación 13.** Proceso de extrusión termoalcalina, de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (a) Los granos  
7 enteros se muelen en un molino de cualquier tipo o marca, donde se reduce a una malla de 200-250 en un  
8 molino de discos, tambor o martillos MD-101, de cualquier marca. Se le determina su humedad en base seca.  
9 Esta sémola integral de maíz o de sorgo o de sus mezclas es la que se alimenta al extrusor.  
10

11 **Reivindicación 14.** Proceso de extrusión termoalcalina, a la reivindicación 1 inciso (b), se debe preparar una  
12 “lechada de cal” apagada, hidróxido de calcio con agua,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , del 0.1 al 0.9% b.s., según el tipo de maíz,  
13 usando agua con la que “humedece” la sémola integral de maíz para asegurar un contenido de humedad entre  
14 24.0% y 30.0%, en base seca, y un contenido de hidróxido de calcio entre 0.1% y 0.5%, en base seca,  
15 dependiendo también del tipo de maíz que se use. Esta suspensión se dosifica a la salida del molino por medio  
16 de una bomba dosificadora, de diafragma o peristáltica, de cualquier marca, representadas por FA-101 y BD-  
17 101, homogeneizando la mezcla con una mezcladora de cualquier tipo o marca, durante 5 a 10 minutos  
18 dependiendo de la cantidad de agua que se adicione.  
19

20 **Reivindicación 15.** Para el proceso de la reivindicación 1 incisos (a) y (b) se debe transportar la sémola o  
21 harina húmeda y alcalinizada por medio de un transportador de gusano o banda, de cualquier tipo o marca,  
22 representado por TC-101, o incluso manualmente a un extrusor, de cualquier tipo o marca, de un solo tornillo  
23 o de dos tornillos. Tomando el ejemplo de un extrusor de bajo costo, tipo CIATECH de un solo tornillo, que  
24 procesa entre 50 y 100 kg/h, cuyo tornillo gira de 550-850 rpm, que cuenta con resistencias de banda para  
25 tener una fuente de calor homogénea que dé un precalentamiento a 50-60°C y una temperatura a la salida en  
26 la boquilla o “dado”, de 105-125°C. Se tienen tiempos de residencia en el reactor o extrusor de 30 a 50  
27 segundos. La abertura de la salida o “dado” considerado, que es del tipo de cono truncado, es de 0.5-1.0 cm.  
28

29 **Reivindicación 16.** Proceso de extrusión termoalcalina, de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (e), se  
30 obtienen hojuelas de 0.01 a 5.0 cm x 0.01 a 1.0 cm de espesor, aproximadamente. Estas hojuelas tienen una  
31 humedad en base seca entre 16.0 y 21.0% b.s. Estas hojuelas pueden secarse hasta una humedad en base seca  
32 de  $10.0 \pm 1.0\%$  b.s. por cualquier método de secado y en cualquier tipo de secador y, posteriormente, remolerse  
33 a tamaños de malla 200-250 para almacenarse y después utilizarse para producir masas y tortillas.  
34

35 **Reivindicación 17.** Proceso de extrusión termoalcalina, de acuerdo a la reivindicación 1 inciso (h), se debe  
36 humedecer la harina precocida entre 45.0 y 60.0% b.s., dependiendo del tipo de grano del que se obtuvo para  
37 que tenga características similares a la masa de maíz nixtamalizado. También puede alimentarse al extrusor  
38 con un mayor contenido de humedad para obtener masas aumentando el tiempo de residencia para garantizar  
39 la gelatinización parcial deseable.  
40

41 **Reivindicación 18.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (c), se  
42 considerará como ejemplo preferido la producción de harina de frijol precocido. El ejemplo que se emplea es el  
43 del uso de una leguminosa que contiene sustancias tóxicas en forma natural cuyo nombre científico es  
44 *Canavalia ensiformis* del que se produce una sémola o harina extrudida. Puede usarse el proceso para  
45 cualquier tipo de leguminosa u oleaginosa.  
46

47 **Reivindicación 19.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (a), se debe  
48 limpiar el frijol canavalia por medio de una cernidora, CE-101, de cualquier tipo y/o marca, para eliminar  
49 “tamo” de basura. Ya limpio se alimenta en una tolva dosificadora de cualquier tipo y/o marca, representada  
50 por TV-101.  
51

52 **Reivindicación 20.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (a), se debe  
53 moler el grano en cualquier tipo y/o marca de molino que permita obtener sémolas y/o harinas determinando  
54 la humedad de la sémola molida para definir el siguiente paso de humidificarla previamente al paso de  
55 alimentarla al extrusor.  
56

1 **Reivindicación 21.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (c), se debe  
2 preparar una solución de ácido clorhídrico en agua con la que se “humedece” la sémola o harina de frijol para  
3 asegurar un contenido de humedad del 25.0% al 30.0% en base seca y un contenido de HCl del 0.1% al 0.5%  
4 en base seca, dependiendo del tipo de fríjol que se use. Esta suspensión se dosifica a la salida del molino por  
5 medio de una bomba dosificadora de diafragma o peristáltica, representada por: FA-101. La mezcla se  
6 homogeneiza con cualquier tipo de mezcladora durante 5 a 10 minutos, dependiendo del tipo de frijol  
7 empleado.  
8

9 **Reivindicación 22.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (d), se debe  
10 transportar la sémola o harina de frijol por medio de un transportador de gusano de cualquier marca y/o tipo,  
11 TC-101, a un extrusor de cualquier tipo y/o marca, de uno o dos tornillos, representado por EX101. Tomando  
12 el ejemplo de un extrusor de bajo costo, tipo CIATECH que procese entre 50 y 100 kg/h, cuyo tornillo gira a  
13 650 rpm, que cuenta con resistencias de banda para tener una fuente de calor homogénea, que dé un  
14 precalentamiento a 60°C y que permita una temperatura a la salida, en la boquilla o “dado” de 105-120°C. Se  
15 tienen tiempos de residencia en el reactor o extrusor de 30 a 35 segundos. La abertura de la salida o “dado”,  
16 de tipo de cono truncado, considerada es de 0.5 a 1.0 cm.  
17

18 **Reivindicación 23.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 incisos (e), (f) y  
19 (g), se debe realizar el secado y remolienda de las hojuelas obtenidas del proceso de extrusión, del que se  
20 obtienen hojuelas de 0.01 cm x 2.0cm de largo y ancho respectivamente y de aproximadamente 0.01 a 1.0 cm  
21 de espesor, aproximadamente. Estas hojuelas tienen una humedad en base seca entre 18.0 y 20.0% y pueden  
22 secarse hasta una humedad en base seca de 10.0±1.0% por cualquier método de molienda y secado empleando  
23 cualquier marca o tipo de equipos.  
24

25 **Reivindicación 24.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (g), se deben  
26 almacenar las harinas en bolsas de papel encerado o plástico inocuo para su posterior preparación en mezclas  
27 con maíz, sorgo u otros cereales produciendo tortillas o tamales tipo "tlacoyo" o "tlatlaoyo", palabras de  
28 origen náhuatl que significan una especie de empanada hecha de una tortilla gruesa de forma oblonga o  
29 triangular que se rellena con masa de frijol y/o yerbas comestibles o para utilizarse en piensos o forrajes de  
30 animales como una fuente de proteína y carbohidratos.  
31

32 **Reivindicación 25.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (c), se  
33 reivindica el proceso para la estabilización de salvado de arroz extrudido ácidamente u otros esquilmos con  
34 características útiles para su procesamiento posterior una vez estabilizados.  
35

36 **Reivindicación 26.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (c), se debe  
37 limpiar el salvado de arroz por medio de una cernidora representada por CE- 101, de cualquier tipo y/o marca,  
38 para eliminar “tamo” o basuras. Ya limpio se alimenta en una tolva dosificadora, TV-101, de cualquier tipo  
39 y/o marca.  
40

41 **Reivindicación 27.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (c), se debe  
42 determinar su humedad en base seca. Este salvado de arroz se humidificará y se alimentará a cualquier tipo de  
43 extrusor de alta presión y alto esfuerzo cortante.  
44

45 **Reivindicación 28.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (c), se debe  
46 preparar una solución de ácido clorhídrico o muriático, como se conoce industrialmente, en agua con la que se  
47 “humedece” el salvado de arroz para asegurar un contenido de humedad del 25.0 al 30.0% en base seca y un  
48 contenido de HCl del 0.1 al 0.5% en base seca, dependiendo del tipo de salvado de arroz que se use. Esta  
49 suspensión se dosifica a la salida del molino por medio de una bomba dosificadora de diafragma o  
50 peristáltica, representada por FA-101, de cualquier tipo o marca. La mezcla se homogeneiza con una  
51 mezcladora de cualquier tipo o marca durante 5 a 10 minutos.  
52

53 **Reivindicación 29.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 inciso (d), se debe  
54 transportar el salvado de arroz húmedo y acidificado por medio de un transportador de gusano, representada  
55 por TC-101, de cualquier tipo, a un extrusor de cualquier tipo o marca, de un solo tornillo o de dos tornillos.  
56 Tomando el ejemplo de un extrusor de bajo costo, tipo CIATECH de 50 a 100 kg/h, cuyo tornillo gira a 650

1 rpm, que cuenta con resistencias de banda para tener una fuente de calor homogénea que dé un  
2 precalentamiento a 60°C y una temperatura a la salida en la boquilla o “dado” de 105-130°C. Se tienen  
3 tiempos de residencia en el reactor o extrusor de 30 a 55 segundos. La abertura de la salida o “dado”, que es  
4 un cono truncado, considerada es de 0.5-1.0 cm.  
5

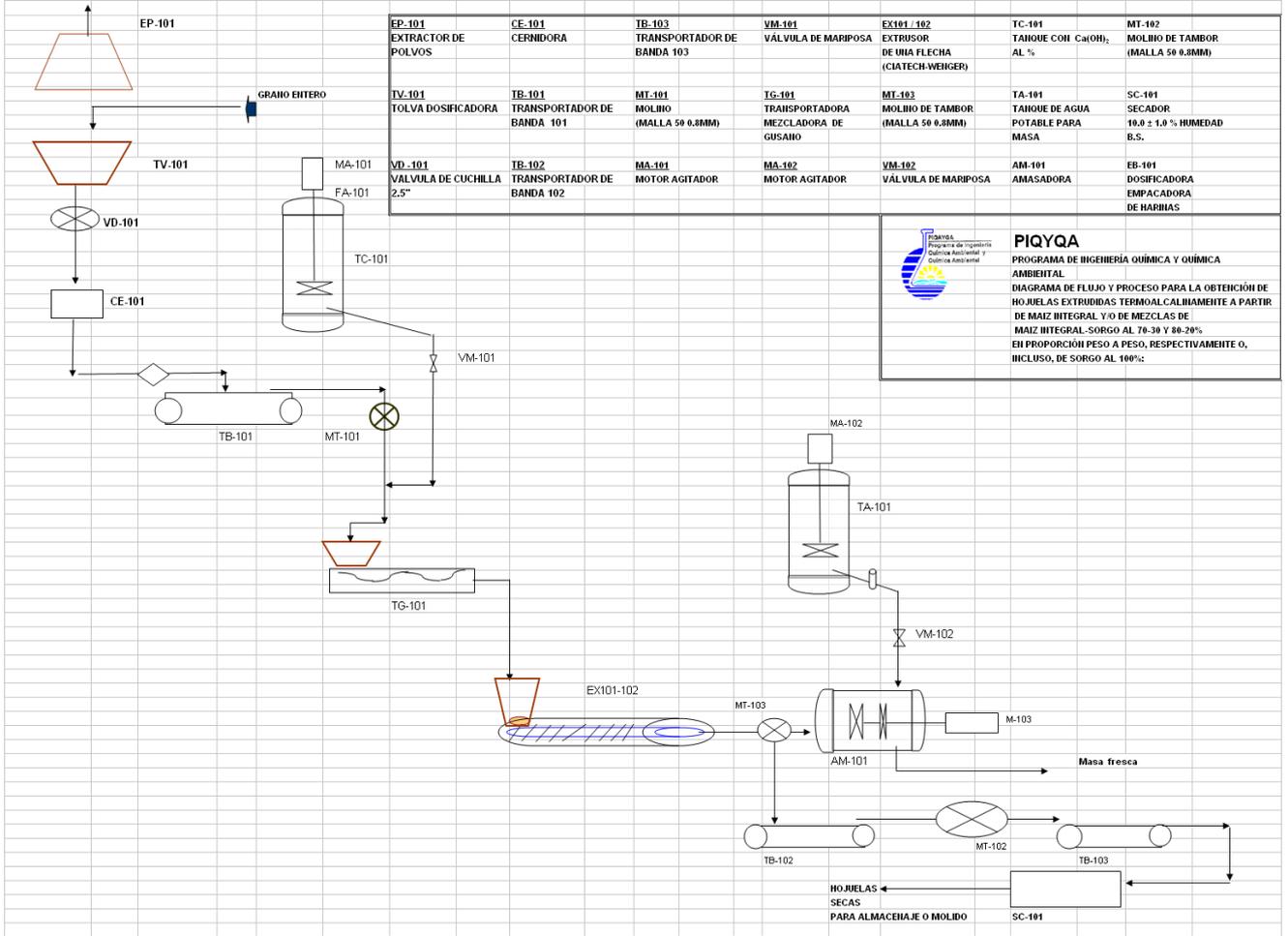
6 **Reivindicación 30.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 incisos (e) y (f), se  
7 deben secar y moler las hojuelas obtenidas del extrusor, que tienen dimensiones de 0.01 a 2.0 cm de largo por  
8 0.01 a 1.0 cm de ancho para su procesamiento posterior. Estas hojuelas tienen una humedad en base seca entre  
9 18.0 y 20.00% y pueden secarse hasta una humedad en base seca de  $10.0 \pm 1.0\%$  por cualquier método de  
10 secado, con cualquier equipo comercial.  
11

12 **Reivindicación 31.** Proceso de extrusión térmico-ácida de acuerdo con la reivindicación 1 incisos (f) y (g), se  
13 deben almacenar las harinas para su posterior procesamiento, como es la extracción del aceite comestible y/o  
14 la preparación de alimentos ricos en vitaminas del complejo B y fibra como galletas, panes "integrales" y  
15 otros alimentos o para utilizarse en dietas para animales.  
16

1 ANEXO

2

3



4

5

6

7

8

9

10

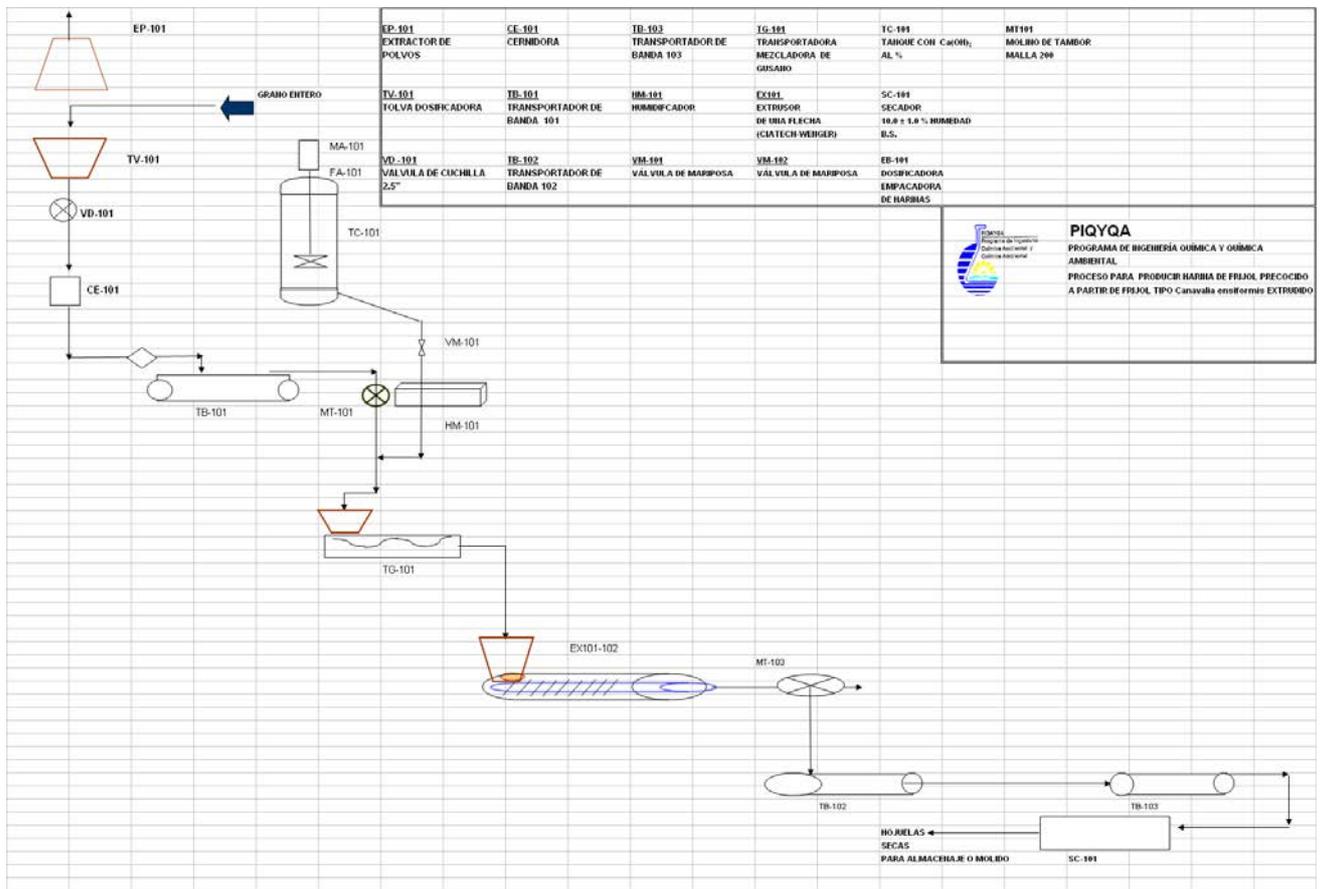
11

12

13

**FIGURA 1. Proceso para producir hojuelas extrudidas termoalcalinamente a partir de granos. Ejemplo: Maíz integral y/o de mezclas de maíz integral-sorgo al 70-30 y 80-20% en proporción peso a peso, respectivamente o, incluso, de sorgo al 100%**

1

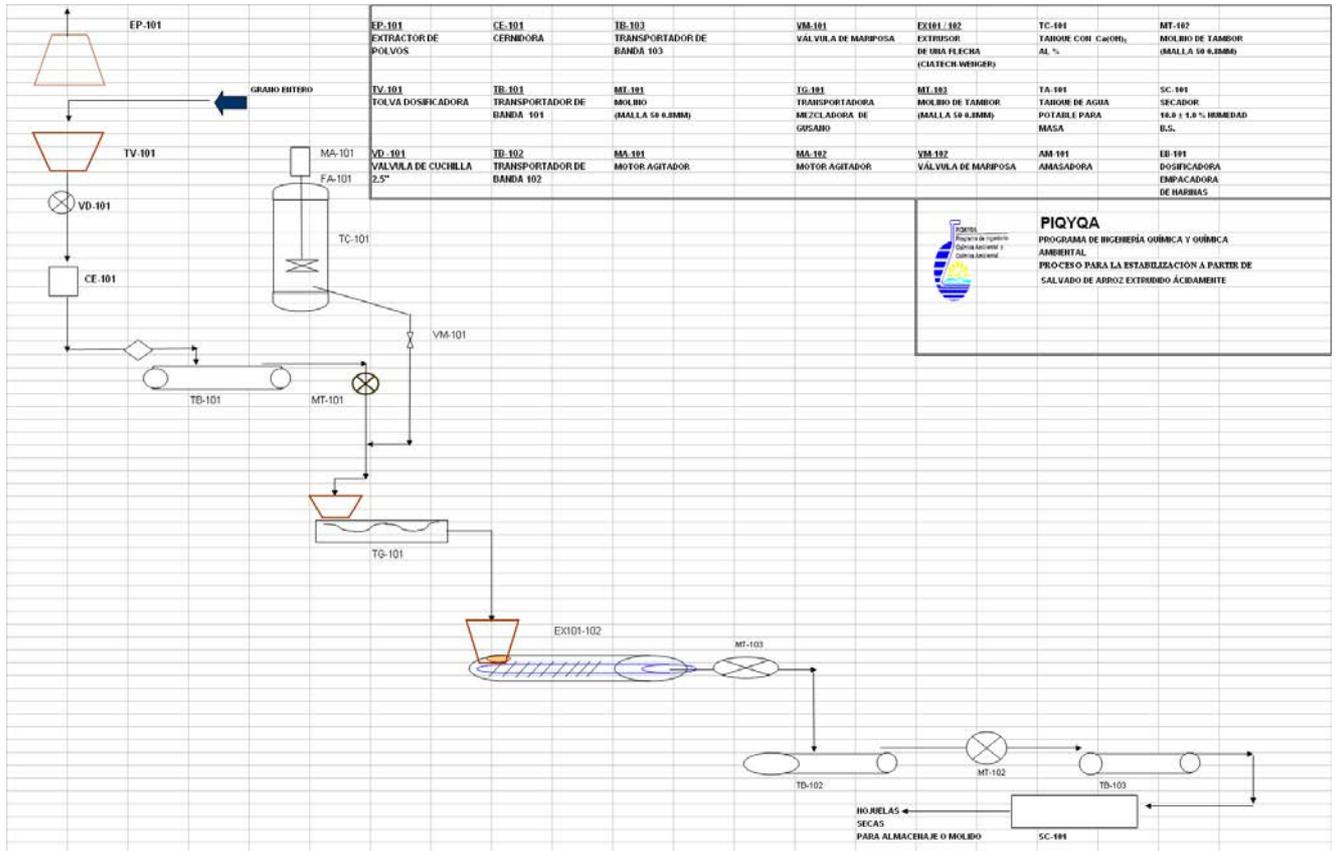


2

3 **FIGURA 2. Proceso para producir hojuelas extrudidas termoacidamente a partir de granos. Ejemplo:**  
 4 **Harina de frijol precozido a partir de frijol tipo *Canavalia ensiformis* extruido**

5  
6  
7

1



2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28

**FIGURA 3. Proceso para producir hojuelas extrudidas termoacidamente a partir de esquilmos agroindustriales. Ejemplo: Estabilización de salvado de arroz para reducir su actividad lipolítica mediante extrusión ácida**

**MATERIAL ADICIONAL**

**ARTÍCULO**

**INTERNACIONAL**

# Starch/Stärke

International Journal for the Investigation, Processing  
and Use of Carbohydrates and their Derivates

www.starch-journal.de

---

## Contents

Volume 56, No. 11, November 2004

### Research Papers

- 513 Study of the Thermoplastic Wheat Starch Cationisation Reaction under Molten Condition  
A. Ayoub, F. Berzin, L. Tighzert, C. Bliard
- 520 Relation between Viscous Characteristics and Dextrose Equivalent of Maltodextrins  
L. Dokic, J. Jakovljevic, P. Dokic
- 526 Viscoamylographic Studies on *Zea Mays* [Mexican White Tuxpeño Maize] Partial Gelatinization with  
Calcium Hydroxide  
S. A. Sánchez-Tovar, A. Salazar-Zazueta, B. Mena-iniesta, C. Durán-de-Bazúa
- 535 Physicochemical, Thermal, Morphological and Pasting Properties of Starches from some Indian Black  
Gram (*Phaseolus mungo* L.) Cultivars  
N. Singh, M. Kaur, K. Singh Sandhu, H. S. Guraya
- 545 The Effects of Plasticizers Containing Amide Groups on the Properties of Thermoplastic Starch  
X. Ma, J. Yu
- 552 Book Review
- 553 New Publications
- 557 Patents
- 561 Company News
- 562 Preview of the Next Issue

---

Access the Journal Starch/Stärke from your desktop. The journal is available through Wiley InterScience at <http://www.interscience.wiley.com>. Articles are published online days or even weeks before the printed issues are mailed, through Wiley InterScience's Early View™ service. A full rate subscription entitles users to online access to full text plus access to the tables of contents and abstracts of hundreds of other Wiley journals.

Speak to your librarian or visit the site for full details. Society members, please contact your society about online access to the journal.



**MATERIAL**

**ADICIONAL**

**ARTÍCULO**

**NACIONAL**

# Cinética de reacción para la gelatinización bajo tratamiento térmico alcalino de almidón de maíz en un extrusor considerado como un reactor continuo de flujo tipo pistón

Salvador Alejandro Sánchez-Tovar\*, Alfredo Salazar-Zazueta(1), Baltasar Mena-Iniesta(2) y María del Carmen Durán-de-Bazúa

UNAM. Facultad de Química, Grupo de Tecnologías más Limpias (PIQA y QA)  
Ciudad Universitaria. 04510 México D.F. Tels. 5622-5300 al 04. Fax 5622-5303  
Correos electrónicos (e-mail): tiscalva@ticsa.com.mx . mcduran@servidor.unam.mx

(1) Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo. México  
(2) UNAM. Instituto de Investigaciones en Materiales. Ciudad Universitaria. 04510 México D.F.

## RESUMEN

El pueblo de México ha hecho del maíz su alimento básico desde tiempos precolombinos, obteniendo gran variedad de productos alimenticios como las "tortillas", los "tamales", los "atoles" y bebidas fermentadas como el "teshuino" y el "pozol". La textura de ellos depende principalmente de la gelatinización bajo tratamiento térmico alcalino del almidón de maíz en una reacción que se especula que consiste en la asociación del hidróxido de calcio y el agua por medio de puentes de hidrógeno a los grupos oxhidrilo de las cadenas del almidón de maíz, fenómeno conocido como "nixtamalización" (del Náhuatl o Azteca "nextli", cenizas de cal y "tamalli", masa de maíz cocido). La extrusión bajo tratamiento térmico alcalino ha demostrado ser eficiente energética y ambientalmente, además de que es operacionalmente efectiva para remplazar a la "nixtamalización" tradicional. Considerando al extrusor como un reactor de flujo continuo tipo "pistón", en el presente trabajo se presenta un estudio de la cinética de reacción durante la extrusión bajo tratamiento térmico alcalino de almidón de maíz. Los resultados indican que se tiene una cinética de primer orden.

**Palabras clave:** *Zea mays*, gelatinización, hidróxido de calcio, extrusión termoalcalina

**Key words:** *Zea mays*, gelatinization, calcium hydroxide, thermoalkaline extrusion

\*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia  
(Recibido: Noviembre 14, 2000. Aceptado: Diciembre 17, 2000)

## INTRODUCCIÓN

La "nixtamalización" (del Náhuatl o Azteca "nextli", cenizas de cal y "tamalli", masa de maíz cocido) es un proceso desarrollado varios miles de años antes que los europeos se tropezaran con el continente ahora conocido como América en su viaje al lejano Oriente. Este proceso consiste en cocer el grano de maíz entero con una lechada de cal,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dejando que se lleven a cabo reacciones de hidrólisis de almidones y matrices proteínicas, que promuevan cambios en la textura y calidad nutritiva del maíz empleando tiempos de proceso que oscilan entre tres y 15 horas (Durán, 1972, 1977, 1978; Durán-de-Bazúa y col., 1979; Durán-de-Bazúa, 1988; Durán y Guerra, 1980; Hernández-Ayala y col., 1996; Saldaña-Morales, 1987; Vásquez-Reyes y col., 1996).

Los gránulos de almidón, compuestos esencialmente de amilosa y amilopectina, son tan variados como especies de gramíneas puedan existir e inclusive cambian dentro de las variedades de una misma especie (Bull, 1971; Camire y col., 1990). Los gránulos de almidón de la gran mayoría de las especies de cereales cuando se someten a un proceso de calentamiento controlado en un exceso de agua presentan el conocido fenómeno de la gelatinización. En su primera etapa se da la disrupción de los puentes de hidrógeno donde el agua penetra y se alcanza la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), dándose la pérdida de birrefringencia. Este proceso es prácticamente irreversible. Inmediatamente, en