



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIDAD ZACATENCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

*“Determinación del caudal natural en  
la cuenca transfronteriza del Río*

*Bravo/Grande”*

T E S I S

PARA OBTENER

EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

P R E S E N T A:

YANET ADRIANA GONZÁLEZ ESCORCIA

DIRECTORES:

DR. SAMUEL SANDOVAL SOLIS

DR. JUAN MANUEL NAVARRO PINEDA



CIUDAD DE MÉXICO (DICIEMBRE). 2016



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de         México         siendo las   12:00   horas del día   6   del mes de   diciembre   de   2016   se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de         E.S.I.A.-U.Z.         para examinar la tesis de grado titulada:

**“Determinación del caudal natural en la cuenca trasfronteriza del Rio Bravo/Grande”**

**GONZALEZ**

Apellido paterno

**ESCORCIA**

Apellido materno

**YANET ADRIANA**

Nombre(s)

Con registro:

B	1	4	0	1	9	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

  
Dr. Juan Manuel Navarro Pineda

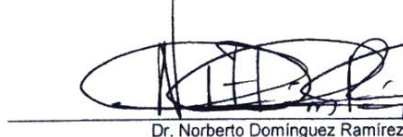
  
Dr. Samuel Sandoval Solis

  
M. en C. Luis Pomposo Viguera Muñoz

  
Dr. Mario Ulloa Ramirez

  
M. en C. Lucio Fragoso Sandoval

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. Norberto Domínguez Ramírez



ngs\*



## **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

### **SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

#### **CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, el día **19 del mes de diciembre del año 2016**, la que suscribe **González Escorcía Yanet Adriana** alumna del Programa de Maestría en Ingeniería Civil, con número de registro **B140194**, adscrita al **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco**, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Samuel Sandoval Solís y el Dr. Juan Manuel Navarro Pineda** y cede los derechos del trabajo titulado “Determinación del caudal natural en la cuenca transfronteriza del Rio Bravo/Grande”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones [yanyady\\_2601@hotmail.com](mailto:yanyady_2601@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

González Escorcía Yanet Adriana

## **Dedicatoria**

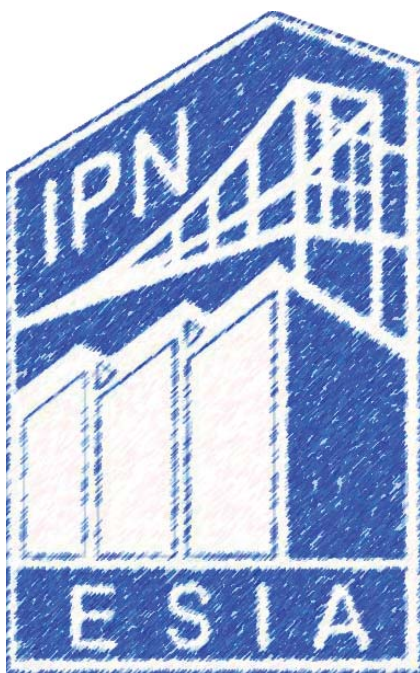
*A mis padres Alma Leticia Escorcía Lozoya y Ricardo González Chávez quienes me han guiado durante todas las etapas de mi vida y gracias a sus lecciones se lo que deseo para mi vida, los amo.*

*A mis hermanos, Yaredh por ser mi apoyo incondicional y estar conmigo en todo momento eres la mejor hermana tutty a Richy por ser tan tierno y cariñoso sé que lograras todo lo que te propongas confió en ti y a Jessica por llenar de risas mi vida y brindarme consejos sobre las decisiones que debo tomar, los amo herman@s y estoy orgullosa de ustedes.*

*A la familia Escorcía Lozoya y González Chávez por siempre darme ánimos de seguir con mis metas, son la mejor familia.*

*A Daniel Sánchez Rivas por acompañarme durante toda la elaboración de este proyecto, por estar a mi lado en momentos difíciles y apoyarme incondicionalmente; por las risas, juegos y consejos, te amo calabacín.*

*A mis amigos Karina, Cris, Pepé, Víctor, Luis, Omar, Azaret, Raúl, Edgar y Antonio por su amistad sincera, por los ánimos y hacer que el camino fuera divertido, los quiero.*



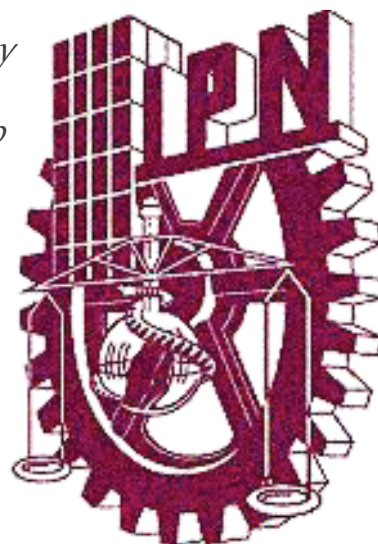
## **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios por darme la fuerza, paciencia, sabiduría y salud para culminar este proyecto así como poner en mi camino a las personas indicadas que me han brindado apoyo y amistad.*

*Al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y en especial a la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA Zacatenco) mi alma mater, por forjarme profesionalmente y formar parte de mi historia académica, por siempre “La técnica al servicio de la patria”.*

*Al Doctor Samuel Sandoval Solís (Sam), por su apoyo durante mi estancia en UC Davis en California y el asesoramiento en el desarrollo de este proyecto, por brindarme la oportunidad de trabajar con él y de vivir una gran experiencia, por enseñarme que todo se puede con trabajo duro y buenos hábitos, por confiar en mí y sobre todo por brindarme su amistad.*

*Al Doctor Juan Manuel Navarro por sus acertadas aportaciones en este proyecto y el apoyo brindado durante este proceso.*



---

*Al Doctor Mario Ulloa Ramírez, al Maestro Luis Pomposo Viguera así como al Maestro Lucio Fragoso Sandoval por dedicarle tiempo a la revisión de este proyecto brindando su opinión y correcciones acertadas.*

*A CONACYT por el apoyo económico brindado durante mi estancia de investigación en UC Davis, California, por apoyar la investigación en México y brindar oportunidades de crecimiento académico.*

## Resumen

Los ríos son una fuente natural de vida, ayudan a mantener un equilibrio en su hábitat, y son capaces de realizar diversas funciones tales como purificar el agua, moderar inundaciones y sequías, proveen alimentos, espacios de reproducción, nutrientes, entre otras funciones y lo más importante, son la fuente de agua principal utilizada para satisfacer necesidades humanas. En la actualidad es notable los cambios que han sufrido los ríos debido a las acciones antropogénicas, que modifican el régimen del caudal natural, causando impactos ambientales en sus ecosistemas acuáticos y ribereños. La presencia de presas genera cambios en los patrones de flujo y almacenamiento; así mismo, las derivaciones agrícolas alteran el flujo natural mediante la reducción de la cantidad de agua del caudal. Cuando el caudal sufre estas alteraciones es llamado caudal regulado y este es menor al caudal natural debido a las pérdidas de agua que ha experimentado. El objetivo de este estudio es determinar el régimen de flujo natural del río Bravo/Grande (RBG) desde 1901-1913, considerando registros históricos de caudal y de desviación de agua usando la ecuación de continuidad. Este estudio muestra la variación del caudal hidrológico dentro de cada año y entre años. Los resultados muestran dos regímenes de flujo distintivos, en la rama superior del (RBG), aguas arriba de Ojinaga / Presidio existe un distintivo régimen de flujo de derretimiento de nieve generado por la caída de nieve en las montañas de San Juan, en el estado de Colorado; y en la rama inferior del RBG, existe un distintivo régimen de flujo estación del monzón generado por los huracanes que pasan sobre o cerca de la cuenca RBG desde el Océano Pacífico y el Golfo de México. Este estudio también compara el agua natural disponible desde 1901 hasta 1913, con la estimación hecha para la cuenca del RBG por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) en 1944. Las aplicaciones potenciales para el régimen natural de caudales se pueden incluir para ayudar a determinar los caudales ambientales a lo largo de la cuenca del RGB.

## Abstract

Rivers are a natural source of life, they support ecosystem habitat and are capable of performing various functions such as purifying water, moderating floods and droughts, providing food, space for wildlife reproduction, holding nutrients, among other functions, most importantly, they are an important source of water for satisfying human needs. Nowadays it is noticeable the changes that rivers have suffered due to anthropogenic actions that modify the natural flow regime, causing environmental impacts in their aquatic and riparian ecosystems. The presence of dams generates change in flow patterns and storage. Likewise, agricultural diversions alter the natural flow by reducing the amount of streamflow. When the flow undergoes these changes it is called regulated flow, and it is less than the natural flow due to the water losses that it has experienced. The objective of this study is to determine the natural flow regime of the (RBG), from 1901 to 1913, considering historic streamflow record and water diversion using the continuity equation. This study shows the hydrologic variation of streamflow within season and between years. Results show two distinctive natural flow regimes. In the upper branch of the (RBG) basin, above Ojinaga / Presidio, there is a distinctive snowmelt flow regime driven by snowfall in the San Juan mountains of Colorado. In contrast, in the lower branch of the RBG, there is a distinctive monsoon season flow regime driven by hurricanes landing on the RBG basin from the Pacific Ocean and the Gulf of Mexico. This study also compares the natural water available from 1901 to 1913 with the estimation made for the RBG basin by the International Boundary and Water Commission in 1944. Potential applications for the natural flow regime may include helping determine environmental flows throughout the RBG basin.



## Contenido

Abstract .....	viii
Índice de Tablas.....	xiii
Índice de figuras .....	xv
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
Antecedentes .....	1
Planteamiento del problema .....	3
Justificación .....	4
Hipótesis.....	4
Objetivos .....	5
Objetivo General .....	5
Objetivo Específico.....	5
<b>CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
1.1 Los ríos y su importancia en el ecosistema.....	6
1.2 Régimen del caudal natural en los ríos .....	8
1.3 Riesgos del ecosistema fluvial.....	9
1.4 Equilibrio entre necesidades humanas y los ecosistemas fluviales.....	12
1.4.1 Caudal ecológico .....	13
1.4.1.1 ¿Qué es el caudal ecológico? .....	13
1.4.1.2 Conceptos de caudal ecológico.....	17
1.4.1.3 Clasificación de los métodos.....	18
1.4.1.4 Evaluación de contextos de caudal ecológico (Environmental Flows “EFs”).....	19
1.4.1.5 Métodos de caudal ecológico .....	20
1.4.1.6 Orígenes de evaluación de caudales ecológicos.....	22
1.4.1.7 Métodos estadísticos o hidrológicos .....	22
1.4.1.8 Métodos de clasificación hidráulica.....	22
1.4.1.9 Métodos hidráulicos más simulación de hábitat .....	23

1.4.1.10 Métodos holísticos .....	24
1.5 Metas ecológicas .....	24
1.5.1 Restauración de los patrones del caudal natural de un río .....	25
1.5.1.1 Restauración de caudal base o flujo bajo escurrimiento basal .....	26
1.5.1.2 Restauración de caudales máximos .....	26
1.5.1.3 Restauración de inundaciones .....	27
<b>CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA .....</b>	<b>28</b>
2.1 Ecuación de Continuidad.....	31
2.1.1 No considerando escurrimientos por cuenca propia.....	31
2.1.2 Considerando escurrimientos por cuenca propia .....	33
2.1.3 Periodo de Análisis .....	34
2.1.4 Fuente de Información .....	35
2.2 Componentes de la Ecuación de Continuidad .....	38
2.2.1 Entradas de masa de agua al volumen de control.....	38
2.2.2 Salidas de masa de agua del volumen de control.....	38
2.2.2.1 Uso consuntivo.....	38
2.2.2.1.1 Uso consuntivo total .....	39
2.2.2.1.2 Uso consuntivo neto .....	41
2.2.2.2 Derivaciones para riego y retornos.....	41
2.2.3 Escurrimientos por cuenca propia (Incremental Flow “IF”) .....	42
<b>CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO: RÍO BRAVO/GRANDE.....</b>	<b>43</b>
3.1 Descripción del río Bravo .....	43
3.1.1 Ubicación geográfica .....	46
3.1.2 Región hidrológica administrativa RHA.....	47
3.1.3 Hidrología .....	49
3.1.4 Uso de suelo y vegetación.....	51
3.1.5 Geomorfología .....	53

3.1.6 Precipitación.....	54
3.1.7 Clima.....	56
3.1.8 Flora y Fauna .....	57
3.1.9 Actividad Socioeconómica .....	59
3.1.10 Municipios y Población .....	60
3.1.11 Estaciones Hidrométricas y Climatológicas.....	62
3.1.12 Infraestructura hídrica .....	63
3.1.12.1 Presas .....	63
3.2 Tratados internacionales.....	65
3.2.1 Convención de 1906.....	65
3.2.2 Tratado de 1944 .....	65
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS DEL CAUDAL NATURAL RÍO BRAVO/GRANDE (RBG) .....</b>	<b>68</b>
4.1 Marco de estudio .....	68
4.1.1 Consideraciones .....	68
4.2 Volumen de control.....	69
4.3 Determinación del caudal natural del Río Bravo .....	70
4.4 Afluentes .....	71
4.4.1 Río Conchos.....	72
4.4.1.1 Derivaciones.....	73
4.4.1.2 Retornos.....	78
4.4.2 Río Pecos .....	79
4.4.3 Río Devils .....	80
4.4.4 Río Salado .....	81
4.4.4.1 Derivaciones .....	82
4.4.5 Río San Juan.....	86
4.5 Cauce principal .....	87
4.5.1 RBG Aguas Arriba del Río Conchos.....	88

4.5.2 RBG Aguas Abajo del Río Conchos .....	89
4.5.3 RBG Aguas abajo del Río Langtry .....	90
4.5.4 RBG Aguas Abajo del Río Devils .....	92
4.5.5 RBG Aguas Abajo de Eagle Pass .....	93
4.5.6 RBG Aguas Abajo de Laredo .....	94
4.5.7 RBG Aguas Abajo de Roma.....	97
4.5.8 RBG Aguas Abajo de Brownsville .....	100
4.5.8.1 Derivaciones.....	101
<b>CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DEL CAUDAL NATURAL ESTIMADO CON ESTIMACIONES HISTÓRICAS.....</b>	<b>107</b>
5.1.1 Hidrología diaria 1901-1913.....	107
5.1.2 Hidrología Estimada 1900-1944.....	108
5.1.3 Comparación de estimaciones .....	108
<b>CAPÍTULO 6 FUNCIONES ECOLÓGICAS DEL CAUDAL NATURAL DEL RÍO BRAVO/GRANDE (RBG) .....</b>	<b>111</b>
6.1 Descripción de funciones ecológicas .....	111
6.1.1 Discusión conforme a los hidrogramas.....	112
<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>117</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>121</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>123</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>128</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1-1. Servicios ecosistemáticos de soporte vital proporcionados por los ríos, los humedales y otros ecosistemas de agua dulce, (Postel & Richter, 2003). .....	7
Tabla 1-2 Amenazas a los servicios ecosistemáticos del río debido a actividades humanas, (Richter, 2003). .....	10
Tabla 1-3. Categorías de métodos de caudal ecológico, (Tharme 2003; Dyson et al. 2003). ...	18
Tabla 2-1. Información utilizada para el estudio .....	35
Tabla 2-2. Fuente de información consultada.....	37
Tabla 2-3. Métodos para calcular el uso consuntivo (ET).....	39
Tabla 2-4. Valores de $K\alpha$ . Elaboración propia, (Aparicio, 2001).....	40
Tabla 3-1.Región Hidrológica Administrativa (RHA). Elaboración propia, datos de (CONAGUA, 2010). .....	48
Tabla 3-2. Precipitación en la cuenca Río Bravo/ Grande. ....	54
Tabla 3-3. Presas más importantes en la Cuenca Río Bravo/Grande (CILA & SRE, 1964).....	63
Tabla 4-1. Afluentes considerados para el estudio. Elaboración propia. ....	71
Tabla 4-2. Resumen estadístico de los afluentes.....	71
Tabla 4-3. Valores de $T_j$ para los distritos de riego. Elaboración propia. ....	73
Tabla 4-4. Valores de $i_j$ para los distritos de riego. Elaboración propia. ....	74
Tabla 4-5. Valores de $K\alpha$ . Elaboración propia, datos de (Aparicio, 2001). ....	74
Tabla 4-6. Valores de $K\alpha$ para los distritos de riego. Elaboración propia. ....	75
Tabla 4-7. Uso consuntivo total Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090). Elaboración propia.....	75
Tabla 4-8. Uso consuntivo total Delicias (DR-005). Elaboración propia. ....	75
Tabla 4-9. Uso consuntivo total Río Florido (DR-103). Elaboración propia. ....	76
Tabla 4-10. Comparación de uso consuntivo neto .....	77
Tabla 4-11. Área considerada para la derivación. Elaboración propia, datos de Cravioto y Lowry (1944). .....	78

Tabla 4-12. Valores de $Tj$ para el distrito de riego Don Martin. Elaboración propia.....	82
Tabla 4-13. Valores de $ij$ para los distritos de riego. Elaboración propia. ....	82
Tabla 4-14. Valores de $K\alpha$ . Elaboración propia, datos de (Aparicio, 2001). ....	83
Tabla 4-15. Valores del $K\alpha$ para el distrito de riego Don Martin (DR-004). Elaboración propia. .....	83
Tabla 4-16. Uso consuntivo total en Don Martin (DR-004). Elaboración propia. ....	84
Tabla 4-17. Comparación de uso consuntivo neto .....	85
Tabla 4-18. Área considerada para la derivación. Elaboración propia, datos de Cravioto (1946). .....	85
Tabla 4-19. Puntos de análisis en el cauce principal.....	87
Tabla 4-20. Resumen estadístico del cauce principal en el Río Bravo/Grande .....	88
Tabla 4-21. Valores de $Tj$ para el distrito de riego en Brownsville. Elaboración propia.....	101
Tabla 4-22. Valores de $ij$ para el distrito de riego Brownsville. Elaboración propia. ....	101
Tabla 4-23. Valores de $K\alpha$ . Elaboración propia, datos de (Aparicio, 2001). ....	102
Tabla 4-24. Valores de $K\alpha$ para el distrito de riego en Brownsville. Elaboración propia. ....	102
Tabla 4-25. Uso consuntivo total en DR Brownsville. Elaboración propia. ....	102
Tabla 4-26. Área considerada para la derivación consideradas por Estados Unidos. Elaboración propia.....	104
Tabla 5-1. Ecurrimientos promedios anuales con gastos diarios .....	107
Tabla 5-2. Ecurrimientos promedios anuales estimados por Orive (1945).....	108
Tabla 5-3. Comparación de escurrimientos promedios anuales estimados por Orive (1945) contra los calculados en la presente tesis. ....	109
Tabla 6-1. Funciones Ecológicas (Postel & Richter, 2003) .....	111

## Índice de figuras

Figura 1-1 Clasificación de las Metodologías para caudales ambientales (Tharme & R.E, 2003)	18
Figura 2-1. Modelo de referencia. Elaboración propia	30
Figura 2-2. Ecuación de continuidad	31
Figura 2-3. Volumen de control no considerando <i>I Ft</i> . Elaboración propia.	32
Figura 2-4. Volumen de control considerando <i>I Ft</i> . Elaboración propia.	33
Figura 2-5. Estaciones hidrométricas consultadas	37
Figura 2-6. Pendiente. Elaboración propia	41
Figura 2-7. Escurrimientos por cuenca propia	42
Figura 3-1. Parque Nacional Big Bend, Texas ( (Rios, s.f.)	46
Figura 3-2. Cuenca del Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO	47
Figura 3-3. Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA). Elaboración propia, datos de CONABIO.	48
Figura 3-4. Hidrología de la Cuenca Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.	50
Figura 3-5. Vegetación riparia en la Cuenca Río Bravo/Grande	51
Figura 3-6. Uso de suelo y Vegetación en la Cuenca Río Bravo/Grande.	52
Figura 3-7. Geomorfología en el Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.	54
Figura 3-8. Precipitación en el Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO. ...	55
Figura 3-9. Clima en el Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.	56
Figura 3-10. Flora del Río Bravo/Grande.	57
Figura 3-11. Fauna de la cuenca del Río Bravo/ Grande.	58
Figura 3-12. Peces en la cuenca del Río Bravo/Grande.	59
Figura 3-13. Actividad económica del Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de INEGI.	60

<b>Figura 3-14. Población de la cuenca Río Bravo/Grande. Elaboración propia datos de CONABIO.</b>	<b>61</b>
.....	
<b>Figura 3-15. Estaciones hidrométricas dentro de la cuenca Río Bravo/Grande. Elaboración propia datos de CONABIO.</b>	<b>62</b>
.....	
<b>Figura 3-16. Presas internacionales Amistad y Falcón. Elaboración propia, datos de CONABIO.</b>	<b>64</b>
.....	
<b>Figura 4-1. Volúmenes de control analizados. Elaboración propia, datos CONABIO.</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4-2. Afluentes considerados para la determinación del caudal natural del Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de USGS.</b>	<b>70</b>
.....	
<b>Figura 4-3. . Caudal Natural diario Río Bravo/Grande “Río Conchos”. Elaboración propia.</b>	<b>79</b>
.....	
<b>Figura 4-4. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río Pecos. Elaboración propia.</b>	<b>80</b>
.....	
<b>Figura 4-5. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río Devils. Elaboración propia.</b>	<b>81</b>
.....	
<b>Figura 4-6. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río Salado. Elaboración propia.</b>	<b>86</b>
.....	
<b>Figura 4-7. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río San Juan. Elaboración propia.</b>	<b>87</b>
.....	
<b>Figura 4-8. . Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Arriba Río Conchos (Ojinaga Presidio)”. Elaboración propia.</b>	<b>89</b>
.....	
<b>Figura 4-9. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo Río Conchos. Elaboración propia.</b>	<b>90</b>
.....	
<b>Figura 4-10. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo del Río Langtry. Elaboración propia.</b>	<b>91</b>
.....	
<b>Figura 4-11. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo del Río Devils. Elaboración propia.</b>	<b>93</b>
.....	
<b>Figura 4-12. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Eagle Pass. Elaboración propia.</b>	<b>94</b>
.....	
<b>Figura 4-13. Curva de Calibración Gasto-Altura en Laredo. Elaboración propia.</b>	<b>96</b>
.....	
<b>Figura 4-14. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Laredo. Elaboración propia.</b>	<b>96</b>
.....	



Figura 4-15. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Roma. Elaboración propia. ....	98
Figura 4-16. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Río Salado. Elaboración propia. ....	99
Figura 4-17. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Roma. Elaboración propia. .....	99
Figura 4-18. Área de riego para Brownsville .....	104
Figura 4-19. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Brownsville. Elaboración propia. ....	105
Figura 4-20. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Río San Juan. Elaboración propia. ....	106
Figura 4-21. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Brownsville. Elaboración propia. ....	106
Figura 5-1. Comparación de caudales naturales entre el estimado por Orive (1945) y el estimado en esta tesis. Elaboración propia. ....	109
Figura 6-1. Comparación de caudal natural diario contra mensual del RGB Aguas Arriba del Río Conchos .....	113
Figura 6-2. Comparación de caudal natural diario contra mensual en Río Conchos.....	114
Figura 6-3. Comparación de caudal natural diario contra mensual del RBG Aguas Abajo del Río Conchos .....	115
Figura 6-4. Comparación de caudal natural diario contra mensual del RBG Aguas Abajo de Brownsville .....	115



# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

Los ríos son una fuente natural de vida, ayudan a mantener un equilibrio en su hábitat, y son capaces de realizar diversas funciones tales como purificar el agua, moderar inundaciones y sequías, proveen alimentos, espacios de reproducción, nutrientes, entre otras funciones y lo más importante son la fuente principal para satisfacer las necesidades humanas. En la actualidad es notable los cambios que han sufrido los ríos debido a las construcciones antropogénicas, modificando el régimen del caudal natural, ocasionando impactos ambientales en sus ecosistemas acuáticos y ribereños, debido a que la humanidad se ha enfocado únicamente en sus necesidades y en el desarrollo de una sociedad, dejando de lado las demandas de agua que requiere el medio ambiente, ocasionando que el recurso hídrico no mantenga un equilibrio.

La presencia de presas a lo largo de los ríos genera cambios de almacenamiento; así mismo, las derivaciones agrícolas alteran el caudal natural reduciéndolo debido al riego. Cuando el caudal se somete a estos cambios se denomina caudal regulado y es distinto (en volumen y tiempo), al caudal natural, debido a las pérdidas de agua que ha experimentado.

El Río Bravo/Grande (RBG) es un río importante para México y es considerado de la misma forma globalmente por su biodiversidad de agua dulce. En el Río Bravo/Grande se cuenta con 121 especies de peces, 69 son endémicas. Hay tres áreas de apoyo a especies de aves endémicas, así como un alto nivel de diversidad de moluscos. A si mismo constituye la principal fuente de agua potable para las comunidades tanto de México y Estados Unidos y es considerado como patrimonio cultural y de la historia de la frontera en ambos países.

Cabe mencionar que el RBG se enfrenta a la escasez de agua y su cuenca es una con mayor estrés hídrico en el mundo, así como con un alto potencial de conflicto y crisis, especialmente en condiciones de sequía; ésto debido a las modificaciones que ha sufrido en su caudal natural a través de los años por cambios antropogénicos, tanto en el cauce como en sus afluentes. Cuenta



con dos presas internacionales en su cauce, la presa Amistad y la presa Falcón, además hay actividad significativa de agricultura en los dos lados de la frontera; 95% de la parte Baja RBG, se ha convertido en uso agrícola o urbano desde los años 1920, y quedan pocas comunidades naturales. Debido a estos factores, el RBG es un río con alteración en su régimen de flujo por lo que tiene un caudal regulado.

Esta alteración ha causado que muchas especies se encuentren en peligro de extinción y se vean amenazadas. Así mismo, proyectos de desarrollo acuático han perturbado los regímenes naturales de la corriente, afectado pantanos y su fauna acuática, y degradando comunidades nativas de plantas ribereñas. Una de las preocupaciones más urgentes es la escasez de agua per cápita. Décadas atrás constituyó un muy importante proveedor de agua para uso doméstico, agrícola y comercial en las ciudades y pueblos por donde corre el RBG, pero en el siglo XX la calidad de las aguas se degradó tanto debido a la irrigación agrícola, que en la actualidad el río es considerado uno de los sistemas fluviales más amenazados de Norteamérica ((WWF), 2007). Además, la población a ambos lados de la frontera continúa creciendo, y se ha presentado sequías a largo plazo, también la salinidad del río está en aumento por lo que en 2007, se construyó la planta de desalinización Kay Bailey Hutchison, de lo que resulto de varios efectos, como el crecimiento de especies que invaden el hábitat de las especies nativas y acaparan sus nutrientes (lo que suele ser causado por las plantas invasoras), la contaminación y la pérdida de agua. (Geoenciclopedia, 2016).



## Planteamiento del problema

Actualmente existe un alto nivel de extracción de agua en la cuenca RBG para la agricultura y aunado del crecimiento poblacional que va en aumento, ocasiona que se requiera una demanda mayor de agua. El cauce principal de la cuenca, el RBG y sus afluentes son los encargados de satisfacer estas demandas de agua, por lo que se ha visto afectado drásticamente su caudal cambiando la cantidad, calidad y periodicidad del flujo provocando cambios e impactos ambientales en la cuenca.

Como resultado de los bajos niveles de agua, la concentración de contaminantes ha aumentado provocando la muerte de peces, y la parte Baja del RGB sufre de salinización. Así mismo se ha visto invadido el caudal como su entorno, con especies no nativas de la zona que a su vez van desplazando especies nativas; con respecto a la temperatura se ha detectado un aumento considerable. Por lo que es indispensable estimar el caudal natural diario para entender el comportamiento natural y su valor con el medio ambiente.

Este cálculo es útil porque permitirá en el futuro comparar el régimen natural con los escurrimientos actuales. Esta comparación resulta oportuna para demostrar la sobreexplotación del agua en el RGB y la degradación del medio ambiente que ha sufrido. Cabe mencionar que el análisis se realizó en el periodo de 1901-1913, debido a que el RGB no se veía afectado con tanta infraestructura antropogénica entre ellas las presas internacionales Amistad y Falcon.



## Justificación

En la cuenca RGB existe una fuerte degradación ambiental, muestra de ellos es la proliferación de especies invasoras, la degradación de la calidad del agua (cambio de temperatura, la disminución del oxígeno disuelto), la canalización del cauce y mala distribución del sedimento.

Debido a ésto es importante estimar el caudal natural ya que permitirá entender el régimen de flujo, con el cual el medio ambiente nativo se adapta y evoluciona.

## Hipótesis

Es posible determinar el caudal natural del RGB mediante la ecuación de continuidad, utilizando datos históricos de escurrimiento diario, uso del agua y datos climatológicos (temperatura y precipitación).



## Objetivos

### *Objetivo General*

---

El objetivo general de esta investigación, es determinar el caudal natural en el periodo de 1901- 1913 de la cuenca RBG desde la confluencia del Río Conchos con el RBG en Ojinaga/Presidio, hasta la desembocadura en el Golfo de México.

### *Objetivo Específico*

---

1. Cuantificar el caudal natural removiendo la alteración antropogénica (derivaciones y cambios de almacenamientos).
2. Comparar los hidrogramas estimados con registros históricos.
3. Describir las funciones ecológicas provistas por el caudal natural del RBG.



# CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

## 1.1 Los ríos y su importancia en el ecosistema

Los ríos constituyen una importante reserva de agua potable para el consumo humano, así como un hábitat para diferentes especies proveyéndoles alimentos, espacios de reproducción, nutrientes, entre otras cosas, en general los ríos constituyen un entorno que sufre cambios estacionales, lo cual es bueno para las especies ya que les ayuda durante su ciclo de vida. En muchas ocasiones se ha dicho que los ríos representan los vasos sanguíneos del planeta; debido a que la mayor parte del mundo es agua, así mismo han logrado integrar al mundo entero en una unidad.

Los ríos pueden verter sus aguas ya sea en el Pacífico, Atlántico (Golfo de México y Mar de Caribe) y en el interior (estos son ríos que no vierten sus aguas al mar ni de forma directa e indirecta), y desarrollan funciones naturales que dan bienestar a los ecosistemas, por lo cual se vuelven en objetivos de protección dado que el mal uso o contaminación del caudal de cada uno de los ríos, puede ocasionar la destrucción de ecosistemas completos.

Un río en su estado natural es capaz de realizar diversas funciones tales como purificar el agua, moderar inundaciones y sequías y mantener el hábitat de peces, aves y fauna silvestre. Una función que desarrolla el río de forma natural, es llevar consigo sedimentos los cuales van liberando nutrientes para los peces de la costa y al llegar el caudal del río a algún estuario mantienen el balance de salinidad que sustenta la producción del estuario.

Así mismo desde aguas arriba hasta aguas abajo del Río, el ecosistema fluvial recopila y almacena el agua del derretimiento de la nieve y el agua de lluvia en sincronía con los ciclos de la naturaleza haciendo que la diversidad y abundancia del hábitat prevalezcan. Ríos, humedales, y otros ecosistemas de agua dulce constituyen parte de la infraestructura que mantienen la economía, (Postel & Richter, 2003).



En otras palabras, es importante que prevalezcan los ríos ya que forman parte del ecosistema y en conjunto con animales y plantas de los humedales, realizan funciones benéficas para varios hábitats, ayudando a absorber contaminantes y residuos en descomposición y limpiando el agua. Así mismo, se forman periodos de inundación en el río y redistribuyen sedimentos, creando hábitats esenciales para peces y otras vidas fluviales. En la Tabla 1-1 se observan algunas funciones que desempeñan los ríos en pro a su entorno.

**Tabla 1-1. Servicios ecosistémicos de soporte vital proporcionados por los ríos, los humedales y otros ecosistemas de agua dulce, (Postel & Richter, 2003).**

<i>servicios ecosistémicos</i>	<i>Beneficios</i>
<i>Prestación de servicios de abastecimiento de agua</i>	<i>Más de 99% del abastecimiento de agua para irrigación, uso industrial y doméstico en todo el mundo provienen de los sistemas naturales de agua dulce.</i>
<i>Suministro de alimentos</i>	<i>Los peces, aves acuáticas, mejillones, almejas, entre otros, son importantes fuentes alimenticias para las personas y la vida silvestre.</i>
<i>Purificación del agua/tratamiento de residuos</i>	<i>Los humedales filtran y desintegran los contaminantes y así protegen la calidad del agua.</i>
<i>Reducción de inundaciones</i>	<i>Las cuencas hidrográficas y las planicies de inundación saludables absorben el agua de lluvia y los caudales de los ríos, reduciendo los daños por inundaciones.</i>
<i>Mitigación de la sequía</i>	<i>Las cuencas hidrográficas, las planicies de inundación y los humedales saludables absorben el agua de lluvia, merman los escurrimientos y ayudan a la recarga de aguas subterráneas.</i>
<i>Suministro de hábitat</i>	<i>Ríos, arroyos, planicies de inundación y humedales proveen hogares y sitios para la crianza a peces, pájaros, fauna y muchas otras especies.</i>
<i>Mantenimiento de la salinidad de las zonas costeras</i>	<i>Los caudales de agua dulce mantienen los gradientes de salinidad de los deltas y de los ambientes marinos y costeros, que son clave para su riqueza biológica y productividad.</i>
<i>Disponibilidad de la belleza y de valores satisfactorios para la vida</i>	<i>Los ríos naturales y los paisajes de sus aguas son fuentes de inspiración y de valores culturales y espirituales profundos; su belleza enriquece la calidad de la vida humana.</i>
<i>Oportunidades recreativas</i>	<i>Natación, pesca, caza, paseos en bote, observación de la fauna, excursiones marítimas y días de campo.</i>
<i>Conservación de la biodiversidad</i>	<i>Diversas asociaciones de especies realizan el trabajo de la naturaleza (incluidos todos los mencionados en esta tabla), sobre el cual dependen las sociedades; conservar la diversidad genética mantiene opciones para el futuro.</i>

Si el hombre quisiera reemplazar todas las funciones que realiza un río sería agotador económicamente, ya que tendría que construir una variedad de infraestructuras que sean





capaces de adaptarse a las funciones que realiza un río de forma natural, lo cual para ser sinceros nunca podría compararse.

Sin embargo, la sociedad y la tecnología ya han llegado a sustituir algunos de estos bienes y servicios ecosistemáticos; como son el reproducir fauna acuática (peces, camarones, langostas, etc.), implementando la acuicultura, o bien la desalinización de agua de mar cuando escasea el agua potable, pero debe tenerse en cuenta que estas situaciones no son perfectas y pueden realizarse hasta un cierto punto, y aún más importante es que muchos científicos e ingenieros no tienen idea de cómo recrear muchos de los procesos más complejos que realiza el ecosistema natural, que son sistemas de soporte de vida irremplazables, (Postel & Richter, 2003); por esta razón es que se debe conservar un río saludable durante todo su ciclo, ya que las etapas por las que pasa el río fueron diseñadas estratégicamente por la naturaleza para la subsistencia de los ecosistemas que lo habitan, ya sean inundaciones, sequía, avenidas máximas, transporte de sólidos (disueltos o suspendidos), entre otras etapas, son parte de mantener un ecosistema funcional.

## 1.2 Régimen del caudal natural en los ríos

¿Qué es lo que ha pasado con el caudal natural de los ríos?, pues debe decirse que desde que el río se volvió una parte fundamental del progreso económico y social, se ha visto afectado por la infraestructura hidráulica como son presas, depósitos para riego, presas hidroeléctricas, así como también se le han implementado estrategias para el control de inundaciones, y el suministro del agua con el fin de cubrir y satisfacer las necesidades humanas como es la demanda de agua, la electricidad y la protección contra inundaciones.

Sin embargo, se debe tener presente que cuando el hombre hace modificaciones en el caudal natural de un río, siempre se ven afectadas las características propias de éste, e inclusive se pueden llegar a perder en su totalidad provocando a su vez la pérdida de su hábitat.

Además, que los ríos representan una fuente de agua fresca completamente removible en un tiempo relativamente corto, no obstante, con toda la infraestructura que se ha construido esta



fuerza no se logra restablecer en su totalidad; esto quiere decir que el caudal que transportan los ríos deja de ser natural ya que se ve alterado su volumen por las actividades antropogénicas.

Conforme pasan los años, las necesidades y los valores de la sociedad han cambiado, ocasionando nuevas alteraciones en el caudal natural de los ríos e inclusive, se ha modificado el caudal más de una vez, colocando más infraestructura hidráulica en el mismo cauce o cuenca; así mismo, científicos han comenzado a descubrir la gravedad del daño ecológico que ha provocado la gran escala de alteraciones en ríos con la finalidad de adaptarse a los propósitos y necesidades humanas.

Gran parte de los ríos en el mundo sin importar su tamaño, en la actualidad se han visto afectados por estas alteraciones. El flujo de los ríos se ve afectado en una gran escala por el desvío del caudal o desarrollo de infraestructura provocando cambios de almacenamiento. Se considera que alrededor del 60% de los 227 ríos más grandes del mundo, han sido fragmentados por represas, desvíos u otras infraestructuras. Lo que nos deja ver que la gran mayoría de los ríos se encuentran controlados por el hombre, por lo que se ocasiona una modificación en el régimen de flujo natural en los ríos, (Postel & Richter, 2003).

Pese a esto, las sociedades han cosechado beneficios económicos sustanciales a partir de las modificaciones en el caudal natural, como son la agricultura de riego para el crecimiento del comercio y la energía hidroeléctrica, lo cual ha ocasionado serias pérdidas del lado ecológico.

### 1.3 Riesgos del ecosistema fluvial

El ecosistema fluvial está formado por componentes abióticos y bióticos y por la comunidad de especies que son capaces de adaptarse a las características ambientales, estos ecosistemas se consideran extremadamente complejos.

Como se ha mencionado anteriormente las modificaciones del caudal han hecho que éste se modifique y ha puesto en riesgo la estabilidad del ecosistema fluvial.



El río naturalmente pasa por ciertas temporadas ya que tiene temporada de caudales máximos, inundaciones y caudal base; cada una de ellas tiene un propósito y una función benéfica para las especies, dando un servicio ecosistemático.

Hoy por hoy, una gran porción significativa de especies de ríos en todo el mundo, están en riesgo de extinción o alrededor de extinguirse, porque las aguas contaminadas no consiguen limpiarse mediante la llanura de inundación y humedales; así mismo, más contaminantes se están alcanzando en el interior de aguas superficiales y mares costeros, causando daños como la baja de oxígeno (zona muerta), en el Golfo de México, poniendo en amenaza la vida de peces y de otras vidas ribereñas. En la Tabla 1-2 se muestran las actividades que tienen un impacto sobre los ecosistemas y los servicios o beneficios en riesgo, (Postel & Richter, 2003).

**Tabla 1-2 Amenazas a los servicios ecosistemáticos del río debido a actividades humanas, (Richter, 2003).**

<i>Actividades humanas</i>	<i>Impacto sobre los ecosistemas</i>	<i>Beneficios/ servicios en riesgo</i>
<b>Construcción de presas</b>	<i>Altera los tiempos y la cantidad de escurrimiento de los ríos, la temperatura del agua, la transportación de nutrientes y sedimentos, el reabastecimiento de los deltas; impide las migraciones de peces</i>	<i>Provisión de hábitat para las especies originarias, pesquerías comerciales y recreativas, sostenimiento de los deltas y su economía, productividad de las pesquerías de estuarios</i>
<b>Construcción de diques y riberos</b>	<i>Destruye la conectividad hidrológica que existe entre el hábitat de los ríos y el de las planicies de inundación</i>	<i>Hábitat, pesquerías deportivas y comerciales, recreación, fertilidad natural de las planicies de inundación, control natural de inundaciones</i>
<b>Desviaciones fluviales excesivas</b>	<i>Reduce los caudales a niveles perniciosos</i>	<i>Hábitat, pesquerías deportivas y comerciales, recreación, disolución de la contaminación, generación hidroeléctrica, transporte</i>
<b>Drenado de humedales</b>	<i>Elimina componentes vitales del ambiente acuático</i>	<i>Control natural de inundaciones, hábitat para peces y aves acuáticas, recreación, purificación natural del agua</i>
<b>Deforestación/ mala utilización de las tierras</b>	<i>Altera los patrones de escurrimiento, inhibe las recargas naturales, llena de cieno los cuerpos de agua</i>	<i>Cantidad y calidad en el abastecimiento de agua, hábitat para peces y fauna y flora, transporte, control de inundaciones</i>
<b>Contaminación incontrolada</b>	<i>Disminuye la calidad del agua</i>	<i>Abastecimiento de agua, hábitat, pesquerías comerciales, recreación</i>



<i>Sobreexplotación</i>	<i>Merma las poblaciones de especies</i>	<i>Pesquerías deportivas y comerciales, aves acuáticas, otras poblaciones bióticas</i>
<i>Introducción de especies exóticas</i>	<i>Elimina las especies originarias, altera los ciclos de producción y de nutrientes</i>	<i>Pesquerías deportivas y comerciales, aves acuáticas, calidad del agua, hábitat para peces, fauna y flora, transporte</i>
<i>Diseminación de metales y contaminantes que forman ácidos en el aire y el agua</i>	<i>Altera la química de los ríos y los lagos</i>	<i>Hábitat, pesquerías, recreación, salud humana</i>
<i>Emisiones de contaminantes de aire que alteran el clima</i>	<i>Posibilita cambios dramáticos en los patrones de escurrimiento por el incremento de la temperatura y cambios en las precipitaciones</i>	<i>Abastecimiento de agua, generación hidroeléctrica, transporte, hábitat para peces, fauna y flora, disolución de la contaminación, recreación, pesquerías, control de inundaciones</i>
<i>Crecimiento de la población y del consumo</i>	<i>Incrementa la presión para represar y desviar más agua, para drenar más humedales, etcétera; incrementa la contaminación del aire, la lluvia ácida y potencia el cambio climático</i>	<i>Incrementa la presión para represar y desviar más agua, para drenar más humedales, etcétera; incrementa la contaminación del aire, la lluvia ácida y potencia el cambio climático</i>

Con estas actividades se han cubierto las necesidades humanas; lo cual no, nos ha permitido dejar ver las consecuencias que con llevan dentro del cauce. También es interesante saber que los tiempos y el volumen de los cauces de agua dulce hacia el ambiente costero, son factores clave que influyen en la productividad de los estuarios y deltas. Y que los servicios ecosistemáticos naturales que realiza el río, son el mantenimiento de los gradientes de salinidad y la entrega de nutrientes, sedimentos y organismos hacia el ambiente costero. En los últimos años en varias partes del mundo estos deltas han tenido cierta reducción del flujo de agua dulce lo que ha provocado que un frente salino circule a lo largo del delta y éste es una problemática que amenaza valiosos ecosistemas de manglar. Así mismo, estudios realizados en Estados Unidos han documentado los vínculos que existen entre las grandes reducciones de los escurrimientos de agua dulce y la disminución de reservas pesqueras importantes; por ejemplo, la relación de los escurrimientos de los Everglades hacia la Bahía de la Florida y la producción de camarón rosado en las zonas adyacentes del Golfo de México, (Postel & Richter, 2003).



## 1.4 Equilibrio entre necesidades humanas y los ecosistemas fluviales

Para llegar a tener un equilibrio entre las necesidades humanas y los ecosistemas fluviales con respecto al agua, significaría que la sociedad debe anteponer las necesidades del ecosistema fluvial antes de cualquier otra cosa.

Si no hacemos esto, estamos condenando nuestro futuro y el de nuestras generaciones futuras; en la actualidad nos estamos enfrentando a una realidad cruda que nosotros mismos hemos generado por la falta de conciencia en nuestras decisiones, y la falta de planeación ecológica.

Hablar de un equilibrio entre ecosistema-sociedad, es hablar de una visión conceptual en la cual varios investigadores se están concentrando y a su vez están adquiriendo un reto bastante grande al querer equilibrar el uso del agua del río, con respecto a las necesidades humanas y las ecosistemáticas; con ello se ha reconocido el importante valor que tienen los ríos y las planicies de inundación y han adquirido un mayor reconocimiento dentro de la sociedad, y se han tomado iniciativas con respecto la gravedad de su pérdida a través del tiempo.

Estudios han revelado que la infraestructura en los ríos va en aumento y está impactando al mundo acuático hasta el grado de tener la extinción de especies de agua dulce; las funciones del ecosistema que sustentan toda forma de vida, incluida la provisión que benefician la economía humana, va en descenso no obstante la población humana va en ascenso, así como el consumo de agua, llevando a niveles exorbitantes la demanda de agua, alimento, energía y bienes materiales, (Postel & Richter, 2003).

Debido a las problemáticas y grandes pérdidas que ocurrían al modificar el caudal natural del río en las últimas dos décadas, gracias al estudio de la ecología fluvial se ha visto a mayor rasgo el costo ambiental que han cobrado las decisiones tecnológicas, a lo cual varios gobiernos y dependencias han realizado ligeras modificaciones a los reglamentos para el desarrollo



hidrológico; uno de ellos es exigir un estudio detallado del impacto ambiental que sufrirá el ecosistema al construir una presas y otros grandes proyectos hidráulicos; este estudio se solicita antes de la construcción de la infraestructura, para determinar si no impacta en los servicios ecosistemáticos durante y después de su construcción, (Postel & Richter, 2003).

Sin embargo, estas modificaciones son pocas para la gravedad del problema que se enfrenta en estos momentos, ya que la demanda humana sobre los ecosistemas hidrológicos aumenta, ocasionando que el caudal del río sea insuficiente para su sustentabilidad.

Para conservar estos beneficios la sociedad debe, en consecuencia, adoptar lo que han llamado asignación de soporte del ecosistema o bien, asignación de eco soporté; es decir, una asignación del agua del río en cantidad, calidad y periodicidad adecuadas para salvaguardar la salud y funcionalidad de los sistemas fluviales. Esta asignación de eco soporté implica un límite para el grado en que la sociedad puede, con inteligencia, alterar los caudales naturales de los ríos, al cual han denominado límite de sustentabilidad: en lugar de que los ecosistemas de agua dulce reciban las cantidades de agua que quedan luego de satisfacer la demanda humana (una porción residual cada vez menor de dicho pastel), deberán recibir el agua necesaria para permanecer saludables, (Postel & Richter, 2003).

### *1.4.1 Caudal ecológico*

---

#### ***1.4.1.1 ¿Qué es el caudal ecológico?***

Una reciente definición del caudal ecológico, también hace una relación explícita entre la salud de los ríos y los ecosistemas de estuarios, así como los medios de vida y bienestar de personas y sociedades que dependen de ellos. Esto refiere que los caudales ecológicos describen la cantidad, tiempo y calidad del flujo de agua requerida para sostener la vida en agua dulce y estuarios, así como, los medios de vida del ser humano y el bienestar que dependen sobre estos ecosistemas, (Arthington, 2012).



## *Reseña histórica*

Tennant fue uno de los científicos pioneros que intento determinar el caudal ecológico, al cual nombró como la cantidad de agua que necesitaba un río. Esto lo hizo recogiendo información biológica e hidrológica de ríos, comparando las propiedades biológicas con el estado hidrológico; con la información obtenida se dedicó a realizar lineamientos para la protección de caudales, a lo cual se nombró Método de Tennant.

Hasta la década de los 70 un equipo de especialistas en política del agua y diseñadores de modelos computarizados que trabajaban en el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos, desarrollaron un nuevo enfoque para la medición del caudal ecológico al cual llamaron Instream Flow Incremental Methodology, (IFIM); IFIM incluía un conjunto de métodos analíticos y programas computarizados por lo que su uso, se volvió popular entre ictiólogos y con el tiempo llego a sobresalir hasta el grado de dominar el campo de análisis de caudales ecológicos en todo el mundo, como por ejemplo, el modelo computarizado Physical Hábitat Simulation model (PHABSIM); éste fue diseñado para cuantificar el hábitat que disponían ciertas especies de interés, en distintos niveles de caudal, por lo general la especie de interés eran peces, PHABSIM utiliza diversas variables algunas tomadas en campo, para dar las preferencias de hábitat de las diversas especies, pero cabe decir que casi todas las aplicaciones de PHABSIM, han descrito el hábitat con base a dos variables que son profundidad y velocidad del agua, (Postel & Richter, 2003).

Pocos de los métodos existentes dan la debida importancia a las interacciones entre los escurrimientos y calidad de agua, desplazamiento de sedimentos, los niveles freáticos, así como considerar las inundaciones, caudales máximos extremos u otros fenomenos hidrológicos importantes y su influencia ecológica en la salud del conjunto de un ecosistema, por lo que en el año de 1990, ocho sudafricanos y australianos desarrollaron un método llamado de enfoque holístico para la protección de caudales, el cual respondía a la totalidad del ecosistema y utilizaba como parámetro el régimen natural del caudal; ese mismo año el enfoque holístico y varias versiones similares evolucionaron muy rápido.



En 1993 Jackie King y Rebecca Tharme de la Universidad de Ciudad del Cabo debatieron la forma de aplicar el enfoque holístico, y solicitaron a científicos sudafricanos que dibujaran un hidrógrama que representara las fluctuaciones naturales del nivel de agua a lo largo de un año; posteriormente les solicitaron que dibujaran un hidrógrama que representara solo la mitad del agua contenida en condiciones naturales, pero adecuado de una manera que se mantuviera la salud del río intacta; al finalizar los hidrógramas detectaron grandes consistencias y concordancias en sus perspectivas individuales y en base a esto, decidieron redactar ocho principios generales para la gestión de caudales en el año de 1998, (Postel & Richter, 2003).

- Todo régimen de caudal modificado debe reproducir al natural, de manera que se mantenga la ocurrencia natural de los distintos tipos de flujo
- Las condiciones naturales perenes y no perenes del río deben de conservarse
- La mayor parte del agua debe obtenerse del río durante los meses de lluvia y se tomará poca agua durante los meses de secas
- Durante la temporada de lluvias, debe mantenerse el patrón estacional de las crecidas más altas
- Las inundaciones deben estar presentes durante la estación natural de lluvias
- La duración de las inundaciones podría acortarse, pero dentro de ciertos límites
- Es preferible retener ciertas inundaciones en su magnitud máxima y eliminar otras por completo, que mantener todas o casi todas en niveles reducidos
- La primera inundación o una de las primeras de la temporada de lluvias debe conservarse en su totalidad

King y Delana Louw posteriormente desarrollaron un nuevo enfoque que respondía cuanta cantidad de agua necesita un ecosistema fluvial saludable, al que llamaron Building Block Methodology (BMM), que es una metodología de bloques de construcción.

El método BMM pertenece a los métodos holísticos debido a que toman en consideración la totalidad del ecosistema fluvial y no solo el de una especie en particular y todos estos métodos holísticos tienen en común, la intención de definir caudales necesarios para proteger o restaurar





las características biológicas, de hábitat físico y calidad de agua del ecosistema, dando también cabida al uso humano del líquido. Un elemento fundamental de las metodologías holísticas, es el uso del régimen natural del caudal como parámetro o referencia. Ahora bien, cuando no se dispone de información del caudal de un río, los hidrólogos utilizan modelos computarizados de simulación hidrológica para generar aproximaciones de las condiciones del flujo natural. Los científicos especializados en ríos usan estos datos para construir hidrógramas que les ayuden a reconocer patrones repetitivos en el caudal del río. La variedad de hidrógramas varía de acuerdo a la región y de un río a otro, aunque existen parámetros generales en cada uno o en su mayoría como son: escurrimientos basales, crecidas que ocurren con regularidad y grandes inundaciones o escurrimientos extremadamente bajos que no se presentan todos los años. Los ecólogos han descubierto que estos parámetros hidrológicos repetitivos ya sea intraanuales o interanuales, tienen una importancia significativa en los ecosistemas ribereños, (Arthington, 2012).

Posteriormente, Arthington no quedó conforme con el porcentaje que dejaban en ríos, ya que era menor al 50 % del caudal natural, por lo cual generó una nueva interrogatoria en la cual cuestiona cuando debía considerarse excesiva la alteración de los regímenes del caudal natural, por lo que comenzó a desarrollar un nuevo enfoque llamado Benchmarkin Methodology (BM), una metodología que consiste en identificar el nivel de alteración del caudal en el cual comenzarían a detectar importantes cambios ecológicos.

El enfoque Downstream Response to Imposed Flow Transformation (DRIFT) describe varios niveles de salud ecológica o límites de sustentabilidad; éstos se desglosan desde la clase A hasta la clase D; la clase A exige que el régimen de caudal natural se conserve perfectamente intacto, clases posteriores reflejan un deterioro cada vez mayor de la salud del río conforme las presas o derivaciones modifican los caudales. Con base a este método se puede predecir la clase de salud ribereña que se debe esperar bajo diversas condiciones de gestión de agua; es decir, podría predecir cuáles serían las condiciones del río al pasar de una clase a otra. En la actualidad ya se han implementado programas de restauración de caudales en varias cuencas en Estados Unidos, el cual consiste en hacer consientes a la sociedad y científicos donde se ponen una meta y realizan



todo por cumplirla, modificando ciertos parámetros como por ejemplo la cantidad de consumo diario de agua entre otras, (Arthington, 2012).

### ***1.4.1.2 Conceptos de caudal ecológico.***

En la actualidad existe una gran variedad de términos para el caudal ecológico. De acuerdo a Tennant (1976), es el caudal mínimo dentro de un cauce el cual se utiliza como base para autorizar obras hidráulicas o extracciones de caudal de los ríos. Sin embargo, en la actualidad se ha identificado que el caudal tiene suma importancia en los ecosistemas, por lo que también se le conoce al caudal ecológico como caudal ambiental, el cual Richter (2006), lo define como el agua que se libera y se requiere en un sistema fluvial o se deja correr con el propósito de mantener la condición natural y funcional del ecosistema.

De acuerdo a (Brisbane, 2007) los caudales ambientales, incluyen la cantidad, periodicidad y calidad del agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarios y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas.

La normatividad mexicana define el caudal ecológico, como la calidad, cantidad y régimen del flujo para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales.

Para la estimación del caudal ecológico Tharme (2003) define que existen aproximadamente más de 200 métodos de los cuales no se ha podido determinar un método como exacto para la obtención del caudal ecológico. Por lo que Tharme clasifica los más de 200 métodos encontrados en alrededor de 44 países, como se muestra en la Figura 1-1 conforme a los métodos encontrados.

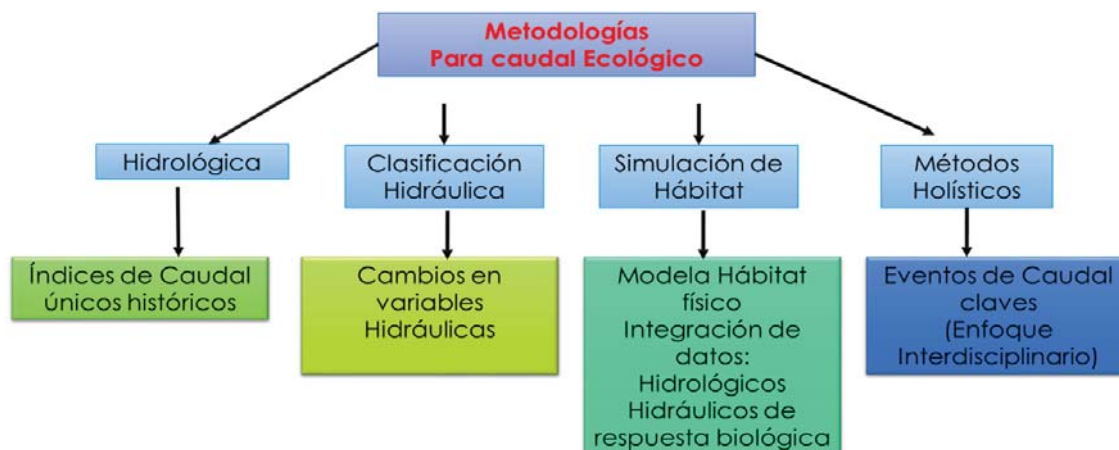


Figura 1-1 Clasificación de las Metodologías para caudales ambientales (Tharme & R.E, 2003)

Sin embargo, a pesar de esta variedad y cantidad de métodos, no se ha logrado establecer un método como el más eficiente para conocer los caudales ecológicos.

### 1.4.1.3 Clasificación de los métodos

Tharme (2003), clasifica en 4 categorías los métodos de caudal ecológico; sin embargo, (Dyson M.J, et al., 2003), dan términos alternativos para las categorías reconocidas por Tharme (2003), ver Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Categorías de métodos de caudal ecológico, (Tharme 2003; Dyson et al. 2003).

Tharme 2003	Dyson et al. 2003
Hidrológico	Tablas de búsqueda
Hidráulico	Análisis en gabinete
Simulación de hábitat	Análisis en gabinete
Holístico	Análisis de funcionalidad

Los métodos hidrológicos y simulación de hábitat son considerados de los más simples, son los más utilizados abarcando alrededor del 70% de todas las metodologías disponibles; en la actualidad solo existen tres manuales donde establecen los detalles de cada método y son: la metodología incremental de caudales (IFIM), la plataforma de modelado hábitat físico (PHABSIM), la metodología de construcción de bloques.



#### ***1.4.1.4 Evaluación de contextos de caudal ecológico (Environmental Flows “EFs”)***

La evaluación de caudal ecológico toma lugar en muchos diferentes contextos de administración a varias escalas espaciales, dentro de los diferentes sistemas biofísicos y en contraste de contextos socioeconómicos y escenarios políticos, los cuales soportan métodos más adecuados para lograr los resultados ecológicos adecuados.

De acuerdo a las revisiones hechas de los métodos, no existe un método definido para determinar el régimen de caudal ambiental; sin embargo, es posible configurar algunos parámetros para selección de un método que se adecue al cauce que se desea estudiar, (Arthington, 2012).

Dentro de los ríos existe un término llamado flujo no regulado, con el cual los ecologistas se refieren a un sistema con cercanía a un régimen de flujo natural y el término flujo regulado es dado cuando hay cualquier tipo de cambio a un régimen de flujo independiente de su causa. Dentro de los sistemas de ríos regulados, se ven los cambios del flujo y los patrones estacionales alterados, debido mayormente a las intervenciones estructurales entre cuencas y transferencias como los trasvases, grandes presas, canales de derivación y la infraestructura de la gestión del agua. El flujo de estos sistemas de ríos regulados puede ser administrado en cantidad, periodicidad de los flujos, la frecuencia, la duración y la forma del hidrógrama y también reduce los problemas de calidad del agua, ya que se puede extraer de cierta profundidad en embalses estratificados agua, ayudando a la desoxigenación o diferencial de temperatura en el río aguas abajo.

En los sistemas regulados sin una infraestructura de gestión del agua, el régimen del flujo es modificado mediante diversas maneras desde su estado natural, ya sea por los cambios en el uso del suelo, presas agrícolas, sistemas de diques, derivaciones de agua de menor importancia, la captación de agua de pulsos de flujo de canal y flujos de llanuras de inundación, modificaciones de humedales (relleno, drenaje, desvío), y el bombeo de agua subterránea. Los efectos de este tipo de alteraciones del régimen de flujo pueden ser mitigados para la eliminación de los bancos



de diques o mediante el establecimiento de procesos de recarga de aguas subterráneas, etc; todo lo antes mencionado puede ayudar a restablecer algunas de las características del régimen de flujo original, para el beneficio ecológico de los ríos, los sistemas de aguas subterráneas o llanuras de inundación.

La evaluación del caudal ecológico varía demasiado, ya sea para un proyecto de restauración del caudal de un río, hasta la planificación global sobre los recursos hídricos de una cuenca; así mismo, otro factor importante para determinar el caudal ecológico es el tamaño de la cuenca del río, su variabilidad geomorfológica y las características del régimen de flujo que pueden variar de intermitente a perennes y los patrones de variabilidad temporal, esto ayuda demasiado a definir un caudal ecológico y conocer las diferencias en el tipo de régimen del flujo del río dentro de una cuenca, o a través del gran área de estudio y como su régimen ha sido modificado por la infraestructura hidráulica existente o debido al uso del suelo o la forma en que cada una podría ser modificada, si se planifican nuevos desarrollos de recursos hídricos, (Poff et al, 1997; Arthington et al, 2006; Richter et al, 2006).

Aproximadamente hace 50 años se inició la evaluación del caudal ecológico, partiendo de los sistemas de agua dulce y recientemente se empezó a considerar la influencia del caudal de los ríos en los sistemas estuarios, humedales costeros, lagunas costeras y aguas costeras. También se ha visto un incremento en atender las necesidades de agua de los ecosistemas subterráneos asociados a los ríos y sus llanuras de inundación.

### ***1.4.1.5 Métodos de caudal ecológico***

#### ***Filosofía de los métodos***

En los últimos años, se viene reconociendo que respetar el valor de los ecosistemas implica dejar suficiente agua en las corrientes hídricas y la extracción sea la necesaria para satisfacer las necesidades humanas básicas. El inconveniente radica en establecer cuál es el caudal necesario en determinado cuerpo de agua, para conservar las actividades propias de los ecosistemas y para



que el hombre pueda beneficiarse del agua, sin afectar los ecosistemas acuáticos y procesos propios del río.

En el último siglo, el régimen hidrológico de los ecosistemas acuáticos en todo el mundo ha sido modificado, ante la necesidad de suministro de agua para uso agrícola o el desarrollo urbano-industrial, (entre otros). Esta modificación ha llevado a la reducción de los caudales y su variabilidad natural, la inversión de los patrones naturales o el descenso de los niveles de los acuíferos, solo por mencionar algunos, provocando un fuerte impacto ambiental, social y económico sobre los ecosistemas acuáticos asociados. Se estima que más del 60% de los ríos en el mundo, han sido fragmentados por estas alteraciones hidrológicas, lo que ha dado lugar a una degradación generalizada de los ecosistemas acuáticos (Dyson et al., 2003; Postel y Richter, 2003; Ravenga et al., 2000; y Millenium Ecosystem Assessment, 2005, citados en Global Environmental Flows Network-GEFN, 2006).

Hoy en día, el régimen hidrológico en ríos y humedales ha sido identificado como un factor determinante de su estructura y funcionamiento, aspecto clave para que estos sistemas puedan seguir proporcionando una amplia variedad de servicios a la humanidad (Poff et al, 1997; Bunn y Arthington, 2002; Global Water Partnership- GWP- 2003; Millenium Ecosystem Assessment, 2005, citados en GEFN, 2006; y Forslund et a., 2009).

Los retos que enfrenta el mantenimiento del buen estado o la recuperación de los ecosistemas acuáticos en ríos y humedales, ante una sociedad ávida de un desarrollo social y económico, no son sencillos o menores. En este contexto, el caudal ecológico representa un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos, como un proceso que promueve el desarrollo y el manejo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados en una cuenca, con la intención de maximizar el bienestar económico y social de una manera equitativa y sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2000).



### ***1.4.1.6 Orígenes de evaluación de caudales ecológicos***

De acuerdo a Tharme y a su amplia investigación, encontró que históricamente Estados Unidos se encontraba a la vanguardia de la investigación del caudal ecológico, con los primeros métodos que aparecieron en el año de 1940 y se logró un avance rápido durante 1970. Dentro de los primeros estudios la evaluación del caudal ecológico estaba enfocada a mantener económicamente, importantes pesquerías de agua dulce.

### ***1.4.1.7 Métodos estadísticos o hidrológicos***

Se basa en la hidrología y se entrega de forma de recomendaciones hidrológicas a los gestores del agua en una forma cuantitativa. Las diferencias entre los métodos que se localizan en esta división se encuentran en el grado en que las prescripciones hidrológicas se basan en evidencias teóricas y empíricas o experimentales de las relaciones hidroecológicas y análisis de riesgo; según (Tharme 2003), los métodos hidrológicos también se conocen como regla de oro, límite o métodos de ajuste estándar.

A partir de las metodologías hidrológicas, posteriormente se desarrolló una metodología la cual relaciona cantidad y calidad del recurso, como lo es el hábitat y la descarga. Loar et. al, (1986), fueron los primeros en utilizar el término de metodologías de estimación hidráulica, las cuales establecen relación entre ciertas variables hidráulicas, como son el perímetro mojado o profundidad máxima (método de perímetro mojado). El método hidráulico representa el 11% del total de las metodologías conocidas y se aplica en 20 países.

### ***1.4.1.8 Métodos de clasificación hidráulica***

Este método busca definir la relación entre el volumen de flujo o la descarga y la cantidad y tipo de hábitat proporcionada durante el paso del flujo o a lo largo de un canal de flujo. Una vez conocida esta relación, un régimen de flujo modificado se puede definir. El método más usado es el de perímetro mojado. Estos surgieron debido a que los objetivos de caudales ambientales se puedan especificar como el cambio máximo permitido en el intervalo de recurrencia o algún



otro criterio relevante a la influencia del flujo en el sistema hidráulico de transmisión, por lo que un grupo de científicos han desarrollado modelos conceptuales para identificar los objetivos ecológicos, que podrían ser restaurados por los flujos ambientales, como son hábitat de aguas poco profundas para los peces y los microfitos acuáticos, mientras que el HEC-RAS se utiliza para generar los parámetros hidráulicos pertinentes como el contacto en el medio, perímetro, área de lecho poco profunda, cumpliendo con esos objetivos en tramos representativos, (Arthington, 2012).

### ***1.4.1.9 Métodos hidráulicos más simulación de hábitat***

Conocida también como método de modelación de hábitat, estos métodos representan el 28% del total de las metodologías conocidas y se emplean en 58 países, el método más común que se emplea es el llamado “Instream Flow Incremental Methodology” (IFIM); este método se basa gran parte de sus resultado en el modelo de simulación de hábitat conocido como “Physical Habitat Simulation System” (PHABSIM). Este modelo de simulación se enfoca en la cantidad y disponibilidad de hábitats físicos para diferentes especies dentro del río. Las condiciones simuladas son relacionadas con las preferencias o requerimientos de hábitats para diferentes estadios de vida de peces encontrados dentro del río, actividades de alimentación o reproducción, los cuales se calculan a partir de las curvas de preferencia de hábitat; estas se basan en respuestas de ausencia-presencia o abundancia y con lo anterior se ve reflejado una serie de flujos óptimos como requerimientos de flujo ambiental, (Arthington, 2012).

El (IFIM) tiene un lugar central en esta categoría y fue desarrollado en América del Norte a finales de 1970; el componente central de la plataforma de modelo del IFIM hábitat físico conocido como PHABSIM se ha utilizado en al menos 20 países, mientras que varios países utilizan más el programa de simulación hidráulica fluvial equivalente hábitat, llamada RHYHABSIM (Jowett 1989).





### ***1.4.1.10 Métodos holísticos***

Este método representa solo el 7.7 %, considera como principio la observación del sistema fluvial completo del cauce, principalmente se enfocan en eventos importantes o bien críticos del patrón del flujo que definen la variabilidad natural y que dan dirección a los principales atributos del ecosistema acuático.

Algunas metodologías holísticas utilizan varias herramientas de análisis hidrológico, hidráulico y de hábitat físico que pertenecen a las metodologías anteriores, lo cual ayuda a establecer requerimientos del caudal ambiental del ecosistema fluvial (Fernández Yuste et al., 2006).

La metodología “Building Block Methodology” (BBM), es de las más conocidas y es utilizada con mayor frecuencia y es considerada de las más completas por ser interdisciplinaria, pero a su vez una de las más caras en costo para poder llevar a cabo.

Sin embargo, a pesar de esta variedad y cantidad de métodos, no se ha logrado establecer un método como el más eficiente para conocer los caudales ecológicos.

## **1.5 Metas ecológicas**

Se realizaron dos metas enfocadas principalmente para restaurar y proteger ríos, (Postel & Richter, 2003):

- Mejorar la calidad del agua
- Establecer requerimientos para un flujo base durante un flujo normal y para flujos de subsistencia durante sequías, de modo que ríos y arroyos no se queden completamente secos.

Gracias a estas acciones, se logró mejorar las condiciones de ríos en muchas locaciones y preservar la integridad de los sistemas fluviales en general.

Incluso a pesar de que el río no se encuentre fuertemente demandado, el desafío o reto es conservar los patrones de caudal natural para mantener los servicios ecosistémicos, incluso cuando el río es manejado por propósitos económicos.



Afortunadamente, numerosos científicos y políticos están desarrollando y probando nuevas ideas para lograr un óptimo balance, para que el río sea capaz de administrar la demanda de agua para la sociedad, así como las necesidades de agua del propio río. Vale la pena decir que en la actualidad, aproximadamente más de 230 ríos del mundo son sometidos a algún grado de restauración del flujo.

Para la salud y la conservación de los ríos, los lineamientos a seguir consisten en tres clases elementales, (Postel & Richter, 2003).

- El gran reconocimiento de la importancia de la diversidad biológica y el valor natural de los servicios naturales del ecosistema
- Que los científicos consensen la restauración de cierto grado del patrón de flujo natural del río en la mejor manera de proteger y restaurar la salud del río y el funcionamiento
- La aparición de nuevos modelos de toma de decisiones sobre la administración de ríos que a menudo ofrecen la promesa de obtener resultados con una mayor inclusión, equidad y sostenibilidad ecológica.

### *1.5.1 Restauración de los patrones del caudal natural de un río*

---

En la actualidad se está poniendo mayor atención por la gran pérdida de caudales naturales y el impacto que tiene en el hábitat provocando cambios drásticos en el ciclo de vida de las especies, todo esto provocado por una infraestructura hidrológica que ha beneficiado a algunos sectores de la población, pero ha llegado a dañar el ecosistema, ya que en un determinado momento no se le dio la necesaria importancia, es por esto que se ha puesto como meta restaurar los caudales usando estrategias que llegan, desde modificaciones de operaciones en presas, hasta medidas de conservación para reducir el uso humano de agua, todos estos con la finalidad de recrear componentes críticos del régimen del caudal natural de un río (Postel & Richter, 2003).



### ***1.5.1.1 Restauración de caudal base o flujo bajo escurrimiento basal***

El escurrimiento basal es el estado del caudal dominante en la mayoría de los ríos, como tal este nivel impone limitaciones fundamentales a las comunidades acuáticas del río, pues determina la cantidad de hábitat disponible la mayor parte del año; al disminuir o incrementar artificialmente el escurrimiento basal puede provocar problemas en la salud del río. Así mismo, la reducción del caudal base ocasiona graves problemas ecológicos en los ríos, por lo cual se ha buscado la forma de restablecerlos para fines ecológicos, haciendo uso de estrategias muy diferentes, (Postel & Richter, 2003).

### ***1.5.1.2 Restauración de caudales máximos***

Los flujos altos son una alteración importante y necesaria de los caudales base pues aceleran el ritmo del río. Estos tienen un mayor impacto durante las sequías ya que en esta temporada el caudal base llega a disminuir demasiado, y esa porción de caudales máximos ayuda a que no llegue a niveles peligrosos; así mismo, ayuda a reducir las altas temperaturas del caudal al mismo tiempo que oxigena al caudal base sin dejar de lado, que proporciona materia orgánica y otros nutrientes para sostener el ecosistema acuático.

Al restaurar los caudales máximos o las avenidas, ayuda a restablecer las condiciones originales del río ya que definen la geometría básica del cauce, anchura, profundidad, la complejidad física de los hábitats acuáticos y en consecuencia determinan su utilidad para las diversas especies nativas. Así mismo, estos caudales sirven para arrastrar sedimentos, depositándolos en áreas de aguas más lentas, esta erosión y de sedimentación dinámica le da forma al canal moviendo los sedimentos del lecho, formando estanques, rápidos e islotes; las crecidas mantienen limpias y despejadas las separaciones de sedimentos de arena, pedruscos y rocas, ya que las crecidas labran el cauce (Postel & Richter, 2003).



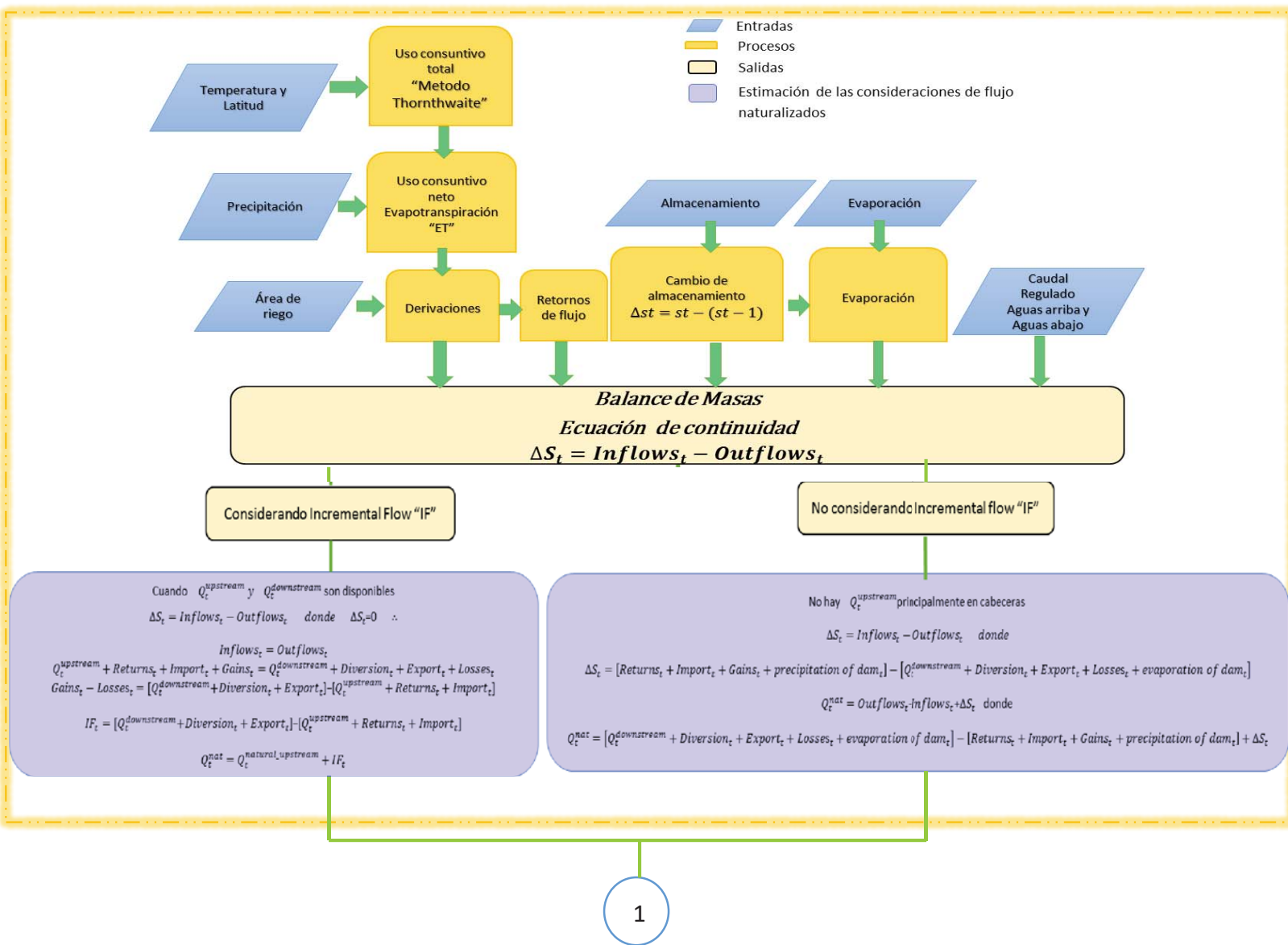
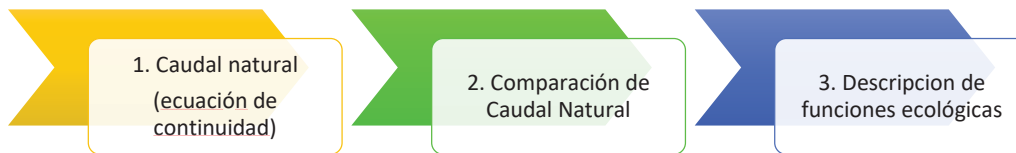
### ***1.5.1.3 Restauración de inundaciones***

Las inundaciones son de gran importancia para peces y otras especies que habitan ríos y estuarios; gracias a las inundaciones o excesiva carga de agua en el cauce, los peces pueden desplazarse libremente aguas arriba y aguas abajo y pueden dirigirse a la zona de llanuras de inundación o humedales que antes de una inundación son zonas inaccesibles para ellos, donde desovan y encuentran nutrientes e insectos, aparte donde se encuentra inundación somera, se presenta una temperatura más templada que la del mismo cauce principal. Este fenómeno lo han descrito ecólogos como subsidio de pulso del caudal; por la simple razón de que varias especies de peces solo desovan o lo hacen de manera más rentable en términos económicos, en áreas de inundación somera, también la llanura o planicie de inundación es una zona donde se mantienen varias vidas silvestres, y nutre regiones de humedales (Postel & Richter, 2003).



## CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para la elaboración de este estudio considera los tres objetivos principales; la estimación del caudal natural, la comparación con registros históricos y la descripción de las funciones ecosistémicas en el RBG, ver Figura 2-1. Para el primer objetivo se determinó el régimen del caudal natural del RBG en el periodo de 1901-1913, debido que en este periodo el RBG se encontraba con pocas modificaciones antropogénicas, mediante la elaboración de una hoja de cálculo se concentraron los registros de escurrimiento histórico, la temperatura y la precipitación, registros que se utilizaron para la obtención de la derivación del agua, cabe mencionar que todos los registros se manejaron en forma diaria y con el uso de la ecuación de continuidad ( $\Delta S_t = Inflows_t - Outflows_t$ ) se obtuvo el caudal natural donde *Inflows* corresponden a la masa de agua de entrada y los *Outflows<sub>t</sub>* a la masa de agua de salida, ver Figura 2-2. Para el segundo objetivo se analizaron los datos de Cravioto y Lowry (1944) y de Orive (1945) y se compararon con los obtenidos en esta investigación, se consideró el estudio de Orive (1945) ya que se basa en el informe técnico sobre el tratado internacional de aguas para el RBG. Para el tercer objetivo se utilizó una tabla de funciones ecológicas definidas por Postel y Richter (2003) y se seleccionaron las funciones ecológicas pertinentes para el RBG de acuerdo a las características del régimen de flujo obtenido del caudal natural.



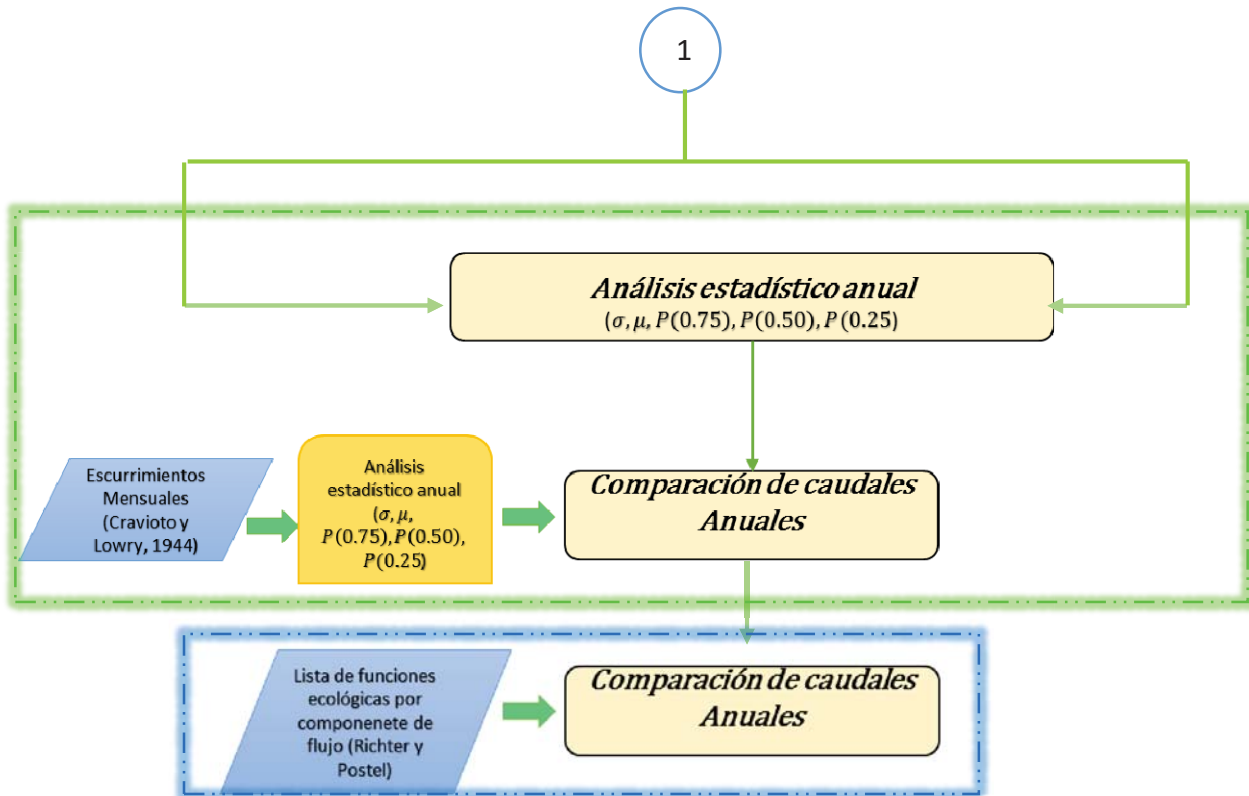


Figura 2-1. Modelo de referencia. Elaboración propia



## 2.1 Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad se basa en la ley de conservación de la masa y se considera que un sistema cerrado permanece siempre constante, donde la masa que entra al sistema debe salir de éste o acumularse. Los términos usados en la ecuación del balance de masas se expresan en la Ecuación 2-1.

$$\Delta S_t = Inflows_t - Outflows_t \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde  $Inflows_t$  son flujos de entrada y  $Outflows_t$  son flujos de salida.

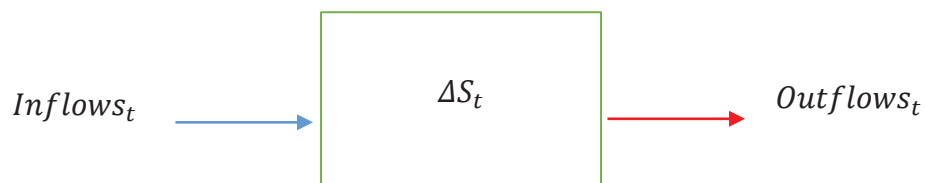


Figura 2-2. Ecuación de continuidad

La Figura 2-2 representa las entradas de masa de agua y las salidas de masa de agua como se describe en el enunciado anterior y ambos dependen de los datos disponibles y las características que contenga cada río; cabe mencionar que en este proyecto se estimaron los flujos naturales dividiéndolos en dos casos, los cuales se mencionan en los apartados 2.1.1 y 2.1.2.

### 2.1.1 No considerando escurrimientos por cuenca propia

Donde los escurrimientos por cuenca propia ( $IF_t = Gains_t + Losses_t$ ), (“IF” por sus siglas en inglés, Incremental Flow), no se estimaron dentro del volumen de control donde no existían registros disponibles del flujo aguas arriba o de cabecera ( $Q_t^{Upstream}$ ), esto sucedió sobre todo en los afluentes del RBG, Figura 2-3.



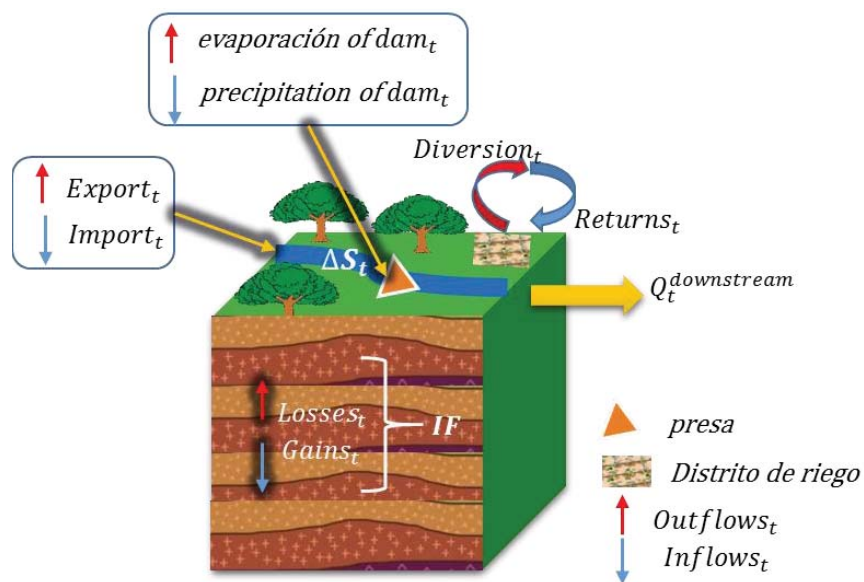


Figura 2-3. Volumen de control no considerando  $IF_t$ . Elaboración propia.

Deduciendo de la Ecuación 2-1.

$$\Delta S_t = Inflows_t - Outflows_t$$

Donde  $\Delta S_t$  es el cambio de almacenamiento,  $Inflows_t$  son volúmenes de entrada y  $Outflows_t$  volúmenes de salida, considerando como volúmenes de entrada ( $Inflows_t$ ): retornos ( $Returns_t$ ), importaciones ( $Import_t$ ), ganancias ( $Gains_t$ ) y almacenamiento en presas (precipitation of  $dam_t$ ) y como volúmenes de salida ( $Outflows_t$ ): caudal aguas abajo ( $Q_t^{downstream}$ ), derivaciones ( $Diversion_t$ ), exportaciones ( $Export_t$ ), pérdidas ( $Losses_t$ ) y evaporación en presas ( $evaporación\ of\ dam_t$ ), al sustituirlos en la Ecuación 2-1 se obtiene la Ecuación 2-2

$$\Delta S_t = [Returns_t + Import_t + Gains_t + precipitation\ of\ dam_t] - [Q_t^{downstream} + Diversion_t + Export_t + Losses_t + evaporation\ of\ dam_t]$$

Ecuación 2-2

Finalmente para determinar el caudal natural a la salida de un volumen de control se utilizó la Ecuación 2-3

$$Q_t^{nat} = Outflows_t - Inflows_t + \Delta S_t$$

Ecuación 2-3

A la que sustituyendo se obteniendo la Ecuación 2-4.



$$Q_t^{nat} = [Q_t^{downstream} + Diversion_t + Export_t + Losses_t + evaporation\ of\ dam_t] - [Returns_t + Import_t + Gains_t + precipitation\ of\ dam_t] + \Delta S_t$$

Ecuación 2-4

### 2.1.2 Considerando escurrimientos por cuenca propia

Donde se consideró el escurrimiento por cuenca propia ( $IF_t$ ), a lo largo del cauce principal debido a que se tenía el caudal regulado aguas arriba ( $Q_t^{Upstream}$ ) y aguas abajo ( $Q_t^{Downstream}$ ), en el volumen de control, ver Figura 2-4.

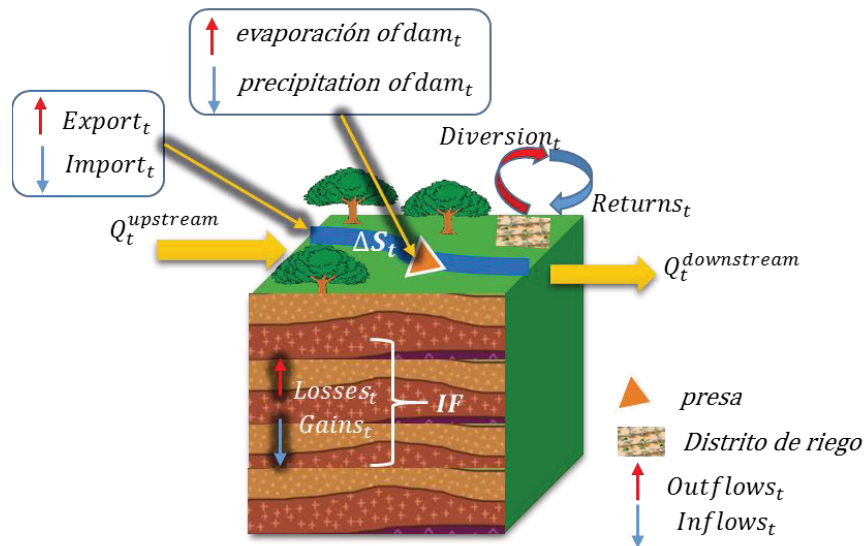


Figura 2-4. Volumen de control considerando  $IF_t$ . Elaboración propia.

Se deduce de la Ecuación 2-1 y solo aplica cuando  $Q_t^{upstream}$  y  $Q_t^{downstream}$  son disponibles.

$$\Delta S_t = Inflows_t - Outflows_t \quad \text{donde} \quad \Delta S_t = 0 \quad \therefore$$

$$Inflows_t = Outflows_t$$

Ecuación 2-5

Donde  $\Delta S_t$  es el cambio de almacenamiento,  $Inflows_t$  son volúmenes de entrada y  $Outflows_t$  volúmenes de salida, considerando como volúmenes de entrada ( $Inflows_t$ ): caudal aguas arriba ( $Q_t^{upstream}$ ), retornos ( $Returns_t$ ), importaciones ( $Import_t$ ) y ganancias ( $Gains_t$ ) y como volúmenes de salida ( $Outflows_t$ ): caudal aguas abajo ( $Q_t^{downstream}$ ), derivaciones



( $Diversión_t$ ), exportaciones ( $Export_t$ ) y pérdidas ( $Losses_t$ ), al sustituir en la Ecuación 2-5 se tiene la Ecuación 2-6, de la cual se despejan las ganancias ( $Gains_t$ ) y las pérdidas ( $Losses_t$ ), obteniendo así la Ecuación 2-7, la cual determina los escurrimientos por cuenca propia ( $IF_t$ ).

$$Q_t^{upstream} + Returns_t + Import_t + Gains_t = Q_t^{downstream} + Diversión_t + Export_t + Losses_t \quad \text{Ecuación 2-6}$$

Despejando las pérdidas y las ganancias se obtienen los escurrimientos por cuenca propia  $IF_t$  obteniendo la Ecuación 2-7.

$$Gains_t - Losses_t = [Q_t^{downstream} + Diversión_t + Export_t] - [Q_t^{upstream} + Returns_t + Import_t]$$

$$IF_t = [Q_t^{downstream} + Diversión_t + Export_t] - [Q_t^{upstream} + Returns_t + Import_t] \quad \text{Ecuación 2-7}$$

El caudal natural a la salida de un volumen de control se determinó sumando el caudal natural de aguas arriba más el escurrimiento por cuenca propia generado en el volumen de control, teniendo la Ecuación 2-8.

$$Q_t^{nat} = Q_t^{natural\_upstream} + IF_t \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Donde  $Q_t^{natural\_upstream}$  es el caudal natural aguas arriba que depende del volumen de control que se esté estudiando y  $IF_t$  el escurrimiento por cuenca propia.

### 2.1.3 Periodo de Análisis

Para el análisis se consideró un periodo hidrológico de 12 años a partir de 1901 a 1913. La información requerida se extrajo de la institución International Boundary and Water Commission encargada de monitorear el RBG, la cual se divide en la CILA por parte de México y la IBWC por la parte de Estados Unidos; de ésta se extrajo datos de caudales regulados en las diferentes estaciones ubicadas a lo largo del cauce; así mismo, se utilizó registros históricos de caudal y altura del cauce del United States Geological Survey (USGS); estudio realizado por Robert Follansbee W.W Follett y Glenn A.Gray titulado Water Resources of the Río Grande Basin 1988-1913 y los registros de temperatura y precipitación se obtuvieron del PRISM, página administrada



en Estados Unidos, así como de la base de datos del ERIC III administrada por CONAGUA en México.

### 2.1.4 Fuente de Información

La información que se requirió durante el análisis de este estudio, fueron registros históricos de caudal, temperatura, precipitación y tirante; todos los registros se obtuvieron de las fuentes consultadas mostradas en la Tabla 2-2, en la Tabla 2-1 se muestra a detalle la información extraída y en la se muestran.

**Tabla 2-1. Información utilizada para el estudio**

	Variable	Nombre de Estación	Numero de Estación	Corriente	Ciudad	Fuente	Estado	Unidad	Escala de tiempo
1	Caudal	RIO GRANDE ABOVE RIO CONCHOS NEAR PRESIDIO	08-3715.00	RBG	US	IBWC	TX AND OJINAGA, CHIH.	m3/s	diario
2	Caudal	RIO GRANDE BELOW RIO CONCHOS NEAR PRESIDIO	08-3742.00	RBG	US	IBWC	TX AND OJINAGA, CHIH.	m3/s	diario
3	Caudal	ALAMITO CREEK NEAR PRESIDIO	08-3740.00	Alamito Creek	US	IBWC	TX	m3/s	diario
4	Caudal	RIO CONCHOS NEAR OJINAGA	08-3730.00	Rio Conchos	MEX	IBWC	CHIH	m3/s	diario
5	Caudal	RIO LANGTRY	<a href="#">water supply paper 358 .pdf</a>	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
6	Caudal	TERLINGUA CREEK NEAR TERLINGUA	08-3745.00	RBG	US	IBWC	TX	m3/s	diario
7	Caudal	RIO GRANDE AT JOHNSON RANCH NEAR CASTOLON	08-3750.00	RBG	US	IBWC	TX	m3/s	diario
8	Caudal	RIO GRANDE AT FOSTER RANCH NEAR LANGTRY	08-3772.00	RBG	US	IBWC	TX	m3/s	diario
9	Caudal	RIO GRANDE NEAR LANGTRY	<a href="#">water supply paper 358 .pdf</a>	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
10	Caudal	RIO GRANDE NEAR DEVILS RIVER	<a href="#">water supply paper 358 .pdf</a>	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
11	Caudal	RIO GRANDE AT EAGLE PASS	<a href="#">water supply paper 358 .pdf</a>	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
12	Caudal	RIO DEVILS AT DEVILS RIVER	<a href="#">water supply paper 358 .pdf</a>	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
13	Caudal	RIO PECOS NEAR MOORHEAD	<a href="#">water supply paper 358 .pdf</a>	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
14	Temperatura	BAJO RIO CONCHOS OJINAGA (DR 090)	Lat: 29.5390 Lon: -104.4063 Elev: 802m	Rio Conchos	US	PRISM	CHIH	c°	mensual



15	Temperatura	DELICIAS (DR 005)	8044	Rio Conchos	MEX	ERIC III	CHIH	c°	mensual
16	Temperatura	RIO FLORIDO (DR 103)	8029	Rio Conchos	MEX	ERIC III	CHIH	c°	mensual
17	Precipitación	BAJO RIO CONCHOS OJINAGA (DR 090)	Lat: 29.5581 Lon: -104.4064 Elev: 802m	Rio Conchos	US	PRISM	CHIH	mm	diario
18	Precipitación	DELICIAS (DR 005)	8044	Rio Conchos	MEX	ERIC III	CHIH	mm	diario
19	Precipitación	RIO FLORIDO (DR 103)	8029	Rio Conchos	MEX	ERIC III	CHIH	mm	diario
20	Caudal	RIO GRANDE NEAR LANGTRY, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
21	Caudal	RIO GRANDE NEAR DEVILS RIVER, TEX	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
22	Caudal	PECOS RIVER NEAR MOORHEAD, TEX	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
23	Caudal	RIO GRANDE AT EAGLE PASS, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
24	Altura	RIO GRANDE AT EAGLE PASS, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft	diario
25	Caudal	RIO GRANDE NEAR LAREDO, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
26	Altura	RIO GRANDE NEAR LAREDO, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft	diario
27	Caudal	RIO GRANDE NEAR ROMA, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
28	Altura	RIO GRANDE NEAR ROMA, TEX.	water supply paper 358 .pdf	Rio Salado	MEX	USGS	TX	ft	diario
29	Caudal	RIO SALADO NAAR GUERRERO, TAMAULIPAS, MEXICO	water supply paper 358 .pdf	Rio Salado	MEX	USGS	TAMAULIPAS	ft/s	diario
30	Altura	RIO SALADO NAAR GUERRERO, TAMAULIPAS, MEXICO	water supply paper 358 .pdf	Rio Salado	MEX	USGS	TAMAULIPAS	ft	diario
31	Temperatura	DON MARTIN (DR 004)	Lat: 26.7866 Lon: -99.2964 Elev: 108m	Rio Salado	MEX	PRISM	TAMAULIPAS	c°	mensual
32	Precipitación	DON MARTIN (DR 004)	Lat: 26.7866 Lon: -99.2964 Elev: 108m	Rio Salado	MEX	PRISM	TAMAULIPAS	mm	diario
33	Caudal	RIO GRANDE NEAR BROWNSVILLE, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft/s	diario
34	Altura	RIO GRANDE NEAR BROWNSVILLE, TEX.	water supply paper 358 .pdf	RBG	US	USGS	TX	ft	diario
35	Temperatura	RIO GRANDE NEAR BROWNSVILLE, TEX.	Lat: 25.9228 Lon: -97.4561 Elev: 8m	RBG	US	PRISM	TX	c°	mensual
36	Precipitación	BROWNSVILLE	Lat: 25.9228 Lon: -97.4561 Elev: 8m	RBG	US	PRISM	TX	mm	diario
37	Caudal	RIO SAN JUAN NEAR LA QUEMADA AND SANTA ROSALIA RANCH, TAMAULIPAS, MEX	water supply paper 358 .pdf	Rio San Juan	MEX	USGS	TAMAULIPAS	ft/s	diario
38	Altura	RIO SAN JUAN NEAR LA QUEMADA AND SANTA ROSALIA RANCH, TAMAULIPAS, MEX	water supply paper 358 .pdf	Rio San Juan	MEX	USGS	TAMAULIPAS	ft	diario

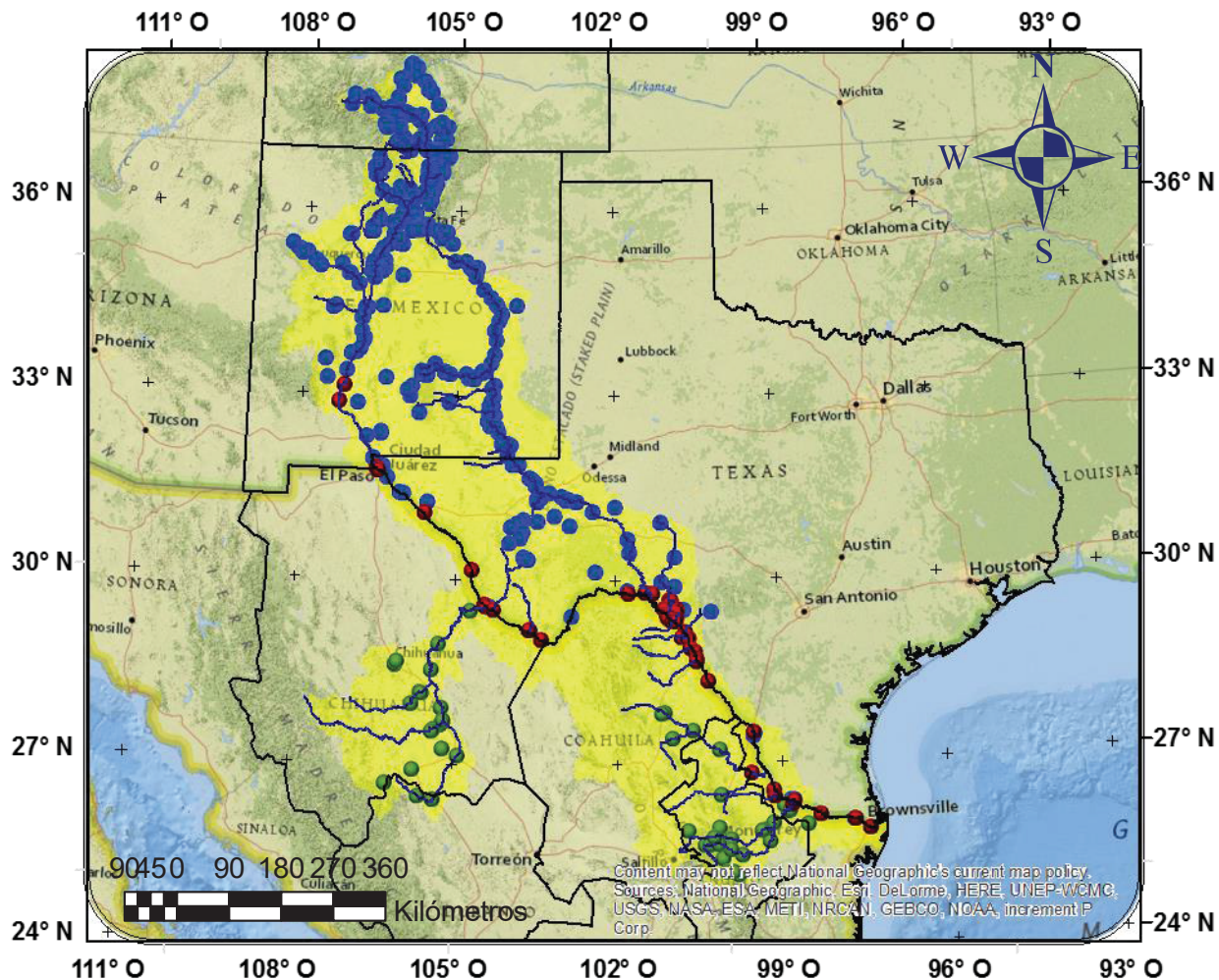


Figura 2-5. Estaciones hidrométricas consultadas

Tabla 2-2. Fuente de información consultada

		Fuente	Última visita
1	IBWC (International Boundary & Water Commission)	US <a href="http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/histflo1.htm">http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/histflo1.htm</a>	14/08/2016
2	USGS (United States Geological Survey, water supply paper 358, 1945)	Washington, US <a href="datos\gasto%20diarios%20medidos%20IBWC\USGS%20(1914)%20Water%20Supply%20Paper%20358%20Bookmarks.pdf">datos\gasto sdiarios medidos IBWC\USGS (1914) Water Supply Paper 358 Bookmarks.pdf</a>	14/08/2016
3	PRISM (Climate Group)	Oregon, US <a href="http://www.prism.oregonstate.edu/explorer/">http://www.prism.oregonstate.edu/explorer/</a>	14/08/2016



4	ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica)	México	<a href="#">datos\Evapotranspiracion\evapotranspiracion Eric III\ERICIIIv2\eric.exe</a>	14/08/2016
5	ARGIS(geodatabase)	US	<a href="#">Rio Grande Bravo\Geodatabase\ArcHydroBinational_March2006.mdb</a>	14/08/2016
6	BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales)	México	<a href="http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm">http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm</a>	14/08/2016

## 2.2 Componentes de la Ecuación de Continuidad

### 2.2.1 Entradas de masa de agua al volumen de control

Como entradas de masa de agua en la ecuación de continuidad se tienen aguas arriba ( $Q_t^{Upstream}$ ), retornos ( $Returns_t$ ), importaciones ( $Import_t$ ), ganancias ( $Gains_t$ ) y almacenamiento en presas (precipitation of  $dam_t$ ); sin embargo, para este proyecto solo se consideró en algunos volúmenes de control caudales aguas arriba ( $Q_t^{Upstream}$ ), los cuales fueron obtenidos de registros históricos.

### 2.2.2 Salidas de masa de agua del volumen de control

Como salidas de masa de agua en la ecuación de continuidad, se tienen caudal aguas abajo o de salida ( $Q_t^{downstream}$ ), derivaciones ( $Diversion_t$ ), exportaciones ( $Export_t$ ), pérdidas ( $Losses_t$ ) y evaporación en presas (evaporación of  $dam_t$ ), de las cuales se consideraron los siguientes para este proyecto:

#### 2.2.2.1 Uso consuntivo

En este proyecto se consideró el uso consuntivo como la combinación de la evaporación y la transpiración, donde la evaporación es el proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso y se transfiere a la atmosfera; mientras que la transpiración es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas, la cual es tomada del suelo. Por lo que el



uso consuntivo es la combinación de la evapotranspiración (ET) por sus siglas en inglés Evapotranspiration y el agua que las plantas retienen para su nutrición y crecimiento. Esta última cantidad es pequeña en comparación con la evapotranspiración, que aproximadamente representa solo el 1%, por lo que los términos de evapotranspiración y uso consuntivo se usan como sinónimos (Aparicio, 2001). Para calcular la evapotranspiración o el uso consuntivo, existen varios métodos algunas de estos se mencionan en la Tabla 2-3.

**Tabla 2-3. Métodos para calcular el uso consuntivo (ET)**

Método	Datos en los que se basa
Thorntwaite	Temperatura, latitud
Jensen-Heise	Temperaturas (medias, máx. y min del mes cálido) altitud, radiación solar
Hargreaves	Temperatura, radiación solar
Blanney Criddle	Temperatura, tipo de cultivo
Turc	Temperatura, horas reales de sol
Penman	Temperatura, horas reales de sol, viento, humedad relativa

### 2.2.2.1.1 Uso consuntivo total

En este proyecto se utilizó el método de Thornthwaite desarrollado en 1944, basado en los registros de temperatura media mensual y la latitud de la zona de estudio, dando como resultado el uso consuntivo total mensual y se calcula mediante la Ecuación 2-9, (Aparicio, 2001).

$$U_{j_t} = 1.6 K_a \left( \frac{10T_j}{I} \right)^a \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Donde  $U_j$  es el uso consuntivo total en el mes dado en cm,  $T_j$  la temperatura media en el mes expresado en grados centígrados, la cual se correlacionó y se aplicó una ecuación lineal en los casos donde no se encontraron registros completos,  $I$  y  $a$  son constantes y  $K_a$  es una constante que depende de la latitud y del mes el año. Para calcular la constante  $I$  se utiliza la Ecuación 2-10 y para la constante  $a$  la Ecuación 2-12 la cual depende completamente de la constante  $I$ .

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad \text{De la cual} \quad \text{Ecuación 2-10}$$

$$i_j = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ecuación 2-11}$$





Donde  $T_j$  es la temperatura media en el mes

$$a = 675 \times 10^{-9} * I^3 - 771 \times 10^{-7} * I^2 + 170 \times 10^{-4} * I + 0.492 \quad \text{Ecuación 2-12}$$

$K_a$  Se obtiene de la Tabla 2-4, donde se interpola la latitud de la zona de estudio con respecto al mes del que se desea obtener la constante.

**Tabla 2-4. Valores de  $K_a$  . Elaboración propia, (Aparicio, 2001).**

VALOR DE $K_a$												
latitud Grados	Mes											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.93	0.91
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.8	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7

Al sustituir los valores obtenidos en la Ecuación 2-9, se obtiene el uso consuntivo total medio mensual; sin embargo, para este proyecto se requiere el uso consuntivo total diario por lo que se utilizó una interpolación lineal para estimar los valores diarios del uso consuntivo total, desde la mitad de un mes al otro, Ecuación 2-13.

$$y = a + mx \quad \text{Ecuación 2-13}$$

Donde  $y$  es variable dependiente y  $x$  es variable independiente,  $a$  es el punto intercepto en el eje de las ordenadas (ordenada al origen) y  $m$  la pendiente la cual se obtiene con la Ecuación 2-14.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

Donde  $y_1, y_2, x_1, x_2$  son coordenadas del tramo del que se desea obtener la pendiente, Figura 2-6.

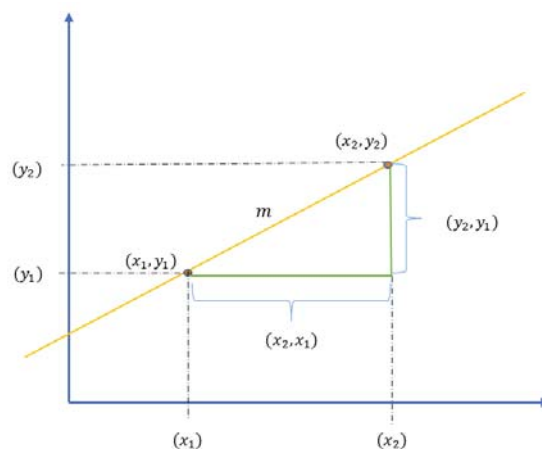


Figura 2-6. Pendiente. Elaboración propia.

### 2.2.2.1.2 Uso consuntivo neto

El uso consuntivo neto representa el tirante de agua utilizada para el riego, se obtuvo de la diferencia del uso consuntivo total diario, con respecto a la precipitación registrada diaria, como se muestra en la Ecuación 2-15, (Cravioto, 1946).

$$U_{net_t} = u_{jd_t} - p_{d_t} \quad \text{Ecuación 2-15}$$

Donde  $U_{net_t}$  es el uso consuntivo neto diario,  $u_{jd_t}$  es el uso consuntivo total diario y  $p_{d_t}$  es la precipitación diaria.

Cabe mencionar que la precipitación registrada con datos faltantes, se completó con los datos de la misma estación donde se considera el valor del uso consuntivo total para definir la precipitación correspondiente a cada valor faltante.

### 2.2.2.2 Derivaciones para riego y retornos

Para calcular la derivación para riego es necesario conocer las áreas de los distritos de riego, así como las zonas fuera de estos distritos que también utilizan agua para riego. Sin embargo, como estos datos no estuvieron disponibles para este estudio, solo se consideraron las áreas de los distritos de riego para realizar la estimación de las derivaciones, por lo que se multiplicó el



uso consuntivo neto diario por el área del distrito de riego como se muestra en la Ecuación 2-16 , (Cravioto, 1946).

$$Diversión_t = U_{net_t} * A_{riego} \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Donde  $Diversión_t$  es la derivación por riego,  $U_{net_t}$  el uso consuntivo neto diario y  $A_{riego}$  el área correspondiente al distrito de riego.

El retorno se obtuvo multiplicando la desviación por un porcentaje de retorno, el cual se considera por el tipo de suelo o la cantidad de área regada.

### 2.2.3 Esgurrimientos por cuenca propia (Incremental Flow “IF”)

El esgurrimiento por cuenca propia sé considera siempre y cuando se cuente con registros de entrada “aguas arriba” ( $Q_t^{Upstream}$ ) y registros de salida “aguas abajo” ( $Q_t^{Downstream}$ ), dentro del volumen de control, aplicando la Ecuación 2-7

$$IF_t = [Q_t^{Downstream}] - [Q_t^{Upstream}] \quad \text{Ecuacion 2.7}$$

Donde  $IF_t$  es el esgurrimiento por cuenca propia (Incremental Flow),  $Q_t^{Upstream}$  es la entrada de masa de agua y  $Q_t^{Downstream}$  es la salida de masa de agua como se muestra en la Figura 2-7.

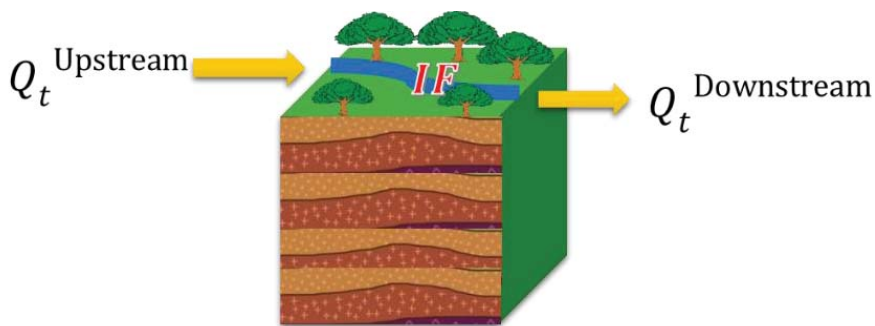


Figura 2-7. Esgurrimientos por cuenca propia

En el caso que el resultado obtenido del  $IF_t$  sea negativo indica que el caudal ha sufrido pérdidas de masa de agua y de ser positivo indica que ha sufrido ganancias de masas dentro del sistema.

$IF_t > 0$ , entonces hay ganancias o  $IF_t < 0$ , entonces hay pérdidas



## CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO: RÍO BRAVO/GRANDE

### 3.1 Descripción del río Bravo

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA [B], 2012), en México los ríos y arroyos constituyen una red hidrográfica de 633,000 km de longitud. Por los cauces de los 50 ríos principales fluye el 87% del escurrimiento superficial de la República y sus cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país. Por la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Nazas y Aguanaval pertenecen a ríos con vertiente interior.

El río Bravo fluye sobre una grieta de la corteza terrestre, conocida en Estados Unidos como Río Grande; hace millones de años en algunas áreas de Norteamérica la tierra se elevó, y en las secciones más bajas los flujos de agua procedentes del hielo de las montañas tuvieron un lugar perfecto para moverse naturalmente desde las zonas superiores hacia las inferiores. Se cree que el “ancestro” del río comenzó a fluir hace unos 4 millones de años; era poco profundo y muy amplio. Tomó su forma actual hace apenas 1 - 2 millones de años. A diferencia de otros ríos, éste no labró el valle, es decir, no erosionó la tierra, sino que simplemente fluyó a través de la grieta, (Geoenciclopedia, 2016).

En México se asigna el término de Río Grande a la porción de agua que fluye desde su fuente en las montañas rocallosas del estado del Colorado hasta El Paso, Cd Juárez/ Texas y de ese punto hasta su desembocadura con el Golfo de México se le asignó el nombre de Río Bravo, mientras que en Estados Unidos se le asigna el nombre de Río Grande a todo el Río desde su nacimiento hasta su desembocadura. (Hoth, et al., 2010).



El río Bravo es una cuenca transfronteriza entre México y Estados Unidos, cubre una superficie total de aproximadamente 607,965 km<sup>2</sup>, su cuenca es más del 30% árida y drena una área mayor que el tamaño de California; más de la mitad de esta superficie corresponde a Estados Unidos con el 59% y el 41% restante correspondiente a México, fluye desde las montañas de San Juan de Colorado, al sur a través de Nuevo México volviendo al sureste, que forma la frontera entre México y los Estados Unidos (Texas) por aproximadamente dos terceras partes de su curso y finalmente descarga sus aguas en el Golfo de México. Tiene una longitud de 3,033 km y es el río de mayor longitud en México formando la mayor cuenca del país; en Estados Unidos es conocido como Río Grande y se considera el cuarto río más largo, es el quinto para América del Norte (2892 km) y el vigésimo cuarto río más grande del mundo; esta región transfronteriza se considera una de las más dinámicas del mundo tanto en lo económico, social y cultural, abarcando desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, (WWF, 2016).

Sus afluentes principales son el río Conchos, San Juan y Sabinas por la parte de México y el río Pecos del lado de Estados Unidos; destaca el río Conchos ya que aporta casi el doble del flujo de agua que cualquier otro afluente que descarga en el RBG, cabe mencionar que el agua proveniente en el nacimiento de este río es por derretimiento de nieve y hielo de montañas.

Ocupa el cuarto lugar en México de las cuencas que designan mayor parte de su volumen de agua concesionada al uso consuntivo por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de contar con el número mayor de títulos de concesiones en el país con 6,500 enfocadas a aguas superficiales y 36,500 para aguas subterráneas, (Hoth, et al., 2010).

Dentro de la cuenca del RBG se encuentran: el Bosque Nacional Rio Grande donde se encuentran escarpados picos montañosos, ríos veloces, mesetas con bosques, cañones glaciales, lagos alpinos y praderas abiertas, así mismo existen cuatro áreas de desierto la Weminuche, Sangre de Cristo, La Garita y San Juan Sur, el Valle de San Luis que contiene varios complejos y refugios nacionales para la vida silvestre como lo es el de Alamosa/Monte Vista establecido en 1962 el cual se constituye principalmente por meandros y corredores ribereños que se localizan en la planicie de inundación del RBG. Este refugio es un hábitat importante para las aves a finales



del invierno, las águilas calvas se agrupan en el extremo sur del refugio para alimentarse en las aguas del RBG, las zonas inundables con las crecidas del río son preferidas en el verano por las cigüeñas de cuello negro y las avocetas mientras las áreas ribereñas son importantes para las aves canoras migrantes y las que buscan sitios de anidación y es famoso por su excelente pesca en el Río Bravo/Grande. Otro refugio nacional es el Bosque del Apache el cual se estableció en 1939 para mantener un refugio y sitio de reproducción para las aves migratorias y otro tipo de fauna Silvestre, se ubica en el extremo norte del desierto de Chihuahua y hoy en día es uno de los más espectaculares refugios en América del Norte este funciona también para restaurar bosques nativos ya que muchas áreas del refugio han sido invadidas por el cedro de sal o tamarisco, planta que originalmente se introdujo como de jardinería y para el control de la erosión, sin embargo, tenía una afección por el agua y estaba impactando de manera importante a la disminución del recurso hídrico por lo que hoy en día el cedro de sal se está eliminando y reemplazando por álamos americanos y sauce negro, así como arbustos entre otras plantas. También existe el parque estatal del lago Elephant Butte creado por la construcción de una presa en 1916 la cual se construyó con el propósito del control de inundaciones y la irrigación, sin embargo, se ha convertido en un lugar para la recreación. El reservorio Elephant Butte es el lago más grande y más popular de Nuevo México donde hay pesca, remo en bote, esquí acuático y veleo para los visitantes. También existe el parque nacional Bing Bend este protege más de 320,400 hectáreas y se ubica en una gran curva que comprende una gran parte del desierto de Chihuahua. A primera vista el Big Bend parece ser más un parque geológico que ecológico, pero no es una impresión duradera ya que casi 450 especies de aves, 78 mamíferos, 76 anfibios y reptiles y 42 de peces, así como muchos tipos de insectos se encuentran dentro del parque, este aloja más especies de aves y de cactus que cualquier otro parque nacional, esta área fue nombrada como paisaje pintoresco del RBG en 1968. En total existen 27 lugares especiales y que albergan ecosistemas acuáticos, ribereños y terrestres a lo largo del RBG que representan la diversidad de formas de tierra, comunidades, plantas, peces, vida silvestre y gente de la cuenca, (Watercourse, 2001).



*Figura 3-1. Parque Nacional Big Bend, Texas (Rios, s.f.)*

### *3.1.1 Ubicación geográfica*

---

La cuenca RBG abarca el estado de Colorado, New México y Texas del lado de Estados Unidos mientras que por México la cuenca incluye cinco estados, Durango, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, y se conforma por 141 municipios, de los cuales, 31 corresponden al estado de Coahuila, 52 al estado de Chihuahua, 47 al estado de Nuevo León, 10 al estado de Tamaulipas y 1 al estado de Durango, (CONAGUA, 2010), ver Figura 3-2.

Como medio de planeación la cuenca del RBG se dividió en dos subregiones: La parte alta del Río Bravo que se extiende desde las fuentes del Río ubicadas en el estado de Colorado, hasta Fort Quitman, Texas incluyendo Nuevo México, las porciones más al oeste de Texas y territorios adyacentes a Chihuahua; las aguas pertenecientes a esta subregión vienen principalmente de deshielos de las montañas rocallosas del Colorado. La parte baja del Río Bravo abarca desde Fort Quitman hasta el Golfo de México donde desemboca el RBG, así como sus afluentes en



Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Nuevo México y Texas, (CILA & SRE, 1964), en las ultimas 3 décadas ambas subregiones han sufrido aumentos en población como en actividades industriales. (Bravo, et al., 2000).

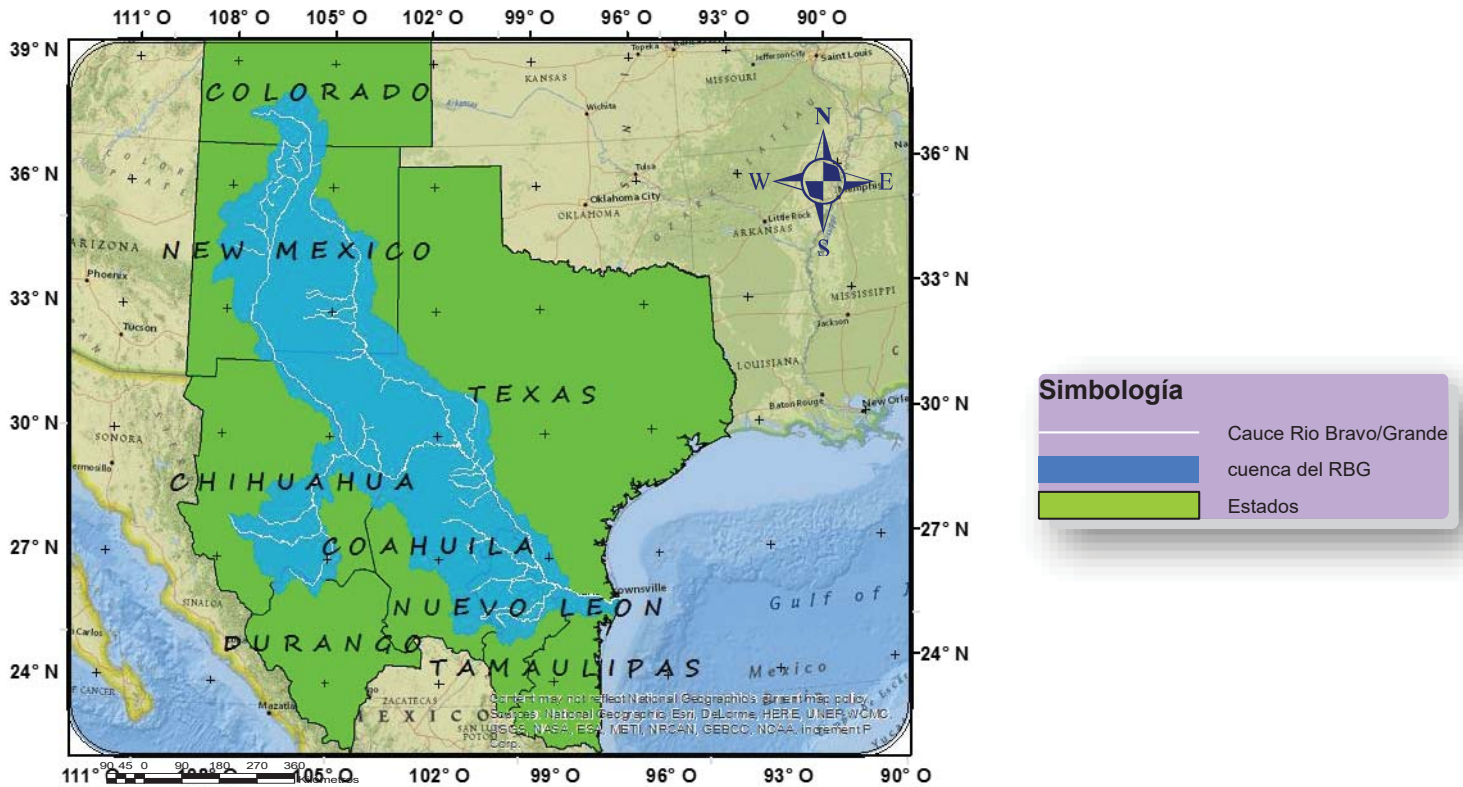


Figura 3-2. Cuenca del Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.

### 3.1.2 Región hidrológica administrativa RHA

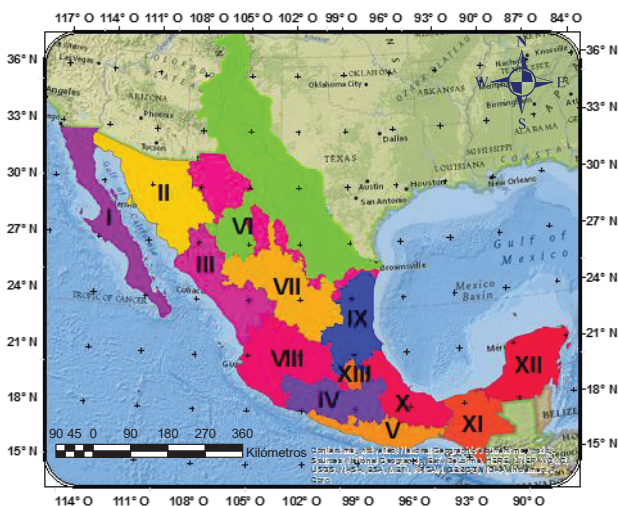
Las cuencas del país de México se encuentran organizadas en 37 Regiones Hidrológicas (RH) estas regiones Hidrológicas a su vez se agrupan en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), ver Tabla 3-1, donde la cuenca del Río bravo se encuentra principalmente en la región hidrológica número 24 (Río Bravo) e incluye parte de la 34 Cuencas cerradas del Norte y parcialmente las 25 San Fernando, 35 Mapimi y 37 El Salado, corresponde a la Región Hidrológica Administrativa numero VI, que corresponde al nombre de Río Bravo (RHA VI RB), se localiza al





norte del país, en la frontera con los Estados Unidos de América, esta región comprende en su totalidad al estado de Nuevo León y parte de los cuatro estados restantes que conforman esta cuenca por parte de México (Coahuila, Chihuahua, Durango y Tamaulipas), Ver Figura 3-3, (CONAGUA [A], 2012).

La región hidrológica VI, cuenta con el apoyo del consejo de cuenca del Río Bravo, que a su vez está integrado por diferentes representantes con un interés en la cuenca Río Bravo.



**Figura 3-3. Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA).**  
*Elaboración propia, datos de CONABIO.*

**Tabla 3-1. Región Hidrológica Administrativa (RHA). Elaboración propia, datos de (CONAGUA, 2010).**

Numero	región administrativa en México
I	Península de Baja California
II	Noroeste
III	Pacífico Norte
IV	Balsas
V	Pacífico Sur
VI	Río Bravo
VII	Cuencas Centrales del Norte
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico
IX	Golfo Norte
X	Golfo Centro
XI	Frontera Sur
XII	Península de Yucatán
XIII	Aguas del Valle de México

Esta región hidrológica actualmente sufre sobreexplotación de las cuencas que la conforman y va en aumento el crecimiento urbano e industrial, lo que empieza a causar cambios en su ecosistema por lo que se ve afectada hidrológicamente.



### *3.1.3 Hidrología*

---

Dentro de la cuenca RBG, la corriente principal de flujo es el Río Bravo que nace desde las montañas rocosas del San Juan en Colorado y desemboca en el Golfo de México, junto con sus tributarios dentro de los que se encuentran el Río Conejos en Colorado, los Ríos Chama y Jemes en Nuevo México, los ríos Pecos y Devils en Texas y los Ríos Salado y San Juan en Tamaulipas. Algunos tributarios de Coahuila son los Ríos San Diego, San Rodrigo y Escondido además del arroyo Las Vacas, estos contribuyen con aportaciones de agua menores al Río Conchos, el Río San Juan, el Río Florido y el Río Salado por lo que se les conoce a estos como los afluentes de mayor importancia para el RBG, todos ellos dentro del territorio nacional y el Río Pecos que pertenece a Estados Unidos. (CILA & SRE, 1964). El uso compartido de las aguas del Río Bravo está establecido por el Tratado de Aguas Internacionales de 1944 y el convenio de 1996 y en cuanto al balance de aguas subterráneas, podemos decir que de los 96 acuíferos identificados en la Región, se tienen 21 sobreexplotados. El volumen de recarga se estima en 5,082 millones de m<sup>3</sup>, y la extracción en 4,145 millones de m<sup>3</sup>. (CONAGUA, 2010), ver Figura 3-4.

El RBG es la principal fuente para abastecer las actividades rurales y urbanas de la cuenca, de igual forma sustenta una gran variedad de ecosistemas naturales por lo que millones de personas dependen directa o indirectamente del RBG, (Bustillo 2011, n.d.).

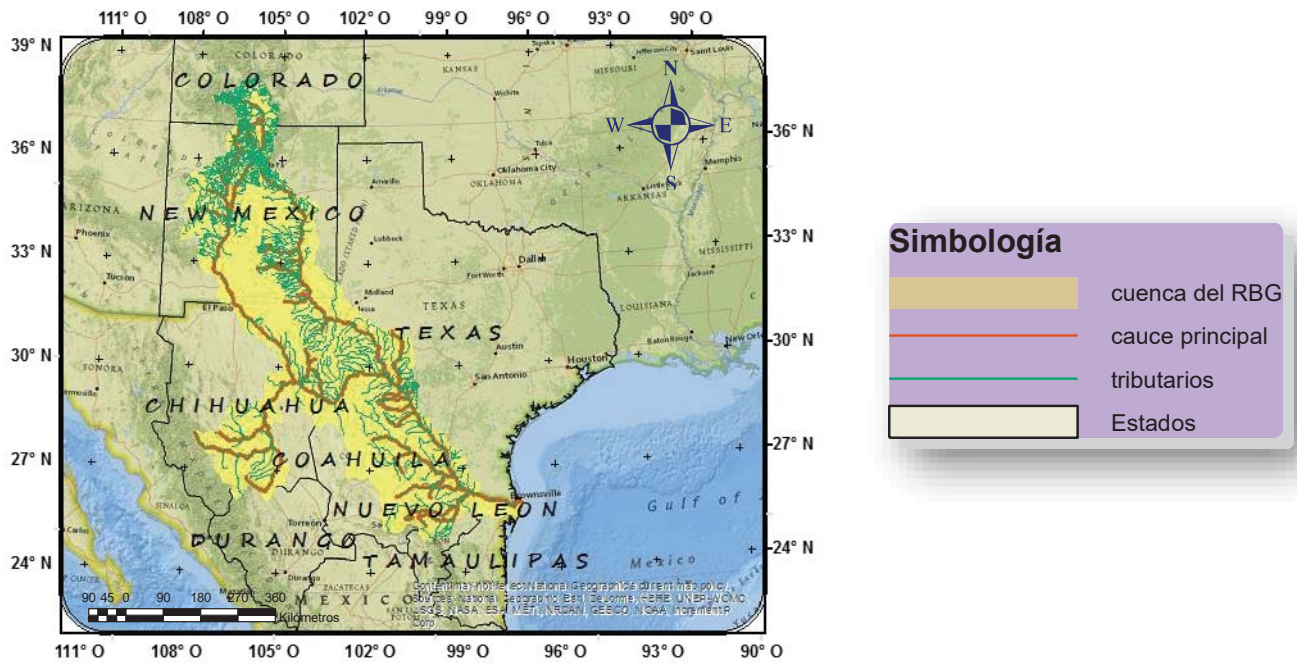


Figura 3-4. Hidrología de la Cuenca Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.

Antes de que fuera alterado el flujo del Río Bravo, se observaban dos tipos de flujo. El flujo mayor ocurría en primavera entre los meses de mayo y junio; éste se originaba gracias al deshielo de las montañas rocallosas de Colorado y el segundo pico se observaba en los meses de junio y septiembre, especialmente en el bajo Río Bravo, debido al caudal mucho mayor aportado por el régimen de lluvias de verano, (Hoth, et al., 2010). Cabe mencionar que se estima que el Río Conchos en condiciones naturales aporta el 66% del flujo total del RBG, por lo que se considera el afluente de mayor importancia para el río.



### *3.1.4 Uso de suelo y vegetación*

Los principales usos del suelo, son de vegetación natural tipo matorral xerófilo (56.2%), pastizal natural (15.5%), bosques (10.6%), pastizal inducido (9.2%), y agricultura de riego y temporal (4.5%); el restante 14.0% corresponde a otros usos. Los cultivos representan el 5% de la cobertura de la cuenca, (Hoth, et al., 2010), ver Figura 3-6.

Actualmente la cuenca se encuentra invadida por vegetación exótica, producto del desequilibrio ecológico que ha sufrido, entre las cuales se destaca la hidrila, el lirio acuático, el pino de sal y el carrizo; estas dos últimas son especies de origen asiático. Toda la vegetación que se localiza en los márgenes de los ríos se conoce como vegetación riparia, ver Figura 3-5.



*Pastizal en el Río Bravo/Grande, recuperado (wikipedia, n.d.)*

*Matorral en el Río Bravo/Grande recuperado (Nacional, n.d.)*

*Bosque en el Río Bravo/Grande recuperado (Valley, n.d.)*

**Figura 3-5. Vegetación riparia en la Cuenca Río Bravo/Grande**

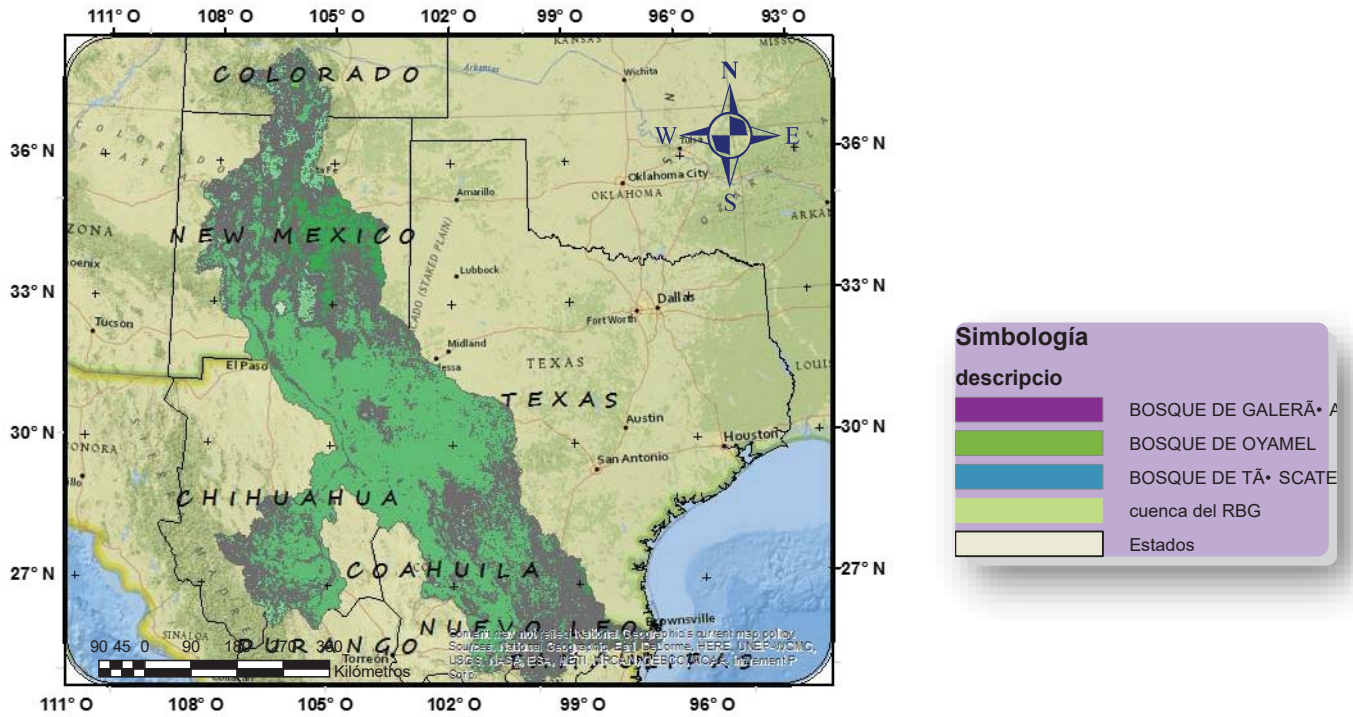


Figura 3-6. Uso de suelo y Vegetación en la Cuenca Río Bravo/Grande.

La mayoría de las zonas urbanas se concentran dentro de la célula de planeación en Nuevo León así, como en las células ribereñas en la margen derecha del Río Bravo. La desembocadura del río Bravo en el Golfo de México tiene una pequeña porción de playas en el estado de Tamaulipas.



### 3.1.5 Geomorfología

---

El río se divide en tres tramos distintivos, con base en sus características geológicas, fisiográficas, climáticas y bióticas (CILA, 1944).

- el tramo superior que se extiende desde la frontera de Nuevo México y se sitúa dentro de la provincia biótica de Chihuahua.
- el tramo medio o Sección del Bajo Cañón que se extiende desde La Linda hasta el sur de Ciudad Acuña/Del Río, se sitúa en una zona transicional entre tres provincias bióticas: la Chihuahuense al oeste, la Balconiana al este y la Tamaulipeca al sur.
- el tramo bajo o Sección Plana Costera que se extiende hasta el Golfo de México. Esta área abarca la provincia biótica Tamaulipeca.

La mayor parte del Bajo Río Bravo consiste de una amplia planicie, que se extiende desde el Golfo de México hasta las inmediaciones de las localidades de Reynosa, Tamaulipas, en donde alcanzan los 150 msnm. El río en su porción aguas arriba tiene un gradiente menor a la pendiente natural del terreno y su planicie de inundación está más de 30 m abajo que la adyacente más elevada. En la zona media, norte de Reynosa, se tiene una amplitud de 15 km. Se distinguen tres principales áreas, (CONAGUA, 2015), ver Figura 3-7.

- La zona montañosa con sierras de 70 a 275 m, formadas por depósitos del Plioceno y areniscas marinas del Mioceno. Aquí se encuentra la sierra de Pamoranés, ubicada al sur de la zona.
- La zona conformada por sedimentos no consolidados del Pleistoceno al Reciente que forman una llanura con poco relieve con alturas que oscilan entre los 5 y 70 m.
- La zona con extensas lagunas costeras con alturas que van de 0 a 5 m.

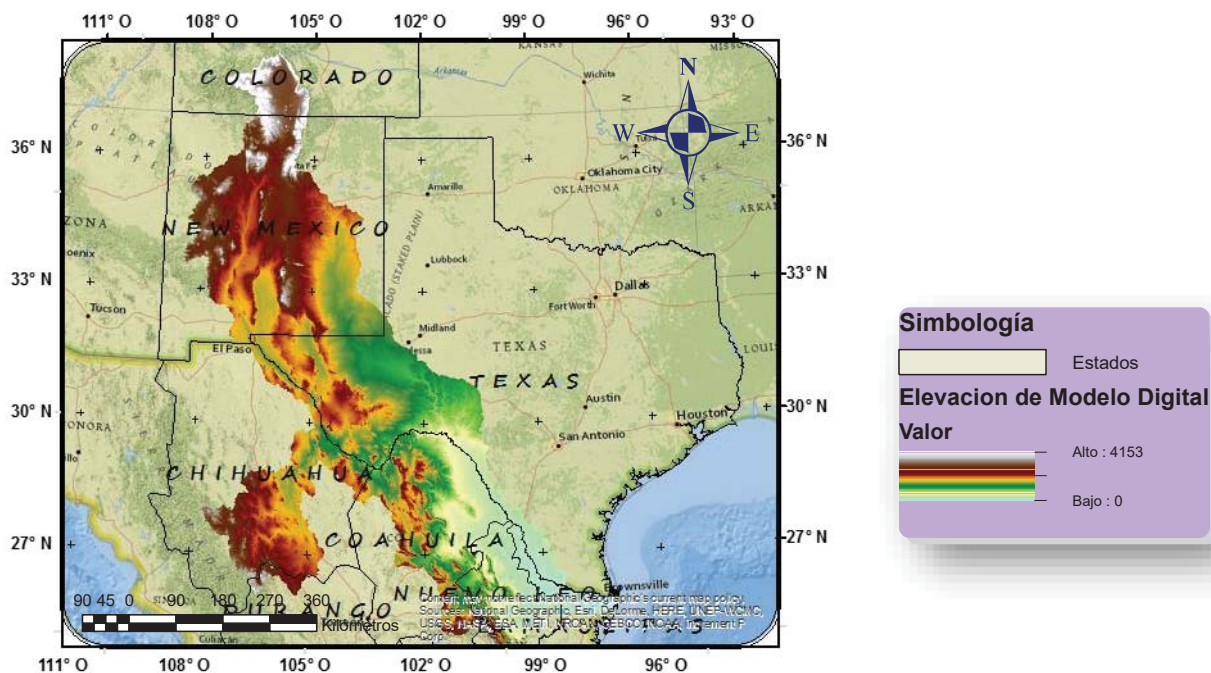


Figura 3-7. Geomorfología en el Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.

### 3.1.6 Precipitación

La precipitación de la cuenca del RBG es la siguiente, ver tabla Tabla 3-2, (CONAGUA, et al., 2013).

Tabla 3-2. Precipitación en la cuenca Río Bravo/ Grande.

ZONA	CANTIDAD
Precipitación media	420 mm
Zona Sureste	1100 mm
Zona más Baja del Río Bravo/Grande	800 mm
Franja central	260 mm – 400 mm

En la parte baja del Río Bravo se identifican precipitaciones irregulares que en promedio sobrepasan ligeramente los 700 mm anuales, dando lugar a condiciones fuertemente de sequía e inundaciones en algunas ocasiones. En la célula de planeación de Linares Nuevo León, se presenta la mayor precipitación media anual (808 mm) y la menor en Encinillas Chihuahua (308



mm). La evaporación supera los 1,800-2,000 mm anuales (INEGI, 2000). En términos generales el riego es indispensable para obtener rendimientos comercialmente competitivos en toda la región. La región se caracteriza por tener una alta variabilidad de precipitación de un año a otro, y se presentan en forma recurrente periodos prolongados de sequía. Se han identificado periodos muy secos en los años de 1952 al 1957 y de 1993 al 2002. El escurrimiento medio anual de agua superficial se estima en 9,970 Mm<sup>3</sup> /año (CONAGUA [C], 2012). Ver figura Figura 3-8.

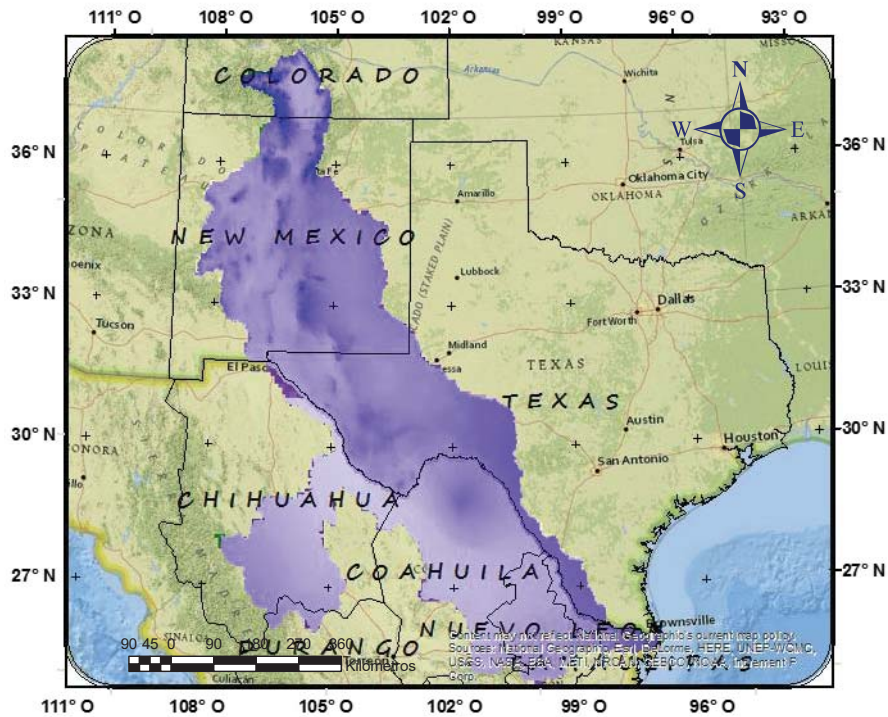


Figura 3-8. Precipitación en el Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.





### 3.1.7 Clima

Se han identificado 13 tipos diferentes de clima de acuerdo con la clasificación de Koppen, en la parte baja del Río Bravo; el clima se define como desértico tropical o subtropical, que van desde muy seco a cálido en la zona central, abarca el templado sub húmedo, en las sierras Tarahumara y al sur del estado de Nuevo León en general el clima del Río Bravo es caliente y árido volviéndose tropical en la parte sur; la temperatura media anual predominante en el 50% de la superficie es de 26° C, (CONAGUA [C], 2012), (CONAGUA, et al., 2013), ver Figura 3-9. En las regiones más áridas muchos de los arroyos tributarios son intermitentes, (Bravo, et al., 2000).

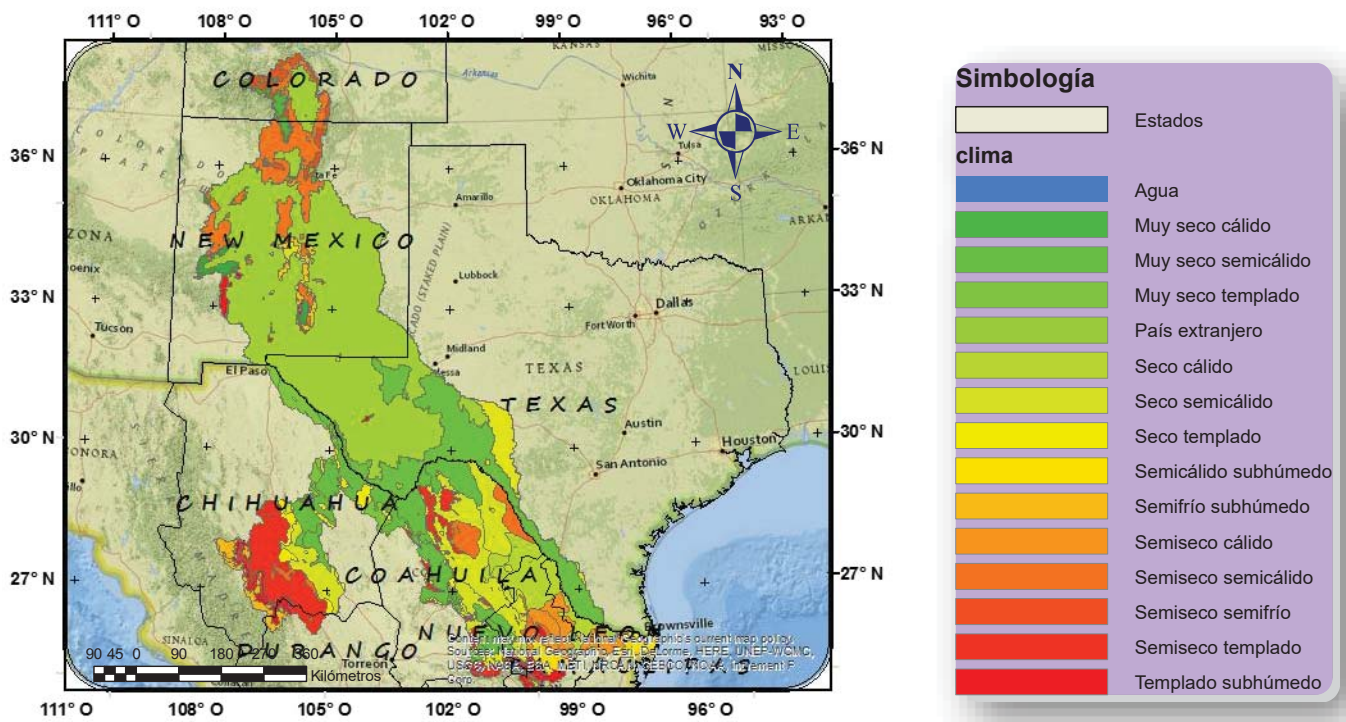


Figura 3-9. Clima en el Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de CONABIO.



### 3.1.8 Flora y Fauna

La Cuenca del RBG es considerada como una región globalmente importante por su biodiversidad de agua dulce. El Río Bravo contiene 121 diferentes especies de peces, 69 de las cuales sólo son encontradas en el Río Bravo y en ningún otro lugar del planeta. También contienen 3 áreas de apoyo a especies de aves endémicas, así como una alta biodiversidad de moluscos (WWF, 2016).

En sus primeros tramos, el río se abre paso entre bosques de abetos, álamos y pinos, pero en el sur comienza a observarse terrenos áridos, (Geoenciclopedia, 2016), ver Figura 3-10.



*Alamo, recuperado (Tapety, n.d.)*



*Pino, recuperado (Miguel, n.d.)*

**Figura 3-10. Flora del Río Bravo/Grande.**

Así mismo, la cuenca del RBG, es hogar de mamíferos como el murciélago amarillo (*Lasiurus ega*), el ratón de cactus (*Peromyscus eremicus*), el murciélago gigante de bonete (*Eumops perotis*), la mofeta moteada (*Spilogale gracilis*), el ratón tobillo blanco (*Peromyscus pectoralis*) y el murciélago cola de ratón (*Tadarida brasillensis*); reptiles como la culebra corredora de petatillos (*Drymobius margaritiferus*); aves como el cuclillo piquigualdo (*Coccyzus americanus*), el mosquero saucero (*Empidonax trailii*) y el gavián cangrejero negro (*Buteogallus anthracinus*); y escarabajos, termitas y grillos, entre otros animales, (Geoenciclopedia, 2016) , ver Figura 3-11.



*Murciélago amarillo recuperado (Flickriver, 2016)*



*Ratón de cactus recuperado (Planet, 2016)*



*Murciélago gigante de bonete recuperado (morcegos, 2016)*



*Mofeta moteada recuperado (ANONIMO[A], 2016)*



*Ratón tobillo blanco recuperado (ANONIMO[B], 2016)*



*Murciélago cola de ratón recuperado (pcman, 2016)*



*Culebra corredora de petatillos recuperado (naturalista, 2016)*



*Piquigualdo recuperado (Cantopajaros, 2016)*



*El mosquero saucero recuperado (avespr, 2016)*

**Figura 3-11. Fauna de la cuenca del Río Bravo/ Grande.**

Los peces del río son variados, posee unas 121 especies, 69 de ellas endémicas. Puede mencionarse a la carpa Chamizal (*Hybognathus amarus*), la carpita del Bravo (*Notropis jemezianus*), la carpita roja (*Cyprinella lutrensis*), el matalote chato (*Carpoides carpio*), la mojarra oreja azul (*Lepomis macrochirus*), el pez mosquito (*Gambusia affinis*), el bagre piltonte (*Pyloodictis olivaris*) y la carpita de El paso (*Notropis orca*). También hay moluscos de los géneros *Fontelicella* y *Tryonia*, y anfibios como la salamandra *Aneides hardii*, (Geoenciclopedia, 2016), ver Figura 3-12.



*Carpa chamizal recuperado*  
(naturalista, 2016)

*mojarra oreja azul recuperado*  
(naturalista, 2016)

*bagre piltonte recuperado* (USGS, 2016)

**Figura 3-12. Peces en la cuenca del Río Bravo/Grande.**

Las plantas más comunes en las riberas son las del género *Tamarix* y la caña *Arundinaria gigante*, que se están convirtiendo en especies invasoras. Asimismo, hay flora acuática del género *Carex*, jacintos de agua, tules (*Scirpus acutus*), juncos de esteras (*Typha latifolia*) y gramas saladas (*Distichlis spicata*). (Geoenciclopedia, 2016).

### *3.1.9 Actividad Socioeconómica*

Las primeras actividades económicas de la cuenca RBG se encuentran como sectores primarios actividades de pesca, agricultura, ganadería y minería con el 16% y el secundario lo conforma la industria con un 37% y el terciario lo integran servicios como el comercio y el turismo con el 47%, (CNA, 2003), ver Figura 3-13.

De acuerdo a CONAGUA en datos registrados en 2007, se observó que la cuenca del Río Bravo generaba la segunda mayor contribución al producto interno bruto (PIB) en México, esto gracias a la planta industrial. Se debe mencionar también que del agua del RBG depende la agricultura en la cuenca, y especialmente en la parte baja del Río Grande. Cerca de 800,000 hectáreas de cultivo son regadas con aguas del río Bravo, y una cantidad menor es utilizada por la ganadería. Después de estas dos actividades, la minería y la industria recreativa son las más importantes en la cuenca. (Geoenciclopedia, 2016).



Figura 3-13. Actividad económica del Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de INEGI.

### 3.1.10 Municipios y Población

En la cuenca del RBG por ambos lados de la frontera se localizan importantes zonas agrícolas, así como centros urbanos denominados pares de ciudades gemelas, dentro de los que destacan los valles Imperial y Mexicali en el Oeste, Valle del Paso y de Juárez en la porción central y Bajo Río Bravo en el extremo oriental. Por lo que respecta a las segundas, entre las principales figuran Tijuana-San Diego, Mexicali-Calexico, Juárez-El Paso, Laredo-Nuevo Laredo, Matamoros-Brownsville, (Bustillos, n.d.).

Actualmente 13 millones de personas habitan la cuenca del RBG y está presenta un rápido incremento poblacional, de la que el 93% de la población total actual es urbana y el 7% es considerado rural.

A través del tramo de Laredo - Nuevo Laredo hasta la desembocadura, el río constituye la principal fuente de agua potable para las comunidades tanto de México y Estados Unidos. A pesar de la economía de rápido crecimiento, la cuenca es una de las regiones más pobres de los Estados Unidos, donde muchos viven en condiciones de pobreza sin acceso a la corriente de agua. La cuenca se enfrenta a la escasez de agua per cápita, y para el año 2025 es probable que descienda a una mayor escasez de agua, (WWF, 2016).



La cuenca por el lado mexicano se encuentra integrada por 44 municipios, 31 en Coahuila de Zaragoza, 52 de Chihuahua, 51 en Nuevo León y 10 en Tamaulipas. (CONAGUA [C], 2012), donde sólo 6 de los 141 municipios tienen un alto grado de marginalidad; localizándose todos ellos en el estado de Chihuahua. (CONAGUA, 2010), ver Figura 3-14.

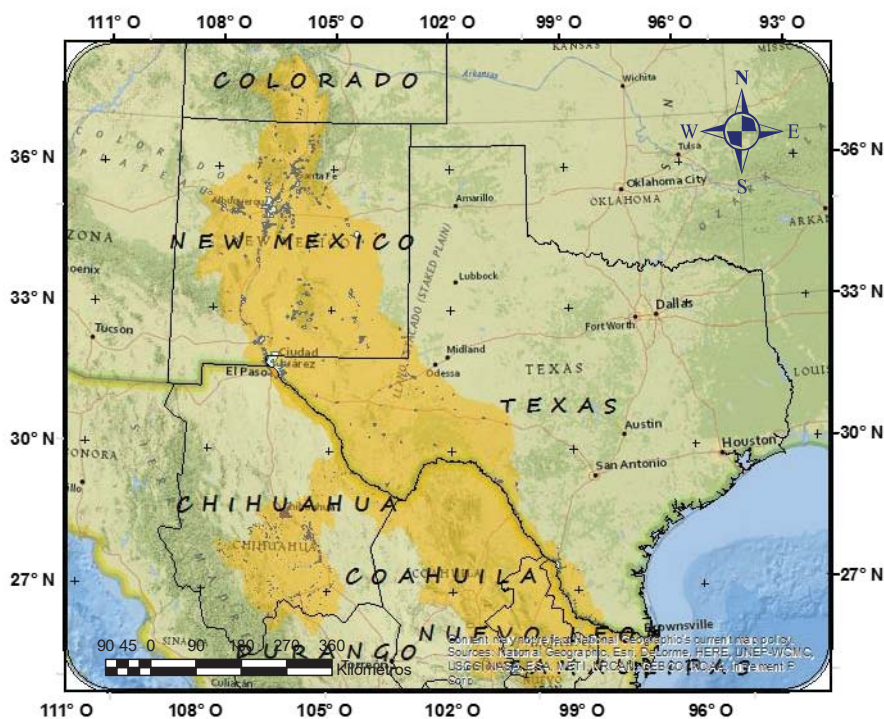


Figura 3-14. Población de la cuenca Río Bravo/Grande. Elaboración propia datos de CONABIO.



### 3.1.11 Estaciones Hidrométricas y Climatológicas

Dentro de la cuenca RBG se observan diferentes estaciones hidrométricas tanto a lo largo del cauce como en sus afluentes con la finalidad de registrar los volúmenes de agua que fluyen y son medidos durante un lapso de tiempo, estas estaciones son administradas por una institución encargada de monitorear dichas mediciones, en la parte de México se conoce como la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y en Estados Unidos como International Boundary and Water Commission (IBWC); así como, la United States Geological Survey (USGS), ver Figura 3-15.

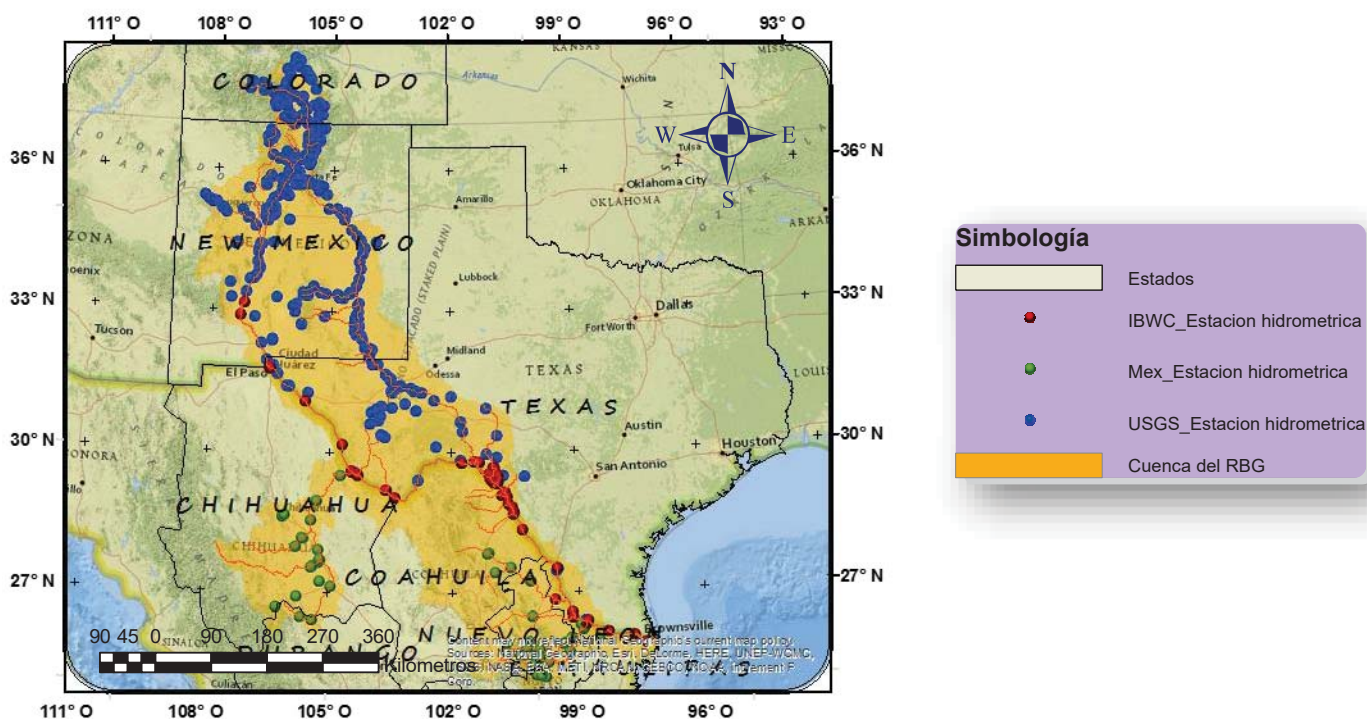


Figura 3-15. Estaciones hidrométricas dentro de la cuenca Río Bravo/Grande. Elaboración propia datos de CONABIO.



### 3.1.12 Infraestructura hídrica

#### 3.1.12.1 Presas

La construcción de presas desde los años 50 del siglo pasado, ha tenido un mayor auge en todo el mundo llegando a tener un gran impacto dentro la infraestructura hidráulica; México ocupa el 12 lugar con 537 presas construidas ocupando el 1.1% de presas construidas del total mundial de acuerdo a la Comisión Nacional de Presas, (Presas, 2000).

La cuenca del RBG tiene varias presas de almacenamiento por ambas partes de la frontera en las que se encuentran 35 grandes presas con una capacidad de al menos 18.5 Mm<sup>3</sup> cada una. Existen 22 grandes presas en Estados Unidos que cuentan con una capacidad total de 7509.7 Mm<sup>3</sup> (CILA & SRE, 1964), y en la parte de México se tienen 317 presas con una capacidad en conjunto de 22759 Mm<sup>3</sup> teniendo Chihuahua 152 derivadoras y 9 almacenadoras, mientras que Tamaulipas tiene 1 derivadora y 2 almacenadoras, (CONAGUA, et al., 2013), de las cuales 13 son de mayor importancia con una capacidad de 7573 Mm<sup>3</sup>.

Del total de las presas dentro de la cuenca, siete tienen capacidades superiores a 1000 Mm<sup>3</sup> las cuales se indican en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3. Presas más importantes en la Cuenca Río Bravo/Grande (CILA & SRE, 1964).**

Nombre	Río	Estado	Capacidad Mm3
Amistad	Río Bravo	Texas-Coahuila	3887
Falcón	Río Bravo	Texas-Tamaulipas	3273
La Boquilla	Conchos	Chihuahua	2903
Elephant Butte	Río Bravo	Nuevo México	2547
Abiquiu	Chama	Nuevo México	1481
Venustiano Carranza	Salado	Coahuila	1384
El Cuchillo	San Juan	Nuevo León	1123

Los tres principales embalses presentes en la corriente principal del río Bravo son: Elephant Butte, Nuevo México, y las presas Internacional La Amistad y Falcón, ambas entre Texas y México, en los estados de Coahuila y Tamaulipas, respectivamente, (Bravo, et al., 2000).





Las presas internacionales Amistad y Falcón se utilizan para almacenar y administrar el agua para Estados Unidos y México; cada país tiene su propia cuenta de almacenamiento en cada depósito. De la capacidad de la presa Amistad el 56,2% pertenece a los EE.UU. y el 43,8% pertenece a México y de la presa Falcón el 58,6% pertenece a los Estados Unidos y el 41,4% pertenece a México. Los ciclos de los tratados mencionados anteriormente pueden caducar en menos de cinco años, si el almacenamiento de EE.UU. en ambas presas se llena de agua perteneciente a los Estados Unidos, ver Figura 3-16.

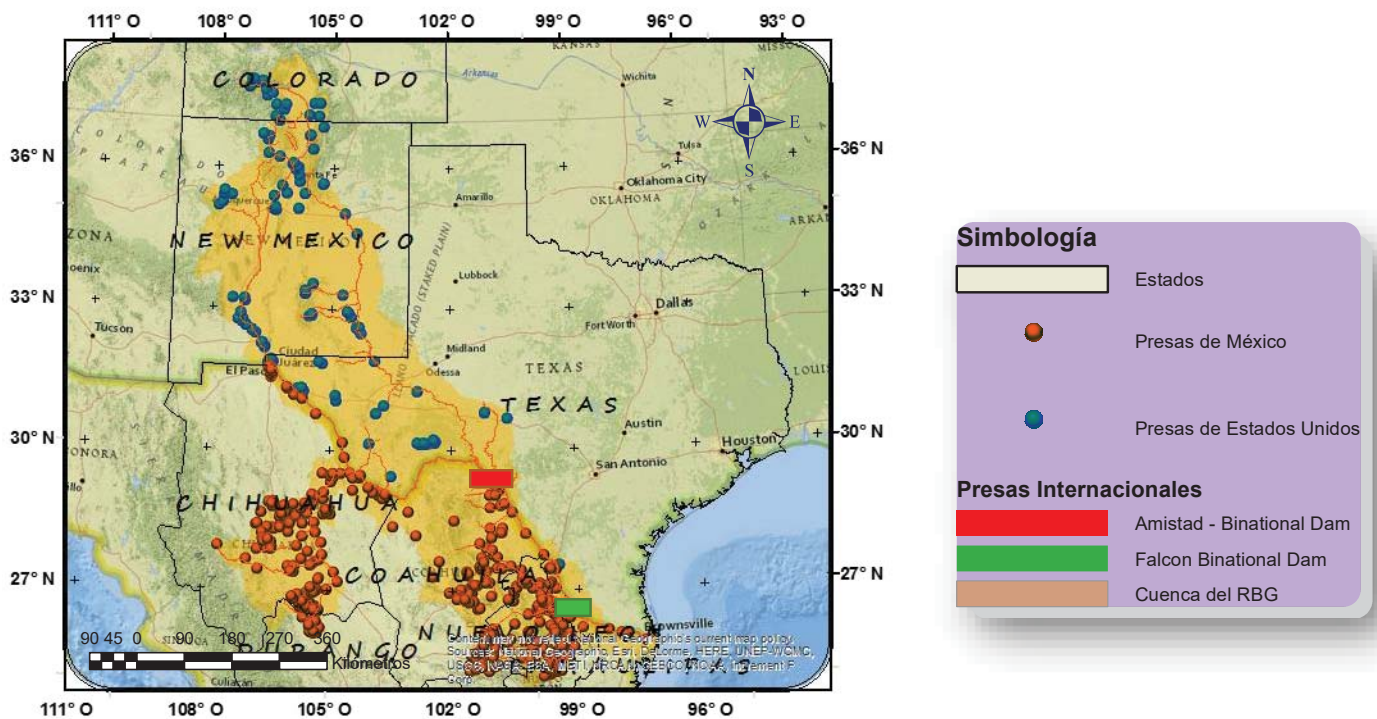


Figura 3-16. Presas internacionales Amistad y Falcón. Elaboración propia, datos de CONABIO.



## 3.2 Tratados internacionales

Existen dos tratados de agua firmados entre México y Estados Unidos, ambos son considerados de gran importancia para ambos países: la Convención de 1906 y el Tratado de 1944.

### 3.2.1 Convención de 1906

---

Fue firmada el 21 de Mayo de 1906, estableció la asignación de agua del RBG desde el Paso/valle de Ciudad Juárez a Fort Quitman, Texas. De acuerdo al convenio, el país de Estados Unidos entregará un total de  $74.006 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año (60,000 acre-ft/año) a México desde la presa Elephant Butte. Esta agua es usada para suministrar el distrito de riego mexicano DR-009 Valle de Juárez. Para los Estados Unidos el agua desde la presa Elephant Butten es asignada de acuerdo al tratado RBG al distrito de riego Elephant Butten en Nuevo México y al agua del condado de El Paso agua mejorada distrito # 1 en Texas, con un derecho de agua de  $542 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año (439,433 acre-ft) y  $480 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año (388,882 acre-ft) respectivamente, (Sandoval S., 2011).

### 3.2.2 Tratado de 1944

---

Es conocido como el Tratado de Aguas Internacionales de 1944, regula el uso y aprovechamiento de las aguas internacionales de los ríos Bravo, Colorado y Tijuana entre México y Estados Unidos; también incluye las reglas para calcular los plazos en que se hace exigible el pago de adeudos. Se firmó el 3 de Febrero de 1944, este tratado está encargado de regular el uso y aprovechamiento de las aguas internacionales estableciendo que México asigna agua a Estados Unidos del Río Bravo mientras que Estados Unidos asigna un cantidad de agua a México del Río Colorado.



El artículo 4, apartado B) de este Tratado establece que México tiene que asignar como mínimo a Estados Unidos  $431.7 \text{ Mm}^3$  en promedio en ciclos de 5 años de los afluentes del Río Bravo, donde a Estados Unidos le pertenece:

- La totalidad de las aguas que lleguen a la corriente principal del RBG procedentes de los ríos Pecos, Devils, manantial Goodenough y arroyos Alamito, Terlingua, San Felipe y Pinto
- La mitad del escurrimiento del cauce principal del río Bravo /Grande abajo de la presa inferior principal internacional de almacenamiento, siempre que dicho escurrimiento no esté asignado expresamente en este Tratado a alguno de los dos países
- Una tercera parte del agua que llegue a la corriente principal del RBG procedente de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo las Vacas; tercera parte que no será menor en conjunto, en promedio y en ciclos de cinco años consecutivos, de  $431\,721\,000 \text{ m}^3$  ( $350\,000$  acres-ft) anuales.
- Los Estados Unidos no adquirirán ningún derecho por el uso de las aguas de los afluentes mencionados en este inciso en exceso de los citados  $431\,721\,000 \text{ m}^3$  ( $350\,000$  acres-ft) salvo el derecho de usar de la tercera parte del escurrimiento que llegue al río Bravo /Grande de dichos afluentes, aunque ella exceda del volumen aludido
- La mitad de cualquier otro escurrimiento en el cauce principal del río Bravo/Grande, no asignado específicamente en este artículo, y la mitad de las aportaciones de todos los afluentes no aforados que son aquellos no denominados en este artículo entre Fort Quitman y la presa inferior principal internacional.

El artículo 10 de este Tratado establece que Estados Unidos tiene que asignar como mínimo a México  $1850 \text{ Mm}^3$  anuales y un máximo de  $2097 \text{ Mm}^3$  anuales de los afluentes del Río Colorado, no importando la fuente de donde provenga el agua mientras pertenezcan al Río Colorado se asigna a México:

- Un volumen garantizado de  $1\,850\,234\,000 \text{ m}^3$  ( $1\,500\,000$  acres-ft) cada año, que se entregará de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 15 de este Tratado



- Cualquier otro volumen que llegue a los puntos mexicanos de derivación; en la inteligencia de que cuando a juicio de la Sección de los Estados Unidos, exista en el Río Colorado agua en exceso de la necesaria para abastecer los consumos en los Estados Unidos y el volumen garantizado anualmente a México de 1 850 234 000 m<sup>3</sup> (1 500 000 acres-ft), los Estados Unidos se obligan a entregar a México, según lo establecido en el artículo 15 de este Tratado, cantidades adicionales de agua del sistema del Río Colorado hasta por un volumen total que no exceda de 2 096 931 000 m<sup>3</sup> (1 700 000 acres-ft) anuales. México no adquirirá ningún derecho, fuera del que le confiere este inciso, por el uso de las aguas del sistema del Río Colorado para cualquier fin, en exceso de 1 850 234 000 m<sup>3</sup> (1 500 000 acres -ft) anuales.

En síntesis, México tiene un compromiso para dejar escurrir 432 Mm<sup>3</sup> anuales de agua a Estados Unidos del río Bravo que provienen de los 6 tributarios mencionados en el tratado (la tercera parte). En contraparte, Estados Unidos tiene el compromiso de dejar escurrir 1850 Mm<sup>3</sup> anuales de agua a México del río Colorado de la Presa Imperial en California, (Rendon P., 2011)



# CAPÍTULO 4 RESULTADOS DEL CAUDAL NATURAL RÍO BRAVO/GRANDE (RBG)

Este capítulo presenta los resultados del objetivo uno de la presente tesis, donde se cuantifica el caudal natural, por lo que se remueve la alteración antropogénica construida en el RBG como lo son (derivaciones y cambios de almacenamientos).

## 4.1 Marco de estudio

### 4.1.1 Consideraciones

---

Se consideraron las entradas de agua existentes al río RBG durante el periodo de 1901 a 1913; sin embargo, el estudio se realizó a partir de la confluencia del Río Conchos ésto debido a que se trabajó en conjunto con la Universidad Estatal de Utah (Utah State University), quienes colaboraron con un estudio del caudal natural desde el Colorado, lugar donde nace el RBG hasta aguas arriba de la confluencia con el Río Conchos en el Valle de Ojinaga / Presidio, por tal razón la tesis de investigación se enfocó únicamente en el cálculo del caudal natural a partir del Río Conchos hasta el Golfo de México, donde se encuentra la desembocadura, sitio en el cual llegará la suma de ambos caudales naturales, dando como resultado el caudal natural del RBG, cabe mencionar que el análisis se realizó de forma diaria.



## 4.2 Volumen de control

En la Figura 4-1 se observa cómo se dividió el RBG en diferentes volúmenes de control con la finalidad de determinar el caudal natural, por lo que se observan las microcuencas que se consideraron para determinar el caudal natural en los afluentes, así, como los puntos en los que se determinó el caudal natural dentro del cauce principal.

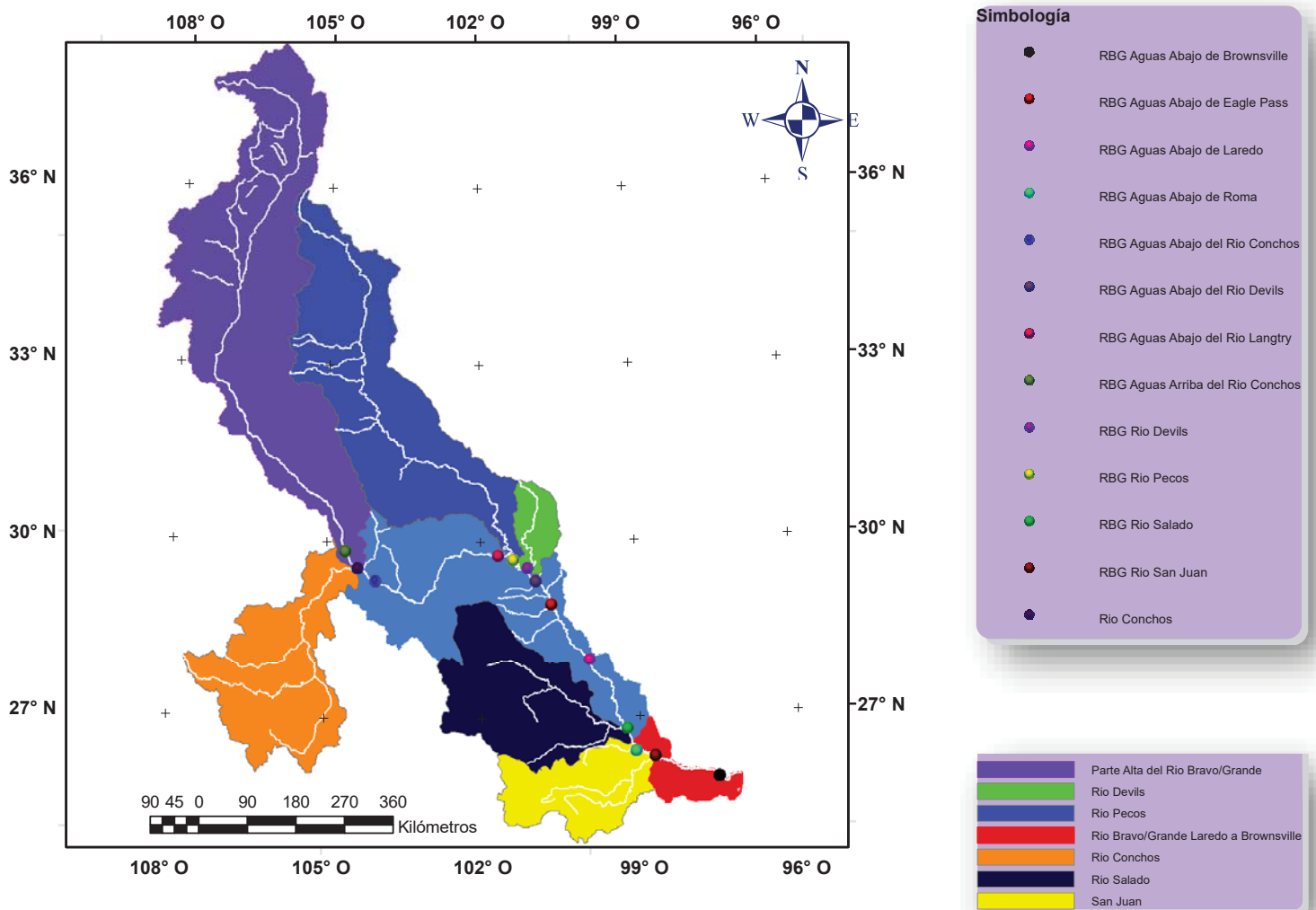
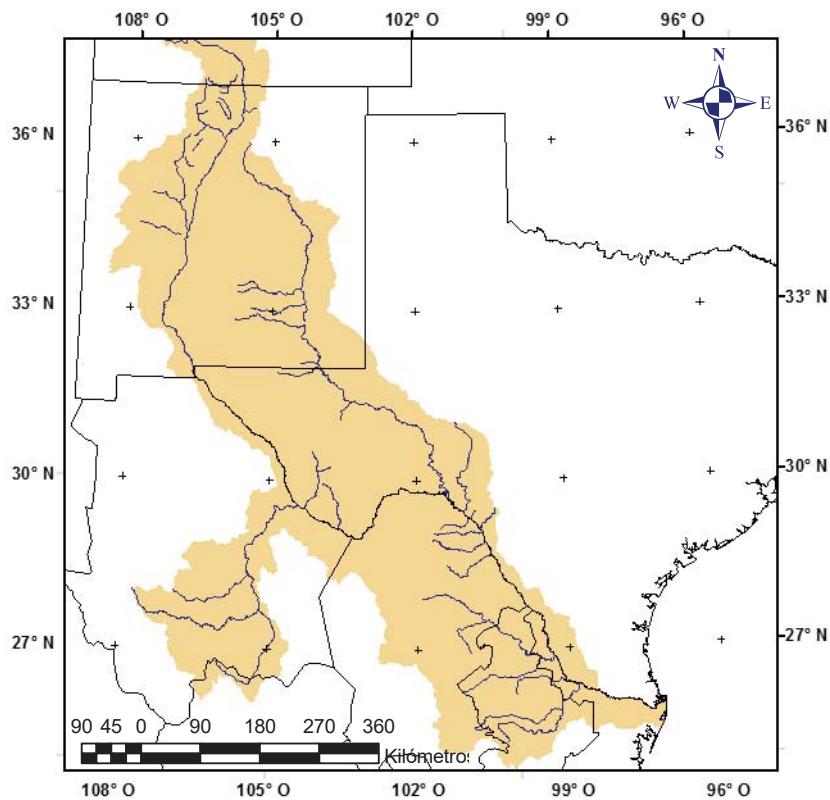


Figura 4-1. Volúmenes de control analizados. Elaboración propia, datos CONABIO.



### 4.3 Determinación del caudal natural del Río Bravo

En el RBG desembocan ríos de la parte de México y de Estados Unidos y es de suma importancia para ambos países por a su aportación en usos agrícolas, industrial y en suministro en agua potable. La determinación del caudal natural permite mostrar la pérdida de agua, que ha sufrido el río debido a impactos antropogénicos en su caudal como en sus afluentes, ver Figura 4-2, así mismo, ayudara a conocer como actuaba el régimen del flujo del caudal natural hacia los ecosistemas acuáticos y ribereños y con base a este régimen de flujo se puedan determinar proyectos de restauración del caudal del RBG.



*Figura 4-2. Afluentes considerados para la determinación del caudal natural del Río Bravo/Grande. Elaboración propia, datos de USGS.*



## 4.4 Afluentes

Se consideraron los mencionados en la Tabla 4-1, se debe mencionar que estos afluentes no contaban con  $Q_t^{Upstream}$ , por lo que la determinación del caudal natural se basó en la Ecuación 2-4 la cual se adaptó a las características de cada afluente.

**Tabla 4-1. Afluentes considerados para el estudio. Elaboración propia.**

Afluentes que desembocan al Río Bravo/Grande
Río Conchos
Río Pecos
Río Devils
Río Salado
Río San Juan

En la Tabla 4-2 se muestra el resumen estadístico de los afluentes del RBG, promedio (media aritmética), desviación estándar, percentiles 75(0.75), 50 (media) y 25(0.25).

**Tabla 4-2. Resumen estadístico de los afluentes**

	CAUDAL NATURAL (1901-1913)				
	PARAMETRICAS (Mm3)		NO PARAMETRICAS (Mm3)		
	PROMEDIO	DESV ESTANDAR	P(0.75)	P(0.5)	P(0.25)
<b>Afluentes</b>					
<i>Río Conchos</i>	2045	868	2304	2006	1214
<i>Río Pecos</i>	541	289	631	439	370
<i>Río Devils</i>	492	112	547	478	415
<i>Río Salado</i>	1116	491	1358	1194	699
<i>Río San Juan</i>	1075	905	1064	653	555





### 4.4.1 Río Conchos

---

El Río Conchos se encuentra ubicado en el Estado de Chihuahua y es el principal afluente por la parte de México hacia el RBG. Cuenta con embalses para abastecer la demanda de agua para la industria, la agricultura y los municipios, estas aguas se utilizan de la misma forma para Texas y en los estados fronterizos mexicanos de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas al momento de unirse con las aguas del RBG, el 90% del uso del agua del Río Conchos representa el riego agrícola, (Mary E. Kelly, 2001).

Para la determinación del caudal natural en el Río Conchos, primero se buscaron datos de caudal regulado medidos en la estación hidrométrica ubicada en el punto de drenaje del Río Conchos hacia el RBG, notándose que no contaba con registros medidos en el punto de drenaje, por lo que se aplicó la Ecuación 2-1 y se realizó la diferencia de los registros en las estaciones hidrométricas que se tenía sobre el RBG, considerando como aguas de salida la estación *Rio Grande Below Rio Conchos Near Presidio* y como agua de entrada la estación *Rio Grande Above Rio Conchos Near Presidio*, dando como resultado el caudal regulado en el punto de drenaje del Río Conchos, Anexo 1.

Posteriormente se hizo la comparación de los datos obtenidos respecto a los estimados por los ingenieros Eduardo Cravioto y Robert L. Lowry en Mayo de 1944, Anexo 2, los cuales resultaron ser iguales, se hace mención que para el año 1954 se abrió la estación hidrométrica *Rio Conchos Near Ojinaga; Chihuahua*, la cual registra el caudal regulado del Río Conchos pero debido a que este estudio se realizó hasta 1913 no se utilizaron datos de esta estación.



### 4.4.1.1 Derivaciones

Las derivaciones del río consideradas fueron del tipo agrícola y se basó en los distritos de riego (DR) Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090), Delicias (DR-005) y Río Florido (DR-103), consideradas también en el estudio de Cravioto y Lowry (1944) para el periodo de 1900-1943; cabe mencionar que la metodología para obtener el uso consuntivo total fue la misma empleada en dicho estudio y al determinar el uso consuntivo total se realizaron los cálculos en el periodo de 1900-1943 con la finalidad de comparar los resultados.

En México se usan fundamentalmente dos métodos para el cálculo del uso consuntivo: el de Thorntwaite y el de Blaney-Criddle. El primero sólo considera la temperatura media mensual y la latitud y arroja resultados estimativos que pueden usarse únicamente en estudios preliminares o de gran visión.

Utilizando el Método de Thorntwaite se calculó el uso consuntivo total basado en los registros de temperatura mensual, donde el distrito de riego Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090) contaba con datos completos desde 1900-1943; sin embargo, Delicias (DR-005) contaba con registros a partir de 1935 y Río Florido (DR-103) desde 1948, por lo que se realizó una correlación para ver el coeficiente de correlación entre los datos a lo que se observó que existía un ajuste adecuado, por lo que se aplicó una regresión lineal de Delicias (DR-005) con Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090) y del Río Florido (DR-103) con Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090), con la finalidad de obtener los registros faltantes de las (DR 005 ) y (DR 103), Anexo 3. Ya completos los registros se obtuvo la temperatura media ( $T_j$ ) sumando los valores de la temperatura y dividiéndolos en el número de años considerados para el cálculo, para este caso se dividieron entre 44, ver Tabla 4-3.

**Tabla 4-3. Valores de  $T_j$  para los distritos de riego. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$T_j$											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ojinaga (DR-090)	3.1	4.7	8.0	13.5	17.9	21.2	20.9	20.1	17.7	12.8	6.9	3.4
Delicias (DR-005)	3.7	5.9	9.0	13.2	18.3	22.0	21.5	20.8	18.3	13.4	7.6	4.2
Florido (DR-103)	10.7	13.6	17.2	21.7	26.2	30.1	30.2	29.7	27.1	22.0	15.2	10.8



Los datos de ( $T_j$ ) se sustituyeron en la Ecuación 2-11 para calcular  $i_j$  obteniendo la Tabla 4-4.

**Tabla 4-4. Valores de  $i_j$  para los distritos de riego. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$i_j$												I
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	
Ojinaga (DR-090)	3.16	4.56	6.48	9.25	12.26	15.14	15.20	14.88	12.90	9.45	5.36	3.20	111.83
Delicias (DR-005)	0.63	1.29	2.43	4.33	7.10	9.43	9.11	8.69	7.12	4.46	1.88	0.76	57.25
Florido (DR-103)	0.49	0.92	2.03	4.48	6.91	8.94	8.72	8.257	6.77	4.14	1.63	0.55	53.82

Aplicando la Ecuación 2-10 se determinó la constante  $I$  del Método de Thornthwaite como se muestra en Tabla 4-4, dando una  $I=111.83$  correspondiente a DR-090, DR-005 obtuvo una  $I=57.25$  y por ultimo DR-103 una  $I=53.82$ ; estos valores se sustituyeron en la Ecuación 2-12 para determinar la constante  $a$ . arrojando para Ojinaga una  $a=2.47$ , para Delicias una  $a=1.39$  y para Florido una  $a =53.82$ .

Posteriormente se identificó la latitud donde se ubica cada distrito de riego, como resultado se tiene (DR-090) con latitud de 29.56, (DR-005) con 28.19 y (DR-103) con 27.14, este dato se utilizó para calcular la constante  $Ka$  por medio de una interpolación con los datos de la Tabla 4-5, obteniendo la Tabla 4-6 con el valor de la constante  $Ka$  de cada DR.

**Tabla 4-5. Valores de  $Ka$ . Elaboración propia, datos de (Aparicio, 2001).**

Latitud grados	VALORES DE $Ka$												
	mes												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01	
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.93	0.91	
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88	
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85	
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81	
45	0.8	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7	



**Tabla 4-6. Valores de  $K_a$  para los distritos de riego. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$K_a$												
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ojinaga (DR-090)	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88	
Delicias (DR-005)	0.91	0.88	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89	
Florida (DR-103)	0.91	0.88	1.03	1.07	1.17	1.15	1.18	1.13	1.03	0.99	0.90	0.89	

Al contar con todos los datos anteriores, se utilizó la Ecuación 2-9 obteniendo el uso consuntivo ( $U_j$ ) total mensual en cm de cada distrito de riego; en las Tabla 4-7, Tabla 4-8 y Tabla 4-9 se muestra un resumen de los datos obtenidos en cada distrito de riego.

**Tabla 4-7. Uso consuntivo total Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090). Elaboración propia.**

Mes	Distrito de Riego Ojinaga (DR-090)												$U_j$ anual cm	Cravioto $U_j$ anual cm	Factor de ajuste
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic			
$T_j$	10.68	13.62	17.17	21.74	26.17	30.09	30.17	29.75	27.08	22.04	15.16	10.78			
$i_j$	3.16	4.56	6.48	9.25	12.26	15.14	15.20	14.88	12.90	9.45	5.36	3.20			
$I$	111.83														
$a$	2.47														
$K_a$	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88			
$U_j$ mensual	1.29	2.35	4.03	8.53	14.14	21.80	21.76	21.54	16.24	8.83	3.33	1.30	125.13	116.00	0.93
$U_j$ mensual ajustado	1.19	2.18	3.73	7.91	13.11	20.21	20.17	19.97	15.05	8.18	3.09	1.21	116.06	116.00	

**Tabla 4-8. Uso consuntivo total Delicias (DR-005). Elaboración propia.**

Mes	Distrito de Riego Delicias (DR-005)												$U_j$ anual cm	Cravioto $U_j$ anual cm	Factor de ajuste
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic			
$T_j$	3.69	5.90	9.03	13.17	18.25	22.02	21.52	20.85	18.28	13.42	7.59	4.17			
$i_j$	0.63	1.29	2.45	4.33	7.10	9.43	9.11	8.69	7.12	4.46	1.88	0.76			
$I$	57.25														
$a$	1.39														
$K_a$	0.91	0.88	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89			
$U_j$ mensual	0.79	1.46	3.11	5.48	9.40	12.07	12.00	10.95	8.27	5.14	2.12	0.91	71.71	104.00	1.45
$U_j$ mensual ajustado	1.15	2.12	4.51	7.94	13.63	17.51	17.40	15.88	11.99	7.46	3.08	1.32	104.21	104.00	



**Tabla 4-9. Uso consuntivo total Río Florido (DR-103). Elaboración propia.**

Mes	Distrito de Riego Florido (DR-103)												$U_{j\text{ anual}}$ cm	Cravioto $U_{j\text{ anual}}$ cm	Factor de escala
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic			
$T_j$	3.1	4.7	8	13.5	17.9	21.2	20.9	20.1	17.7	12.8	6.9	3.4			
$i_j$	0.49	0.9	2	4.48	6.91	8.94	8.72	8.25	6.77	4.14	1.6	0.6			
$I$	53.8														
$a$	1.34														
$K_a$	0.91	0.9	1	1.07	1.17	1.15	1.18	1.13	1.03	0.99	0.9	0.9			
$U_{j\text{ mensual}}$	0.7	1.2	2.8	5.84	9.33	11.6	11.6	10.6	8.07	5.01	2	0.8	69.45	91	1.31
$U_{j\text{ mensual ajustado}}$	0.92	1.55	3.65	7.65	12.22	15.16	15.22	13.86	10.57	6.57	2.64	1.00	91.11	91	

En la Tabla 4-7 se observa que el  $U_{j\text{ anual}}$  calculado para el Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090), corresponde a 125.13 cm, el cual no se iguala al estimado por Cravioto y Lowry (1944) de 116 cm, lo mismo sucedió con Delicias donde  $U_{j\text{ anual}}$  fue de 71.71 cm contra 104 cm y Río Florido con un  $U_{j\text{ anual}}$  de 69.45 cm contra 91 cm, como se observa en la Tabla 4-8 y Tabla 4-19 respectivamente, debido a ésto se calibraron los datos obtenidos, multiplicando el  $U_{j\text{ anual}}$  obtenido en cada distrito por un factor de escala calculado de la división entre del registro de Cravioto y Lowry (1944), con respecto al calculado en este estudio, al realizar este ajuste los datos se igualaron.

El uso consuntivo total calculado anteriormente se basa en la temperatura media contemplando todos los registros obtenidos para cada mes y al final arroja solo un  $U_{j\text{ anual}}$ , por lo que se realizó una serie de tiempo para obtener el  $U_{j\text{ anual}}$  por cada año de registro, por lo que en la Ecuación 2-9 se sustituyo  $T_j$  por el valor de la temperatura registradó en cada mes Anexo 3, obteniendo los resultados que presenta el Anexo 4.

Sin embargo, para este estudio se necesitaron datos diarios del uso consuntivo total desde la mitad de un mes al otro, para lo cual se usó la Ecuación 2-13 para determinar los valores de forma diaria; por consiguiente se calculó la pendiente, ver Anexo 5, datos que se sustituyeron en la Ecuación 2-13 junto con el punto intercepto en el eje de las ordenadas y la variable independiente



$x$  interceptado, obteniendo así el uso consuntivo total diario Anexo 6, para corroborar que los datos obtenidos diarios eran correctos se sacó el promedio anual y se comparó con el valor estimado por Cravioto y Lowry (1944), haciendo ésto se vio que los datos coincidían, por lo que la estimación del uso consuntivo total diaria se consideró correcta.

El uso consuntivo neto se estimó sustrayendo del uso consuntivo total diario la precipitación diaria, esta diferencia indica la lámina de agua extraída del río para la irrigación. Debido a esto se descargaron los datos de precipitación diaria de los distritos de riego, para el distrito de riego Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090), se encontraron registros a partir de 1990, Delicias (DR-005) desde 1934 y Río Florido (DR-103) desde 1947, los cuales venían incompletos; por lo que se completaron con datos de precipitación de la misma estación considerando el valor del uso consuntivo total esto para cada DR. Teniendo registros completos de precipitación diaria se realizó la diferencia, posteriormente se sacó el promedio anual del uso consuntivo neto diario para poderlo comparar con el estimado por (Cravioto y Lowry, 1944), ver Anexo 7 y Tabla 4-10.

**Tabla 4-10. Comparación de uso consuntivo neto**

<i>Uso consuntivo neto</i>		
<i>Distrito de Riego</i>	<i>Calculado cm</i>	<i>Cravioto y Lowry (1944) cm</i>
<i>Bajo Río Conchos Ojinaga</i>	100	100
<i>Delicias</i>	96	77
<i>Florido</i>	81	57

Finalmente, el uso consuntivo neto diario se multiplicó por el área de riego Tabla 4-11, para obtener la derivación de riego que corresponde a la cantidad de agua extraída del río.



**Tabla 4-11. Área considerada para la derivación. Elaboración propia, datos de Cravioto y Lowry (1944).**

<i>Área considerada para riego</i>	
<i>Distrito de Riego</i>	<i>Área de riego hectáreas</i>
<i>Bajo Río Conchos Ojinaga</i>	17239
<i>Delicias</i>	43300
<i>Florado</i>	13250

### 4.4.1.2 Retornos

Las derivaciones agrícolas tienen un porcentaje de retorno del agua que se extrae para el riego, una parte del agua la consume la vegetación, la cual después se evapora (uso consuntivo) y otra parte no logra absorber la vegetación y escurre nuevamente al caudal o en su defecto se infiltra. Para este proyecto se consideró un retorno del 33% para todo el Río Conchos, por lo que se sumaron las derivaciones obtenidas de los tres distritos de riego y al final el valor obtenido se multiplicó por .33 correspondiente al (33%) porcentaje estimado debido a la eficiencia en irrigación por surco, (Burt, C. & Styles, S, 2000) , lo que arrojó el retorno total para el Río Conchos. Para determinar el caudal natural del Río Conchos, se debe mencionar que los  $IF_t$  no fueron considerados debido a que no existen datos de caudal aguas arriba ( $Q_t^{Upstream}$ ). Por lo tanto de la Ecuación 2-4 sólo se consideró: el caudal aguas abajo  $Q_t^{downstream}$ , derivaciones [ $Diversión_t$ ] y los retornos [ $Returns_t$ ], debido que para el periodo de 1901-1913 no había presencia de presas, se despreció el cambio de almacenamiento y la evaporación como no hay  $IF_t$ , se despreciaron las ganancias y las pérdidas y no se consideraron las exportaciones y las importaciones de agua, quedando la Ecuación 2-4 como la Ecuación 4-1.

$$Q_t^{nat} = [Q_t^{downstream} + Diversión_t] - [Returns_t] \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Dando un caudal natural en el Río Conchos de 2045 Mm<sup>3</sup>, en la Figura 4-3 se observa el régimen de flujo diario durante el periodo de estudio 1901-1913, donde se muestra la presencia de agua proveniente por el impacto de huracanes, de (julio-octubre) se observa la crecida por precipitación mostrando en el mes de septiembre el caudal máximo con a un valor de 380 Mm<sup>3</sup>.

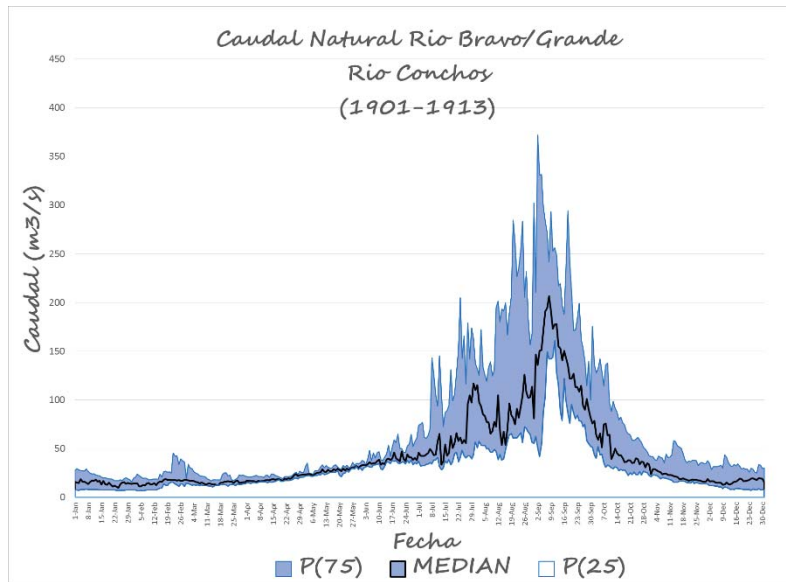


Figura 4-3. . Caudal Natural diario Río Bravo/Grande “Río Conchos”. Elaboración propia.

#### 4.4.2 Río Pecos

Se localiza en Estados Unidos, entre Texas y Nuevo México tiene una longitud de 1450 km, nace en las montañas al este de Santa Fe, Nuevo México y corre a través de la parte oriental del estado antes de entrar en el suroeste de Texas, donde desemboca en el Río Bravo.

El Río Pecos cuenta con registros históricos incompletos por lo que fue difícil realizar un análisis a detalle sobre el caudal ya que se necesita recabar información detallada de las entradas y salidas de volumen de agua y por falta de tiempo no se pudo recabar dicha información; debido a esto se recomienda que en estudios futuros se realice un análisis del caudal natural contemplando los distritos de riego (Santa Rosa, Barstow y Roswell) , que existen en la zona, la presencia de presas así como el escurrimiento por cuenca propia ( $IF_t$ ); para este proyecto se consideró como caudal natural, los datos registrados en la estación *Pecos River near Moorhead* la cual se encuentra ubicada en la desembocadura del Río, datos que fueron obtenidos del United States Geological Survey (USGS) registrando un caudal natural de 541 Mm<sup>3</sup> en el periodo de 1901-1913; en la Figura 4-4 se muestra el régimen del flujo dentro del Río Pecos.



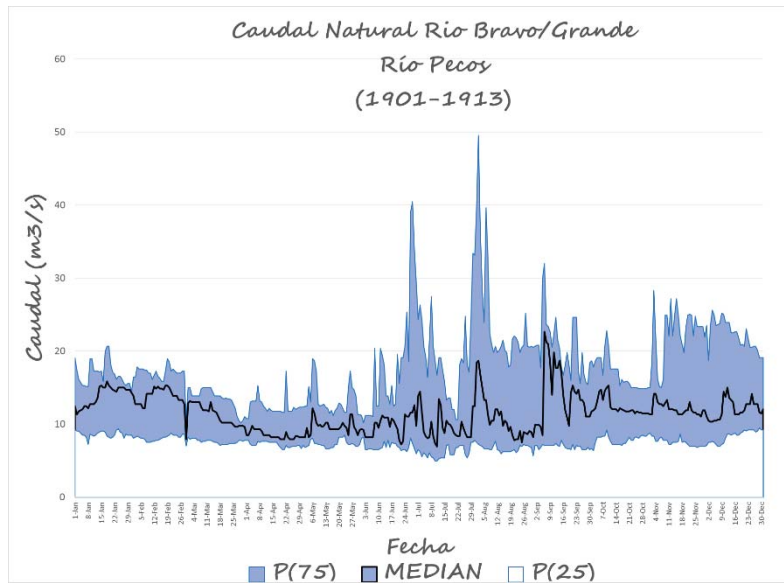


Figura 4-4. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río Pecos. Elaboración propia.

### 4.4.3 Río Devils

Localizado al suroeste de Texas en Estados Unidos pertenece a la cuenca del RBG, nace en el noroeste del Condado de Sutton, donde seis cursos de agua se unen, El río seco Devils, Granger Draw, Casa Draw, Jackson, Flat Rock Draw, y Rough Cañón. Fluye a través del Condado de Val Verde y desemboca en la costa noreste de la Presa de la Amistad, un embalse del Río Bravo/Grande.

Debido a que el Río Devils no sufría aun modificaciones en su caudal en el periodo de 1901-1913, el caudal natural se obtuvo de los datos registrados en la estación *Rio Grande near Devils River*, obtenidos del United States Geological Survey (USGS), obteniendo un caudal natural de 492 Mm<sup>3</sup>; en la Figura 4-5 se observa el régimen de flujo en el Río Devils, el cual presenta una variación insignificante en su caudal indicando que no hay presencia de avenidas máximas durante este periodo en el río.

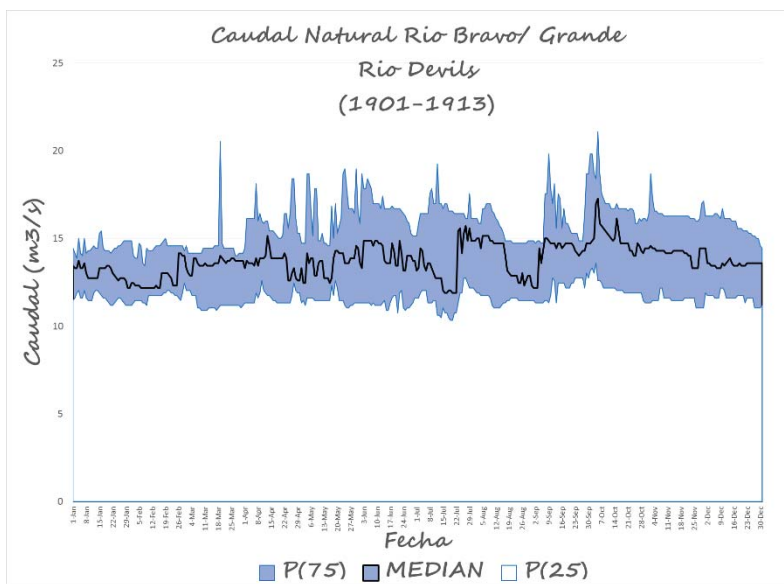


Figura 4-5. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río Devils. Elaboración propia.

#### 4.4.4 Río Salado

Se localiza en México y es el río más importante del Estado de Coahuila, uno de los estados que cruza junto con Nuevo León y Tamaulipas; éste es alimentado por el lago Salinillas y la presa Venustiano Carranza la cual empezó operaciones en 1930. El río es utilizado principalmente para la actividad agropecuaria y minera, aunque la actividad pesquera ha ido en aumento debido a algunas especies que se han ido introduciendo como carpas, sardina molleja, sardina maya, lobina negra y blanca y el lirio marino, entre otras.

Para determinar el caudal natural del Río Salado, se consideró el distrito de riego Don Martin (DR 004) y los registros obtenidos aguas abajo ( $Q_t^{downstream}$ ), de la estación *Rio Salado near Guerrero, Tamaulipas* del (USGS), por lo que se despreció de la Ecuación 2-4 las demás variables, quedando al final la Ecuación 4-2.

$$Q_t^{nat} = [Q_t^{downstream} + Diversion_t] \tag{Ecuación 4-2}$$



### 4.4.4.1 Derivaciones

Para determinar la derivación del Río Salado, solo se consideró el distrito de riego Don Martin (DR 004) ubicada en el estado de Coahuila y Nuevo León del cual se calculó el uso consuntivo total aplicando la Ecuación 2-9 del Método de Thorntwaite, por lo que se descargó la temperatura mensual del PRISM, datos con los que se obtuvo la temperatura media ( $T_j$ ), la cual se calculó sumando los valores de la temperatura desde 1901 hasta 1913 y se dividió entre el número de años considerados para el cálculo, el cual fue de 14, ver Tabla 4-12.

**Tabla 4-12. Valores de  $T_j$  para el distrito de riego Don Martin. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$T_j$												
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Don Martin (DR-004)	15.3	16.1	21.6	24.4	27.4	30.0	30.4	30.8	28.5	23.9	19.5	14.6	

Los datos de ( $T_j$ ) se sustituyeron en la Ecuación 2-11 para obtener  $i_j$  obteniendo la Tabla 4-13.

**Tabla 4-13. Valores de  $i_j$  para los distritos de riego. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$i_j$												I
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	
Don Martin (DR-004)	5.46	5.87	9.14	11.02	13.13	15.05	15.38	15.68	13.94	10.69	7.88	5.08	128.31

Aplicando la Ecuación 2-10 se determinó la constante  $I$  como se muestra en Tabla 4-13, dando una  $I=128.31$ ; este valor se sustituyó en la Ecuación 2-12 para determinar la constante  $a$  arrojando una  $a=2.95$ . Posteriormente se identificó la latitud la cual fue de 26.78, este dato se utilizó para calcular la constante  $Ka$  interpolándolo con los datos de la Tabla 4-14, obteniendo la Tabla 4-15 con el valor de la constante  $Ka$  para cada mes.



**Tabla 4-14. Valores de Ka. Elaboración propia, datos de (Aparicio, 2001).**

VALORES DE Ka												
Latitud grados	mes											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.93	0.91
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.8	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7

**Tabla 4-15. Valores del Ka para el distrito de riego Don Martin (DR-004). Elaboración propia.**

Distrito de Riego	Ka											
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
Don Martin (DR-004)	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.03	0.99	0.90	0.89

Al contar con todos los datos anteriores, se utilizó la Ecuación 2-9, obteniendo el uso consuntivo ( $U_j$ ) total mensual en cm; en la Tabla 4-16 se muestra un resumen de los datos obtenidos y de los valores de uso consuntivo total por cada mes y el anual que dio un valor de 145.95; el cual se comparó con el valor estimado por Cravioto (1946) que fue de 124.8; al ver que no se igualaron, se realizó un ajuste donde se multiplicó el valor del uso consuntivo total mensual calculado por un factor de ajuste, el cual se determinó dividiendo el valor estimado del uso consuntivo total anual por Cravioto (1946) entre el obtenido al realizar este ajuste los datos se igualaron.



**Tabla 4-16. Uso consuntivo total en Don Martin (DR-004). Elaboración propia.**

Distrito de Riego Don Martin (DR-004)															
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	$U_j$ anual cm	Cravioto (1946) $U_j$ anual cm	Factor de ajuste
$T_j$	15.3	16.1	21.6	24.4	27.4	30.0	30.4	30.8	28.5	23.9	19.5	14.6			
$i_j$	5.46	5.87	9.14	11.02	13.13	15.05	15.38	15.68	13.94	10.69	7.88	5.08			
$I$	128.31														
$a$	2.95														
$K_a$	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.03	0.99	0.90	0.89			
$U_j$ mensual	2.48	2.74	7.60	11.37	17.37	22.40	23.97	23.83	17.23	9.87	4.99	2.10	145.95	124.8	0.86
$U_j$ mensual ajustado	2.12	2.34	6.50	9.72	14.85	19.15	20.49	20.38	14.74	8.44	4.27	1.79	124.80	124.8	

El uso consuntivo total calculado anteriormente se basa en la temperatura media contemplando todos los registros obtenidos por cada mes y al final arroja solo un  $U_j$  anual, por lo que se realizó una serie de tiempo para obtener el  $U_j$  anual por cada año de registro, por lo cual en la Ecuación 2-9 se sustituyo  $T_j$  por el valor de temperatura registradó en cada mes Anexo 8, obteniendo como resultados el Anexo 9.

Sin embargo, para este proyecto se necesitaron datos diarios del uso consuntivo total desde la mitad de un mes al otro, por lo que se usó la Ecuación 2-13 para determinar los valores de forma diaria; por consiguiente, se calculó la pendiente ver Anexo 10, datos que se sustituyeron en la Ecuación 2-13 junto con el punto de intercepción (intercepto) en el eje de las ordenadas y la variable independiente  $x$ , obteniendo así el uso consuntivo total diario Anexo 11; posteriormente se obtuvo el promedio anual dando 121.4 cm y se comparó con el de estimado por Cravioto (1946) que fue de 124.8 cm; como se observa el valor calculado se aproxima, por lo que se consideraron correctos los valores determinados diariamente.

El uso consuntivo neto se estimó sustrayendo del uso consuntivo total diario la precipitación diaria, esta diferencia indica la lámina de agua extraída del río para la irrigación. Debido a esto se descargaron los datos de precipitación diaria del distrito de riego Don Martin, los cuales se



encontraron incompletos por lo que se completaron con datos de precipitación de la misma estación considerando el valor del uso consuntivo total, teniendo registros completos de precipitación diaria se realizó la diferencia; posteriormente se sacó el promedio anual del uso consuntivo neto diario para poderlo comparar con el estimado por Cravito (1946), ver Anexo 12 y Tabla 4-17.

**Tabla 4-17. Comparación de uso consuntivo neto**

<i>Uso consuntivo neto</i>		
<i>Distrito de Riego</i>	<i>Calculado cm</i>	<i>Cravioto (1946) cm</i>
<i>Don Martin (DR-004)</i>	105.6	89.7

Finalmente, el uso consuntivo neto diario se multiplicó por el área de riego Tabla 4-18, para obtener la derivación de riego que corresponde a la cantidad de agua extraída del río.

**Tabla 4-18. Área considerada para la derivación. Elaboración propia, datos de Cravioto (1946).**

<i>Área considerada para riego</i>	
<i>Distrito de Riego</i>	<i>Área de riego hectáreas</i>
<i>Don Martin (DR-004)</i>	27900

Para este río no se consideró un retorno dentro de la derivación del agua para riego y los datos de registros aguas abajo o de salida  $Q_t^{\text{downstream}}$ , se obtuvieron de la estación *Rio Salado near Guerrero, Tamaulipas* del USGS. Contando con todos los datos se aplicó la Ecuación 4-2, dando un caudal natural de 1116 Mm<sup>3</sup> en la Figura 4-6 se muestra el comportamiento del régimen de flujo dentro del cauce del Río Salado.

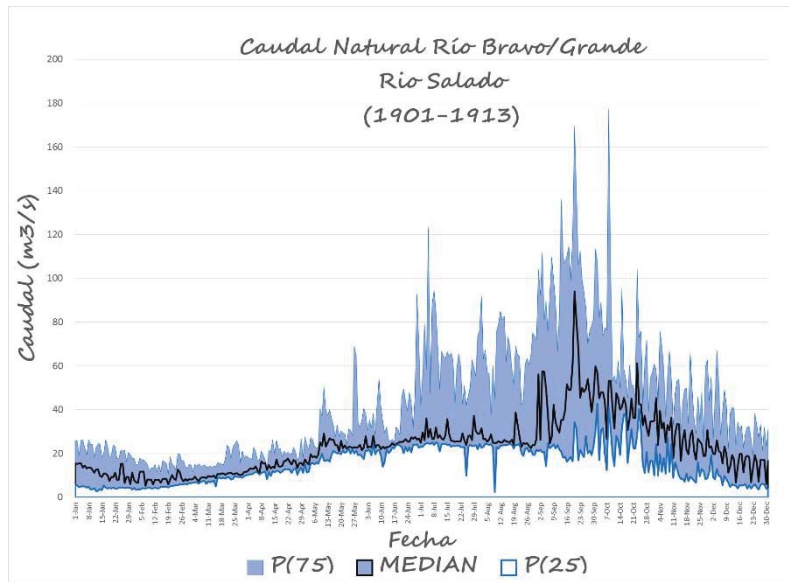


Figura 4-6. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río Salado. Elaboración propia.

### 4.4.5 Río San Juan

Se encuentra en México y abarca los estados de Nuevo León y Tamaulipas, nace en el Arroyo la Chueca (Nuevo León) y desemboca en el Río Bravo/Grande por el estado de Tamaulipas. Es el río más importante del Estado de Nuevo León ya que abastece a la Presa El Cuchillo a partir de 1995, R. Gómez (El Azúcar) y La Boca, construida para llevar agua al Área Metropolitana de Monterrey que concentra más de la mitad de la población de su estado.

Para determinar el caudal natural, se aplicó la Ecuación 2-4 de la cual se contempló  $Q_t^{downstream}$  y la dotación per cápita para Monterrey; se descartaron las presas El Cuchillo, R. Gómez (El Azúcar) y La Boca, debido a que se abrieron años después del periodo de análisis contemplado para este proyecto. Se consideró como caudal de salida  $Q_t^{downstream}$ , los registros de la estación *Rio San Juan near La Quemada and Santa Rosalia ranch* obtenidos del USGS y se calculó la dotación per cápita para Monterrey considerando el registro de población y la dotación per cápita diaria por habitante, al final para obtener el caudal natural del Río San Juan, se sumó la dotación per cápita con los registros de salida dando un caudal natural de 1075 Mm<sup>3</sup>, en la Figura 4-7.

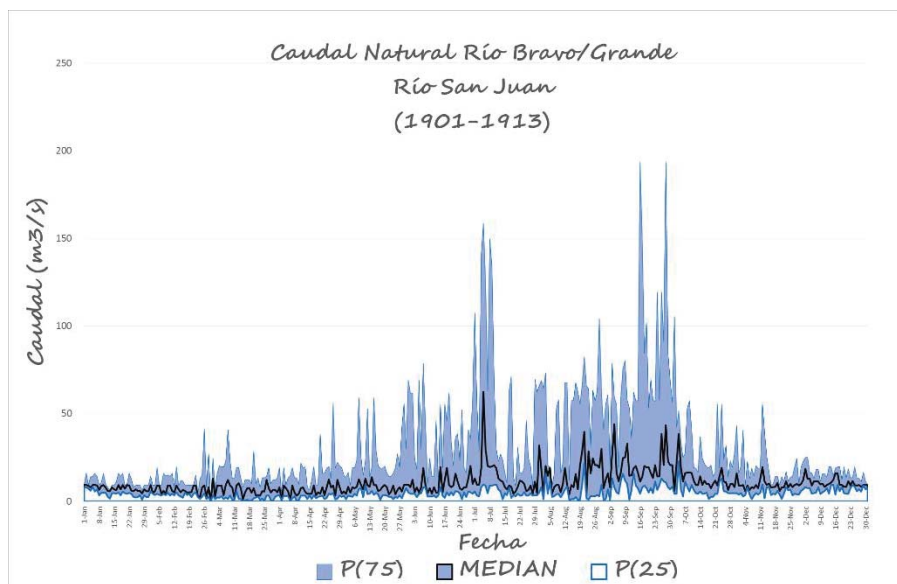


Figura 4-7. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Río San Juan. Elaboración propia.

## 4.5 Cauce principal

Para el análisis dentro del cauce principal, se contemplaron varias puntos dentro del RBG ver la Tabla 4-19, en los que se aplicó la Ecuación 2-8 para obtener el caudal natural.

Tabla 4-19. Puntos de análisis en el cauce principal

Cauce principal Río Bravo/Grande
Aguas Arriba Río Conchos
Aguas Abajo Río Conchos
Aguas Abajo Río Langtry
Aguas Abajo Río Devils
Aguas Abajo Eagle Pass
Aguas Abajo Laredo
Aguas Abajo Roma
Aguas Abajo Brownsville

En la Tabla 4-20 muestra el resumen estadístico de los caudales estimados en el cauce principal en el RBG, promedio (media aritmética), desviación estándar, percentiles 75(0.75), 50 (media) y 25(0.25).



**Tabla 4-20. Resumen estadístico del cauce principal en el Río Bravo/Grande**

	CAUDAL NATURAL (1901-1913)				
	PARAMETRICAS (Mm3)		NO PARAMETRICAS (Mm3)		
	PROMEDIO	MEDIA	P(0.75)	P(0.5)	P(0.25)
<i>Aguas Arriba Río Conchos</i>	1776	807	2393	1645	1139
<i>Aguas Abajo Río Conchos</i>	3821	1276	4401	3749	2892
<i>Aguas Abajo Río Langtry</i>	4290	1207	4695	4158	3338
<i>Aguas Abajo Río Devils</i>	5565	1607	5536	5334	4581
<i>Aguas Abajo Eagle Pass</i>	6439	2558	6210	5709	4984
<i>Aguas Abajo Laredo</i>	6859	2547	6983	6236	5212
<i>Aguas Abajo Roma</i>	8312	2672	8395	7640	7055
<i>Aguas Abajo Brownsville</i>	8894	3550	8973	8069	6879

### *4.5.1 RBG Aguas Arriba del Río Conchos*

El caudal natural aguas arriba del Río Conchos (Ojinaga/Presidio), fue estudiado por la Universidad Estatal de Utah, por el estudiante de posgrado Tood Blythe y el Doctor Jonh C.Schmidt con quienes se trabajó en conjunto para este proyecto, quienes aportaron que el caudal natural desde las montañas del San Juan en el estado de Colorado hasta Ojinaga/Presidio fue de 1776 Mm<sup>3</sup>, dando como resultado el hidrograma que se presenta en la Figura 4-8; cabe mencionar que el agua proveniente al caudal en la parte Alta del RBG es debida al derretimiento de nieve y hielo proveniente de las zonas montañosas, observándose la entrada de deshielo de abril a junio.

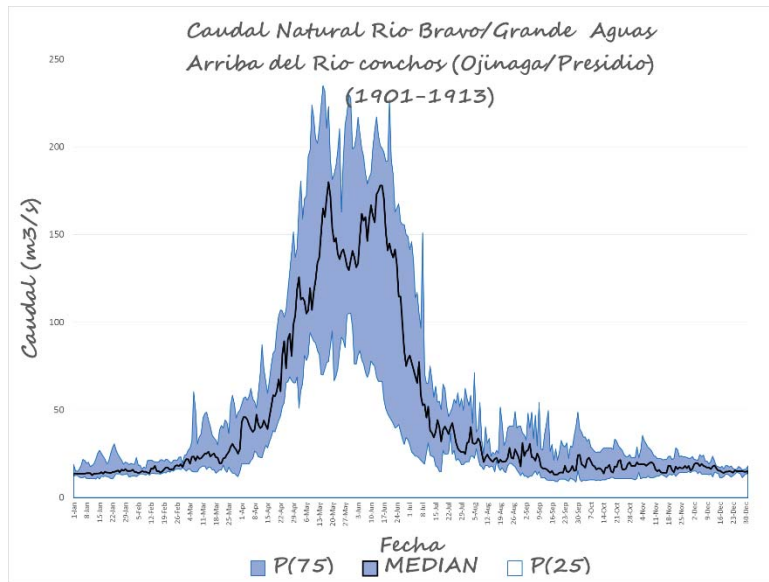


Figura 4-8. . Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Arriba Río Conchos (Ojinaga Presidio)". Elaboración propia.

### 4.5.2 RBG Aguas Abajo del Río Conchos

Para obtener el caudal natural aguas abajo del Río Conchos sobre el cauce principal del RBG, se consideró todas las entradas y salidas de agua arriba de este punto, por lo que se realizó la suma del caudal natural aguas arriba Río Conchos proporcionado por la universidad Estatal de Utah, más el caudal natural obtenido en este estudio del Río Conchos.

La suma de ambos caudales dio un caudal de 3821 Mm<sup>3</sup>, en la Figura 4-9 se visualiza que la primera parte (enero-julio) representa la parte alta del RBG, la cual proviene desde el Colorado, y es suministrada por agua proveniente del derretimiento de nieve y la segunda parte (julio-diciembre) se observa la entrada del caudal del Río Conchos, donde el caudal es suministrado por entrada de huracanes; en los meses de julio y agosto se ve la presencia de las primeras precipitación y entrando al mes de Septiembre se ve la presencia de huracanes, provocando que el caudal se eleve hasta 490 Mm<sup>3</sup> y posteriormente va descendiendo hasta llegar a un caudal base.

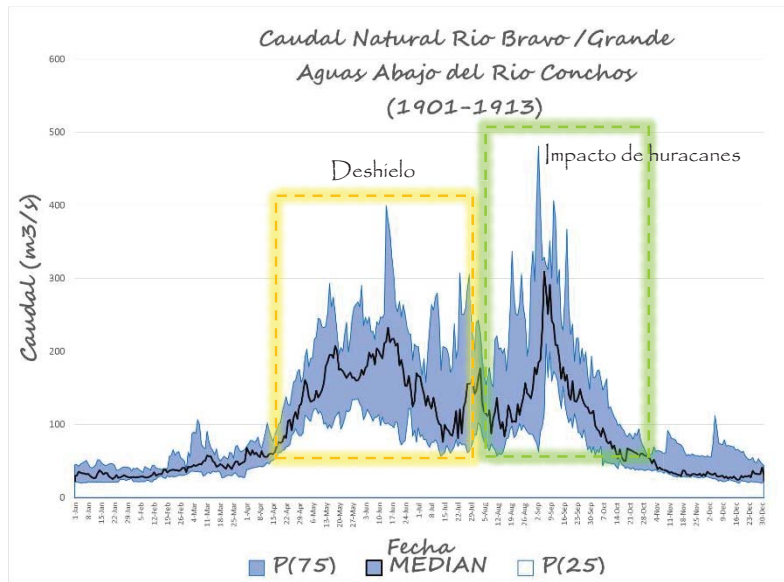


Figura 4-9. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo Río Conchos. Elaboración propia.

### 4.5.3 RBG Aguas Abajo del Río Langtry

En el RBG Aguas abajo del Río Langtry, se localiza la estación hidrométrica *Rio Grande near Langtry*, de la cual se consideraron los registros medidos en esta estación como caudal natural; los datos se obtuvieron del USGS.

Para obtener el caudal natural aguas abajo del Río Langtry se aplicó la Ecuación 2-8, la cual requiere el cálculo de los  $IF_t$  y el caudal natural aguas arriba. Para calcular los escurrimientos por cuenca propia desde aguas abajo Río conchos a aguas abajo Río Langtry se utilizó la Ecuación 2-6, de la cual sólo se consideró  $Q_t^{Upstream}$  y  $Q_t^{Downstream}$  quedando la Ecuación 4-3.

$$IF_t = [Q_t^{downstream}] - [Q_t^{upstream}] \tag{Ecuación 4-3}$$

Donde se consideró como agua de salida  $Q_t^{downstream}$ , los datos registrados en la estación *Rio Grande near Langtry* obtenidos del USGS y como aguas de entrada  $Q_t^{upstream}$ , los datos obtenidos de la estación *Rio Grande below Presidio* obtenidos del IBWC, antes de realizar la diferencia se correlacionaron los datos aguas arriba con los de aguas abajo para ver el coeficiente de correlación que tenían entre ellos, ésto debido a que las estaciones tenían una separación



considerablemente larga, una de la otra, por lo que se observó que se correlacionaban mejor teniendo desfase de un día, por lo que la diferencia se aplicó considerando este desfase entre los datos. Al final, para obtener el caudal natural se sumó el  $IF_t$  y el caudal natural aguas arriba que correspondía al caudal natural aguas abajo Río Conchos, lo que dio un caudal natural en el RBG aguas abajo del Río Langtry de  $4290 \text{ Mm}^3$ ; en la Figura 4-10 se observa el régimen del flujo en donde se sigue observando la presencia de agua por derretimiento de nieve; sin embargo, ésta muestra disminución y empieza a verse más la presencia de un caudal base a partir de (enero-abril).

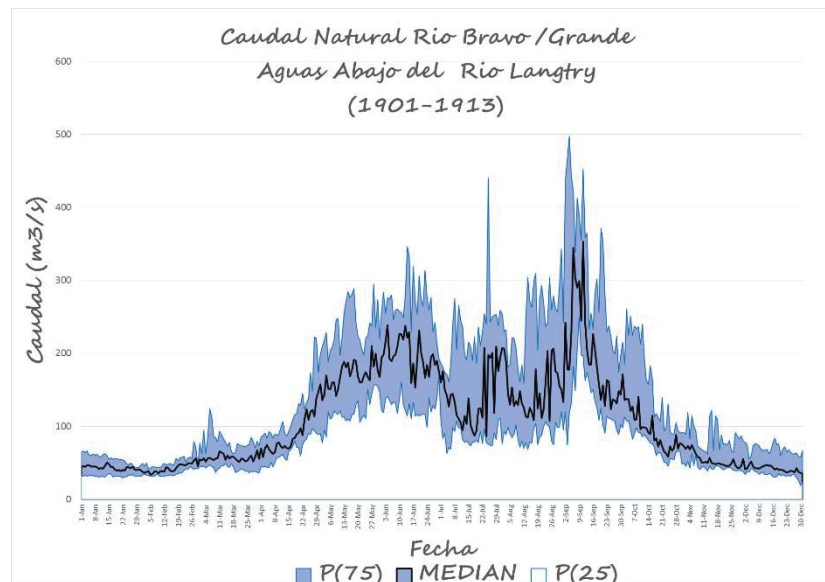


Figura 4-10. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo del Río Langtry. Elaboración propia.



#### 4.5.4 RBG Aguas Abajo del Río Devils

---

Para determinar el caudal natural aguas abajo del Río Devils se aplicó la Ecuación 2-8, por lo que primero se determinó el  $IF_t$ , aplicando la Ecuación 2-6, de la cual sólo se consideraron aguas de entrada y de salida por lo que al final se utilizó la Ecuación 4-3, misma que se utilizó para determinar el  $IF_t$  aguas abajo del Río Langtry. En el caso del Río Devils se contempló como agua de salida, los datos registradó en la estación *Rio Grande near Devils River* obtenidas del USGS y como agua de entrada se consideró la suma de los registros en tres estaciones, en la estación *Pecos River near Moorhead*, *Devils River at Devils River* y *Rio Grande near Langtry* registros obtenidos del USGS. Posteriormente se realizó una correlación para ver el ajuste que existía entre los registros de masa de agua considerados como entrada, con los registros de masa de agua considerados como salida, a lo que se vio existía un ajuste por lo que se procedió a realizar la diferencia para obtener el  $IF_t$ , al que se le sumó posteriormente el caudal natural aguas arriba correspondiente a aguas abajo del Río Langtry más los caudales naturales del Río Pecos y del Río Devils correspondientes a las estaciones *Pecos River near Moorhead* y *Devils River at Devils River*; se consideran estos dos tributarios debido a que se encuentran dentro del volumen de control entre RBG aguas abajo del Río Langtry a aguas abajo del Río Devils , al no ser contemplados los tributarios para el cálculo del  $IF_t$  se sumaron al final, dando un caudal natural en RBG aguas abajo del Río Devils de  $5565 \text{ Mm}^3$ , en la Figura 4-11 se muestra el régimen del flujo en donde se empieza a observar más la presencia de huracanes durante los meses de Agosto a Octubre.

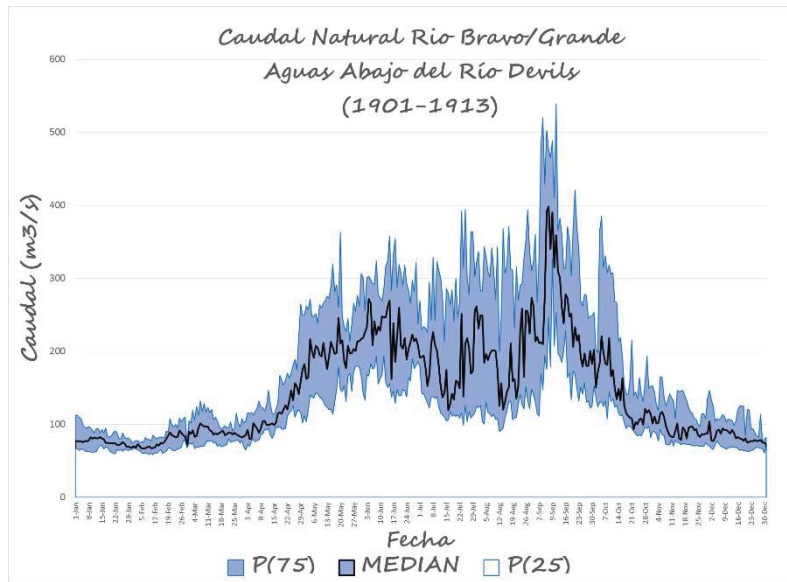


Figura 4-11. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo del Río Devils. Elaboración propia.

### 4.5.5 RBG Aguas Abajo de Eagle Pass

Para obtener el caudal natural aguas abajo de Eagle Pass, se aplicó la Ecuación 2-8 la cual requiere los  $IF_t$  y el caudal natural aguas arriba. Para calcular los escurrimientos por cuenca propia  $IF_t$ , desde aguas abajo del Río Devils a aguas abajo de Eagle Pass, se utilizó la Ecuación 2-7, de la cual solo se consideró  $Q_t^{Upstream}$  y  $Q_t^{Downstream}$ , quedando la Ecuación 4-3  $IF_t = [Q_t^{downstream}] - [Q_t^{upstream}]$ , donde se consideró como agua de salida  $Q_t^{downstream}$ , los datos registrados en la estación *Rio Grande at Eagle Pass*, y como aguas de entrada  $Q_t^{upstream}$ , los datos obtenidos de la estación *Rio Grande near Devils River*. Antes de realizar la diferencia se correlacionaron los datos aguas arriba con aguas abajo para ver el coeficiente de correlación, observándose una correlación adecuada con lo que bastó para realizar la diferencia y determinar el  $IF_t$ , al cual se le restó posteriormente las entradas de los arroyos Río San Felipe, Río Pinto, Río las Vacas y Río San Diego; registros que se obtuvieron del estudio de Cravioto y Lowry (1944). Finalmente para obtener el caudal natural se sumó el  $IF_t$  y el caudal natural aguas arriba correspondiente a ese volumen de control  $Q_t^{natural\_upstream}$ , el cual fue el caudal natural del



RBG aguas abajo de Río Devils, lo que dio un caudal natural del RBG aguas abajo Eagle Pass de  $6439 \text{ Mm}^3$ ; en la Figura 4-12 se muestra el régimen del flujo, donde se ve la disminución de la presencia de agua por derretimiento de nieve mostrando un caudal base más prolongado a partir de (enero–abril) y comienza a notarse más la entrada del caudal natural de la parte baja del RBG (agosto–octubre).

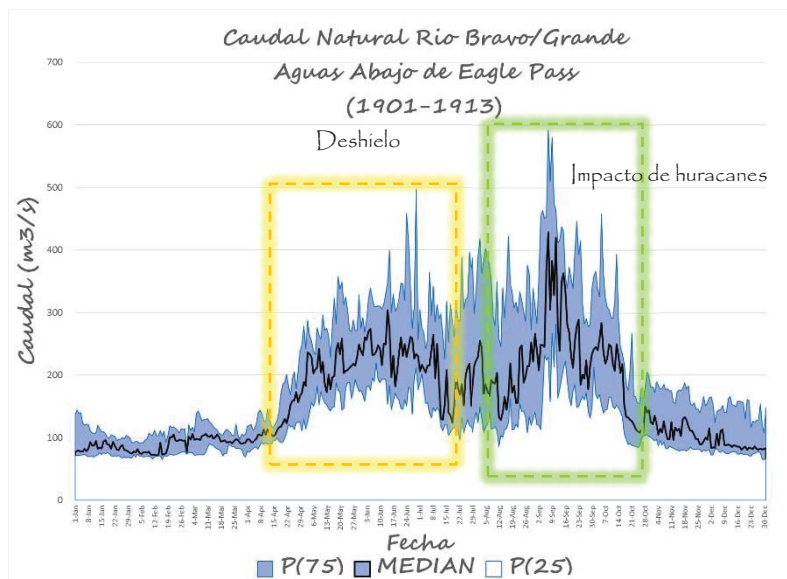


Figura 4-12. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Eagle Pass. Elaboración propia.

### 4.5.6 RBG Aguas Abajo de Laredo

Para determinar el caudal natural del RBG aguas abajo de Laredo, se utilizó la Ecuación 2-8, donde el  $IF_t$  se consideró como agua de salida  $Q_t^{downstream}$ , los registros de la estación *Rio Grande at Eagle Pass* y como agua de entrada  $Q_t^{upstream}$ , los registros de la estación *Rio Grande near Laredo* ambos obtenidos del USGS. Para la estación *Rio Grande near Laredo* se encontraron tres tipos de registros y se generó un cuarto registro con base a los registros encontrados:

1. Caudal regulado con altura (curva gasto–altura)
2. Datos de caudal regulado
3. Datos de tirantes
4. Datos de caudal regulado (2) con Datos de tirantes (3) (curva gasto–altura)



Todos ellos incompletos, por lo que se utilizaron dos métodos para estimar el caudal regulado donde sólo se tenían valores de tirante.

#### Método para completar datos de caudal regulado cuando sólo se contaba con tirantes

Primero se obtuvo una tabla con los registros de la curva gasto-altura correspondiente al tipo de registro (1), de la cual se sacó el promedio del caudal regulado correspondiente a cada altura generando otra tabla, a la cual se nombró curva de calibración gasto-altura; posteriormente se graficó y se trazó la línea de tendencia para identificar la ecuación que más se ajustaba a los datos de la estación *Rio Grande near Laredo*, a la cual se ajustó una polinomial de grado seis dando una  $R^2$  de 0.8079 (Figura 4-13).

Posteriormente se realizó una tabla conformada por el caudal regulado correspondiente al tipo de registro (2) y los datos de tirante correspondiente al tipo de registro (3), obteniendo una segunda tabla curva gasto-altura correspondiente al tipo de registro (4); basándose en esta tabla se completaron los datos faltantes de caudal, en el primer método se interpoló la altura que no contaba con registro de caudal con la tabla correspondiente a la curva de calibración gasto-altura, lo cual nos arrojó un registro de caudal para esa altura y en el segundo método se aplicó la ecuación obtenida la línea de tendencia, ver Figura 4-13, donde se utilizó como variable  $x$  el valor de la altura donde no se tenía registro de caudal. Finalmente se consideró el valor máximo como caudal regulado de los métodos realizados.

Una vez que se completaron los registros de caudal regulado se realizó la diferencia para obtener el  $IF_t$ , a la que se le restó los registros del arroyo San Rodrigo, datos que se obtuvieron del estudio de Cravioto y Lowry (1944). Posteriormente se aplicó la Ecuación 2-8 y se le sumó al  $IF_t$ , el caudal natural aguas arriba que para este volumen de control corresponde a aguas abajo de Eagle Pass, con lo que se obtuvo un caudal natural en el RBG aguas abajo de Laredo de 6859  $Mm^3$ , en la Figura 4-14 se muestra el régimen de flujo donde se observa la disminución del caudal proveniente de la parte alta del RBG.



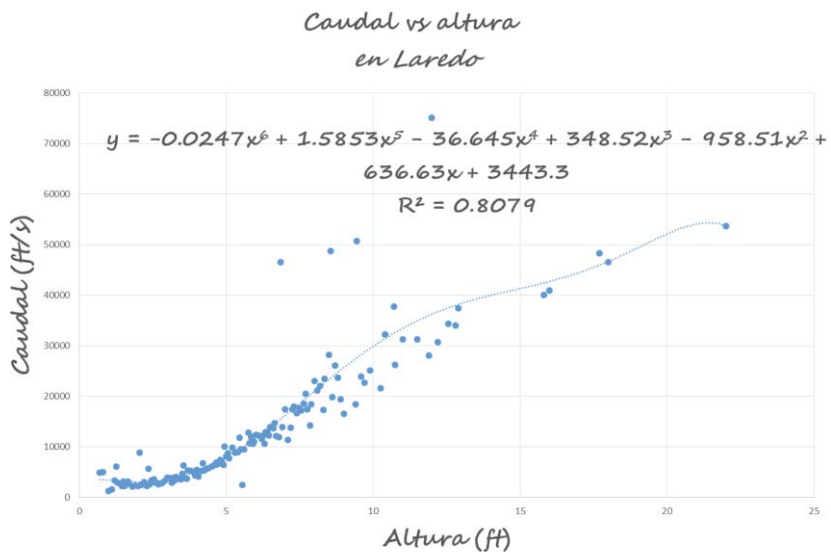


Figura 4-13. Curva de Calibración Gasto-Altura en Laredo. Elaboración propia.

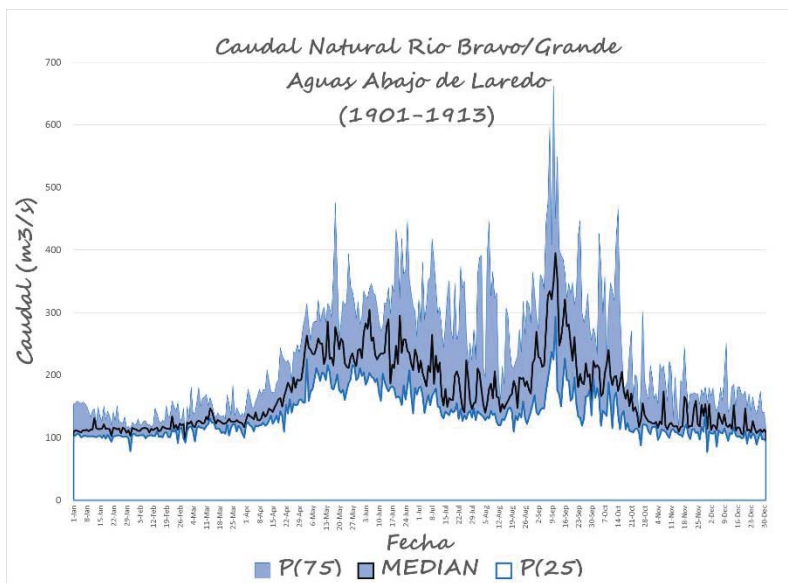


Figura 4-14. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Laredo. Elaboración propia.



### 4.5.7 RBG Aguas Abajo de Roma

---

Para determinar el caudal natural aguas Abajo de Roma, se utilizó la Ecuación 2-8, donde para el  $IF_t$ , se consideró como agua de salida  $Q_t^{downstream}$ , los registros de la estación *Rio Grande near Roma* y como agua de entrada  $Q_t^{upstream}$ , la suma de los registros de las estaciones *Rio Grande near Laredo* y *Rio Salado near Guerrero* ambos obtenidos del USGS, de las estaciones *Rio Grande near Roma* y *Rio Salado near Guerrero* se encontraron tres tipos de registros y se generó un cuarto registro con base a los registros encontrados:

1. *Caudal regulado con altura (curva gasto-altura)*
2. *Datos de caudal regulado*
3. *Datos de tirantes*
4. *Datos de caudal regulado (2) con Datos de tirantes (3) (curva gasto-altura)*

Todos ellos incompletos por lo que se utilizaron dos métodos para estimar el caudal regulado donde solo se tenían valores de tirante.

#### *Método para completar datos de caudal regulado cuando solo se contaba con tirantes*

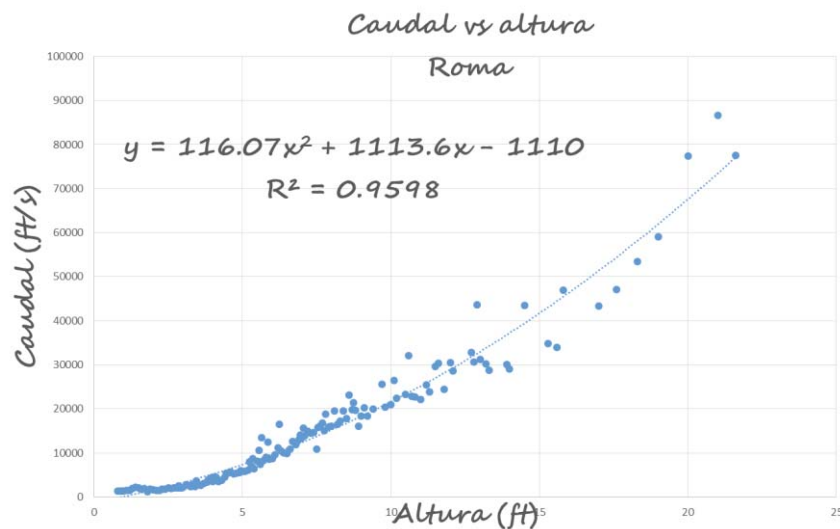
Primero se obtuvo una tabla con los registros de la curva gasto-altura correspondiente al tipo de registro (1), de la cual se sacó el promedio del caudal regulado correspondiente a cada altura, generando otra tabla, a la cual se nombró curva de calibración gasto-altura; posteriormente se graficó y se trazó la línea de tendencia para identificar la ecuación que más se ajustaba a los datos; para el caso de los datos de la estación *Rio Grande near Roma*, se ajustó una polinomial de grado dos dando una  $R^2$  de 0.9598 (ver Figura 4-15). Para los registros de la estación *Rio Salado near Guerrero* se ajustaron con una polinomial de grado dos dando una  $R^2$  de 0.9779 (ver Figura 4-16).

Posteriormente se realizó una tabla conformada por el caudal regulado correspondiente al tipo de registro (2) y los datos de tirante correspondiente al tipo de registro (3), obteniendo una segunda tabla curva gasto-altura correspondiente al tipo de registro (4); basándose en esta tabla se completaron los datos faltantes de caudal, en el primer método se interpoló la altura que no



contaba con registro de caudal con la tabla correspondiente a la curva de calibración gasto-altura, lo cual nos arrojó un registro de caudal para esa altura y en el segundo método se aplicó la ecuación obtenida de la línea de tendencia, ver Figura 4-15 y Figura 4-16, donde se utilizó como variable  $x$  el valor de la altura donde no se tenía registro de caudal. Finalmente se consideró el valor máximo como caudal regulado de los métodos realizados.

Completos los registros de caudal regulado se realizó la diferencia para obtener el  $IF_t$  y posteriormente se aplicó la Ecuación 2-8 y al  $IF_t$  se le sumó el caudal natural aguas arriba, que para este volumen de control corresponde a RBG aguas abajo de Laredo más el registro de la estación *Rio Salado near Guerrero* debido a que éste se contempló dentro de los escurrimientos por Cuenca propia, con lo que se obtuvo un caudal natural del RBG aguas abajo de Roma de 8312  $Mm^3$ ; en la Figura 4-17 se muestra el régimen de flujo en el volumen de control de Laredo a Roma.



**Figura 4-15.** . Curva de Calibración Gasto-Altura en Roma. Elaboración propia.

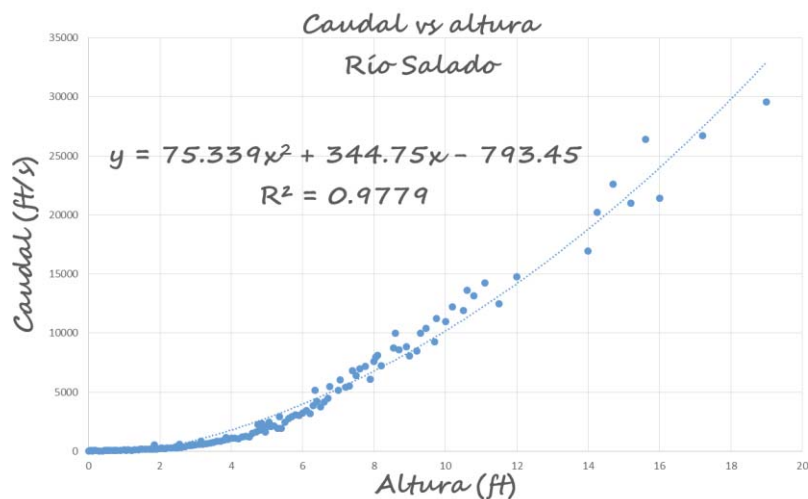


Figura 4-16. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Río Salado. Elaboración propia.

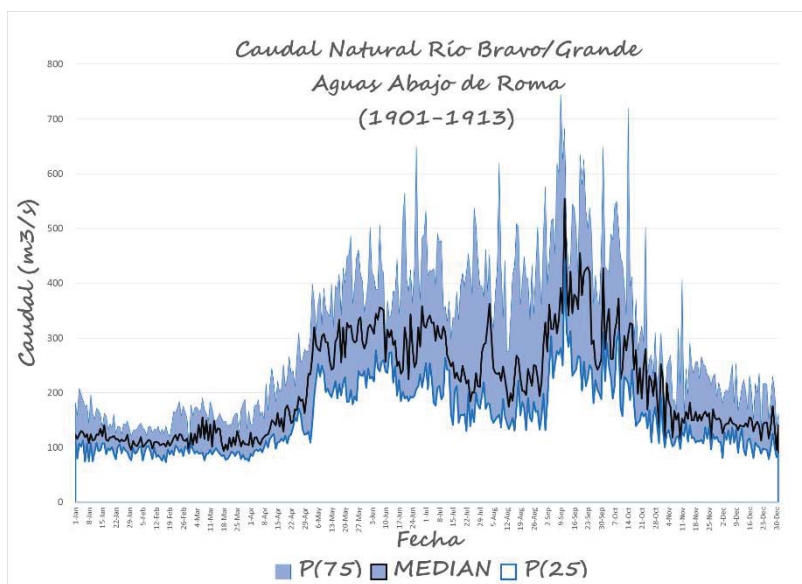


Figura 4-17. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Roma. Elaboración propia.



### 4.5.8 RBG Aguas Abajo de Brownsville

---

Para determinar el caudal natural aguas abajo de Brownsville, se utilizó la Ecuación 2-8; en este volumen de control se consideró el agua de derivación agrícola para Brownsville, por lo que se tuvo que determinar el uso consuntivo y se consideró como agua de salida  $Q_t^{downstream}$ , los registros de la estación *Rio Grande near Brownsville* y como agua de entrada  $Q_t^{upstream}$ , la suma de los registros de las estaciones *Rio Grande near Roma* y *Rio San Juan near La Quemada and Santa Rosalia ranch* ambos obtenidos del USGS. De las estaciones *Rio Grande near Brownsville* y *Rio San Juan near La Quemada and Santa Rosalia ranch* se encontraron tres tipos de registros y se generó un cuarto registro con base a los registros encontrados:

1. *Caudal regulado con altura (curva gasto-altura)*
2. *Datos de caudal regulado*
3. *Datos de tirantes*
4. *Datos de caudal regulado (2) con Datos de tirantes (3) (curva gasto-altura)*

Todos ellos incompletos por lo que se utilizaron dos métodos para estimar el caudal regulado donde sólo se tenían valores de tirante.

#### *Método para completar datos de caudal regulado cuando sólo se contaba con tirantes*

Primero se obtuvo una tabla con los registros de la curva gasto-altura correspondiente al tipo de registro (1), de la cual se sacó el promedio del caudal regulado correspondiente a cada altura, generando otra tabla a la cual se nombró curva de calibración gasto-altura; posteriormente se graficó y se trazó la línea de tendencia para identificar la ecuación que más se ajustaba a los datos, para el caso de los datos de la estación *Rio Grande near Brownsville*, se ajustó una polinomial de grado dos dando una  $R^2$  de 0.951 (ver Figura 4-19). Para los registros de la estación *Rio San Juan near La Quemada and Santa Rosalia ranch* se ajustaron con una polinomial de grado dos dando una  $R^2$  de 0.9098 (ver Figura 4-20).

Posteriormente se realizó una tabla conformada por el caudal regulado correspondiente al tipo de registro (2) y los datos de tirante correspondiente al tipo de registro (3), obteniendo una



segunda tabla curva gasto-altura correspondiente al tipo de registro (4); basándose en esta tabla se completaron los datos faltantes de caudal, en el primer método se interpoló la altura que no contaba con registro de caudal con la tabla correspondiente a la curva de calibración gasto-altura, lo cual nos arrojó un registro de caudal para esa altura y en el segundo método se aplicó la ecuación obtenida de la línea de tendencia, ver Figura 4-19 y Figura 4-20, donde se utilizó como variable  $x$  el valor de la altura donde no se tenía registro de caudal. Finalmente se consideró el valor máximo como caudal regulado de los métodos realizados.

### 4.5.8.1 Derivaciones

Para determinar la derivación en Brownsville se utilizó la Ecuación 2-9,  $U_j = 1.6 K_a \left(\frac{10T_j}{I}\right)^a$  correspondiente al método de Thornthwaite, por lo que se extrajeron registros de temperatura mensual del PRISM, Anexo 13, posteriormente se calculó  $(T_j)$  sumando los valores de la temperatura desde 1901 hasta 1913 y se dividió entre el número de años considerados para el cálculo el cual fue de 14, ver Tabla 4-21.

**Tabla 4-21. Valores de  $T_j$  para el distrito de riego en Brownsville. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$T_j$												
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DR Brownsville	16.6	16.7	20.9	23.3	25.8	28.2	28.7	29.1	27.7	23.9	20.6	16.3	

Los datos de  $(T_j)$  se sustituyeron en la Ecuación 2-11 para obtener  $i_j$  obteniendo la Tabla 4-22.

**Tabla 4-22. Valores de  $i_j$  para el distrito de riego Brownsville. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$i_j$												$I$
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	
DR Brownsville	6.13	6.20	8.71	10.28	11.98	13.70	14.12	14.37	13.38	10.67	8.53	5.97	124.05

Aplicando la Ecuación 2-10 se determinó la constante  $I$  como se muestra en Tabla 4-22 dando una  $I=124.05$ , este valor se sustituyó en la Ecuación 2-12 para determinar la constante  $a$  arrojando una  $a=2.81$ .



Posteriormente se identificó la latitud la cual fue de 25.92, este dato se utilizó para calcular la constante  $K_a$  interpolándolo con los datos de la Tabla 4-23, obteniendo la Tabla 4-24 con el valor de la constante  $K_a$  para cada mes.

**Tabla 4-23. Valores de  $K_a$ . Elaboración propia, datos de (Aparicio, 2001).**

Latitud grados	VALORES DE $K_a$											
	mes											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.93	0.91
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.8	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7

**Tabla 4-24. Valores de  $K_a$  para el distrito de riego en Brownsville. Elaboración propia.**

Distrito de Riego	$K_a$												
	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DR Brownsville		0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.03	0.99	0.90	0.89

Al contar con todos los datos anteriores se utilizó la Ecuación 2-9, obteniendo el uso consuntivo ( $U_j$ ) total mensual en cm en la Tabla 4-25 se muestra un resumen de los datos obtenidos y de los valores de uso consuntivo total por cada mes y el anual que dio un valor de 131.52.

**Tabla 4-25. Uso consuntivo total en DR Brownsville. Elaboración propia.**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	$U_{j\text{anual}}$ cm
$T_j$	16.6	16.7	20.9	23.3	25.8	28.2	28.7	29.1	27.7	23.9	20.6	16.3	
$i_j$	6.13	6.20	8.71	10.28	11.98	13.70	14.12	14.37	13.38	10.67	8.53	5.97	
$I$	124.05												
$a$	2.81												
$K_a$	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.03	0.99	0.90	0.89	
$U_{j\text{mensual}}$	3.32	3.25	7.13	10.08	14.55	18.42	20.02	19.83	15.80	9.99	6.05	3.06	131.52



El uso consuntivo total calculado anteriormente se basa en la temperatura media contemplando todos los registros obtenidos por cada mes y al final arroja solo un  $U_{\text{anual}}$ , por lo que se realizó una serie de tiempo para obtener el  $U_{\text{anual}}$ , por cada año de registro, por lo que en la Ecuación 2-9, se sustituyó  $T_j$  por el valor de la temperatura registrada en cada mes Anexo 13, obteniendo como resultados los presentados en el Anexo 14.

Sin embargo, para este proyecto se necesitaron datos diarios del uso consuntivo total desde la mitad de un mes al otro, por lo que se usó la Ecuación 2-13 para determinar los valores de forma diaria, por consiguiente se calculó la pendiente ver Anexo 15, datos que se sustituyeron en la Ecuación 2-13 junto con el punto intercepto en el eje de las ordenadas y la variable independiente  $x$ , obteniendo así el uso consuntivo total diario Anexo 16; posteriormente se sacó el promedio anual dando 130.53 cm de uso total diario. Para determinar el uso consuntivo neto se sustrajo del uso consuntivo total diario la precipitación diaria, esta diferencia indica la lámina de agua extraída del río para la irrigación. Debido a esto se descargaron los datos de precipitación diaria del distrito de riego Brownsville, los cuales se encontraron incompletos, por lo que se completaron con datos de precipitación de la misma estación considerando el valor del uso consuntivo total, teniendo registros completos de precipitación diaria se realizó la diferencia obteniendo el uso consuntivo neto diario el cual se muestra en el Anexo 17.

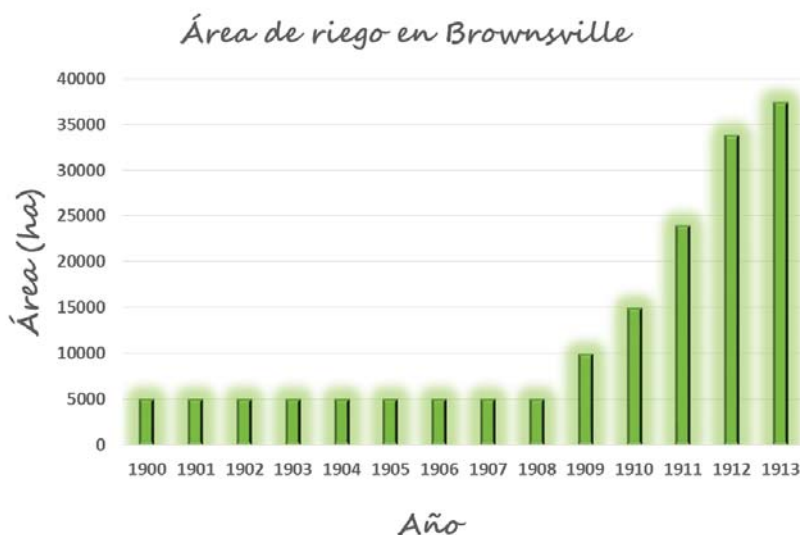
Finalmente, el uso consuntivo neto diario se multiplicó por el área de riego considerada para Estados Unidos, la cual se extrajo de registros históricos; sin embargo, no se contaba con las áreas de todos los años por lo que se realizó un regresión lineal entre los datos existentes, para obtener los datos faltantes, ver Tabla 4-26 y Figura 4-18, para obtener la derivación de riego que corresponde a la cantidad de agua extraída del río.





**Tabla 4-26. Área considerada para la derivación consideradas por Estados Unidos. Elaboración propia.**

<i>Área considerada por Estados Unidos para el riego en Brownsville</i>			
<i>Año</i>	<i>área (ha)</i>	<i>área ha (regresión lineal)</i>	<i>área m2</i>
1900	5000	5000	50000000
1901	5000	5000	50000000
1902	5000	5000	50000000
1903	5000	5000	50000000
1904	5000	5000	50000000
1905	5000	5000	50000000
1906	5000	5000	50000000
1907	5000	5000	50000000
1908	5000	5000	50000000
1909		10000	100000000
1910	15000	15000	150000000
1911	24000	24000	240000000
1912		33847	338465909
1913		37443	374431818



**Figura 4-18. Área de riego para Brownsville**

Cabe mencionar que para este volumen de control no se consideraron retornos dentro de la derivación del agua para riego, así que la Ecuación 2-6 se redujo a la ecuación Ecuación 4-4, para determinar los escurrimientos por cuenca propia.



$$IF_t = [Q_t^{downstream} + Diversion_t] - [Q_t^{upstream}]$$

Ecuación 4-4

Para calcular el caudal natural del RBG aguas abajo de Brownsville, se aplicó la Ecuación 2-8, así que al  $IF_t$  se le sumó el caudal natural aguas arriba, que para este volumen de control, corresponde a aguas abajo de Roma más el registro de la estación *Rio San Juan near La Quemada and Santa Rosalia ranch*, debido a que este se contempló dentro de los escurrimientos por cuenca propia, con lo que se obtuvo un caudal natural del RBG aguas abajo de Brownsville de 8894 Mm<sup>3</sup>; en la Figura 4-21 se muestra el régimen de flujo en el volumen de control de Roma a Brownsville, observando que la señal hidrológica de huracanes es más fuerte que la señal por derretimiento de nieve proveniente de la parte alta del RBG.

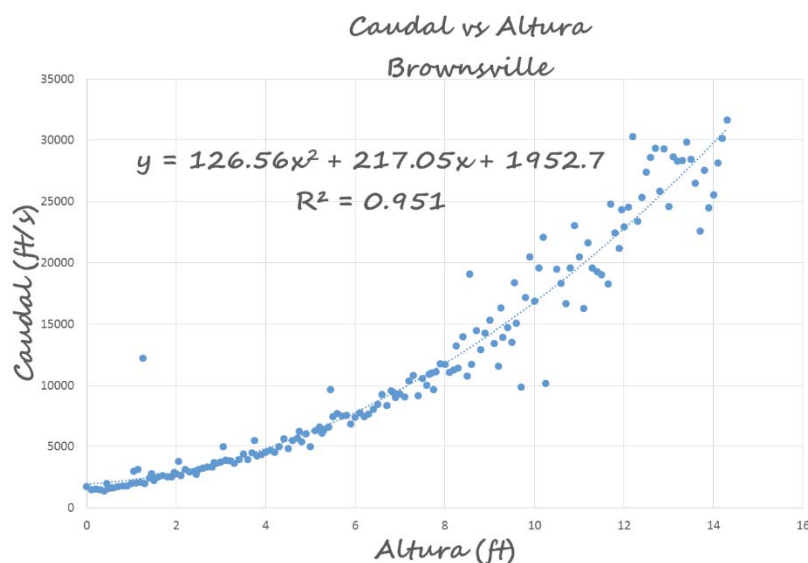


Figura 4-19. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Brownsville. Elaboración propia.

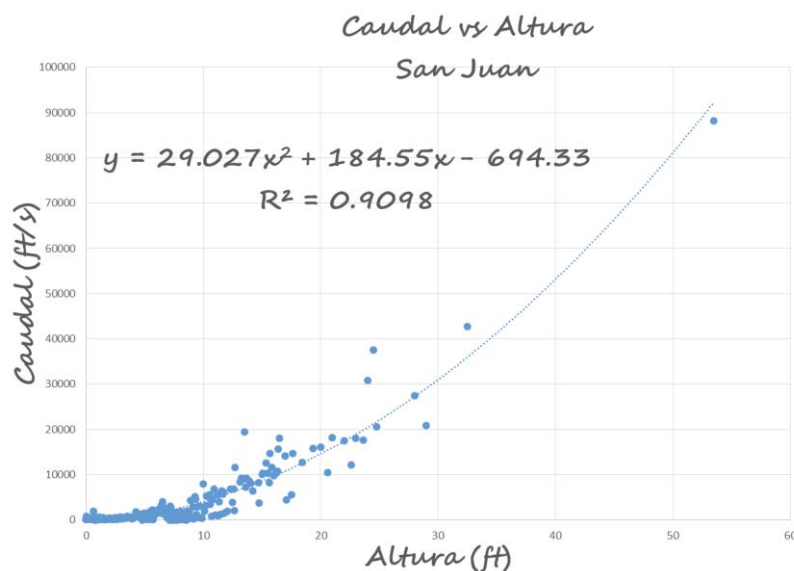


Figura 4-20. . Curva de Calibración Gasto-Altura en Río San Juan. Elaboración propia.

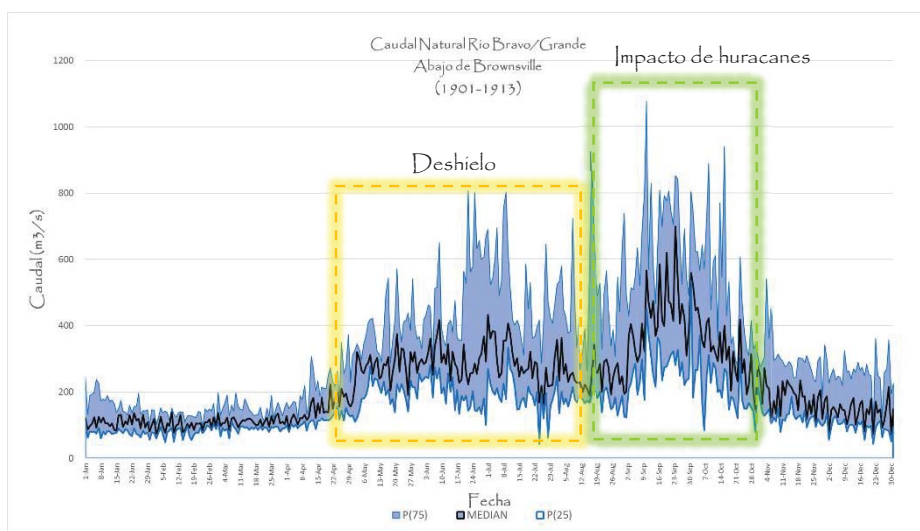


Figura 4-21. Caudal Natural diario Río Bravo/Grande Aguas Abajo de Brownsville. Elaboración propia.



# CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DEL CAUDAL NATURAL ESTIMADO CON ESTIMACIONES HISTÓRICAS

Este capítulo presenta los resultados del objetivo dos de la presente tesis, donde se comparan los hidrogramas estimados con registros históricos.

## *5.1.1 Hidrología diaria 1901-1913*

Esta sección muestra los resultados del presente estudio y se comparan con los resultados del estudio de Orive (1945). Esto con el objetivo de verificar que los escurrimientos naturales diarios calculados se aproximan a los estimados por (Orive, 1945).

La siguiente Tabla 5-1 muestra los escurrimientos promedio anuales calculados con los gastos diarios estimados en este estudio.

**Tabla 5-1. Escurrimientos promedios anuales con gastos diarios**

<i>Río Conchos</i>	2045
<i>Río Pecos</i>	541
<i>Río Devils</i>	492
<i>Alamito y Terlingua*</i>	67
<i>San Felipe y Pinto*</i>	86
<i>Subtotal</i>	1186
<i>Río Salado</i>	1116
<i>Río San Juan</i>	1075
<i>Alamo*</i>	160
<i>Subtotal</i>	1235
<i>Escurrimiento por Cuenca Propia Cauce Principal</i>	1319

\*Estos valores son obtenidos de estudio elaborado por Cravioto y Lowry (1944)



### 5.1.2 Hidrología Estimada 1900-1944

La siguiente Tabla 5-2 muestra los escurrimientos promedio anuales estimados por Orive (1945).

**Tabla 5-2. Escurrimientos promedios anuales estimados por Orive (1945)**

<i>Río Conchos</i>	2045
<i>Río Pecos*</i>	ND
<i>Río Devils*</i>	ND
<i>Alamito y Terlingua*</i>	ND
<i>San Felipe y Pinto*</i>	ND
<i>Subtotal</i>	2180
<i>Río Salado</i>	925
<i>Río San Juan*</i>	ND
<i>Alamo*</i>	ND
<i>Subtotal</i>	1557
<i>Escurrimiento por Cuenca Propia Cauce Principal</i>	1468

\*Orive (1945) no presenta estos valores desagregados, sin embargo, hace mención de los valores de estos tributarios en conjunto.

### 5.1.3 Comparación de estimaciones

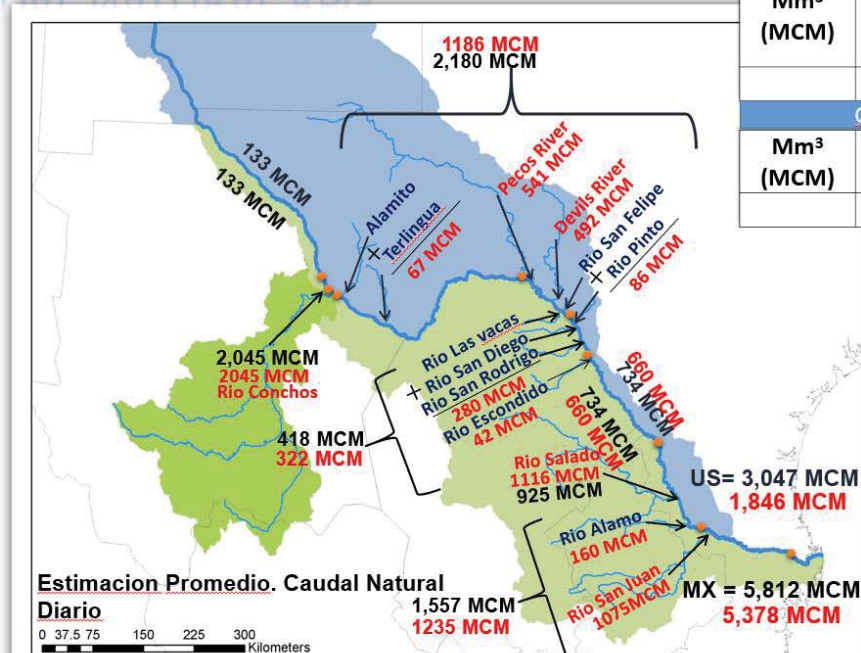
En la Tabla 5-3 se observa la comparación de los datos calculados de caudal natural en este estudio contra los estimados por el Ing. Adolfo Orive Alba vocal ejecutivo de la Comisión Nacional de Irrigación presentado ante el Senado Mexicano en 1945, donde se observa que la diferencia en el caudal subtotal se aproxima; en la Figura 5-1 se observa la ubicación de los afluentes considerados para la comparación y los resultados de caudal natural de cada uno de ellos, mostrando el calculado en este estudio contra el estimado por Orive (1945).



**Tabla 5-3. Comparación de escurrimientos promedios anuales estimados por Orive (1945) contra los calculados en la presente tesis.**

Afluentes	Estimado en el proyecto	Orive (1945)
Río Conchos	2045	2045
<b>Ríos tributarios de Estados Unidos</b>		
Río Pecos	541	ND
Río Devils	492	ND
Alamito y Terlingua*	67	ND
San Felipe y Pinto*	86	ND
Subtotal	1186	2180
Río Salado	1116	925
<b>Ríos tributarios de México</b>		
Río San Juan	1075	ND
Alamo*	160	ND
Subtotal	1235	1557
<b>Escurrecimiento por Cuenca Propia Cauce Principal</b>	<b>1319</b>	<b>1468</b>

## CAUDAL NATURAL RBG



Orive (1945)			
	US	MX	Total
<b>Mm<sup>3</sup> (MCM)</b>	<b>3,047</b>	<b>5,812</b>	<b>8,859</b>
	<b>34%</b>	<b>66%</b>	<b>100%</b>
Calculados (Estudio)			
<b>Mm<sup>3</sup> (MCM)</b>	<b>1,846</b>	<b>5,378</b>	<b>7224</b>
	<b>26%</b>	<b>74%</b>	<b>100%</b>

1 - Orive-Alba, Adolfo (1945). "Informe técnico sobre el tratado internacional de aguas presentado ante el H. Senado mexicano" Comisión Nacional de Irrigación.

**Figura 5-1. Comparación de caudales naturales entre el estimado por Orive (1945) y el estimado en esta tesis. Elaboración propia.**



Para el Río Conchos el caudal natural estimado por Orive (1945), es igual al calculado ya que ambos tienen un valor de 2045 Mm<sup>3</sup>. Para los ríos tributarios de los Estados Unidos, se calculó un caudal natural de 1186 Mm<sup>3</sup> el cual se comparó con 2180 Mm<sup>3</sup> estimado por Orive (1945). Esta es una diferencia significativa y se considera que esta diferencia proviene del Río Pecos, cuyo caudal se estimó de 541 Mm<sup>3</sup>, pero en estudios de Ernesto Enríquez Coyro (Enriquez Coyro, 1975) indica que el Río Pecos tiene un caudal de 1,500 Mm<sup>3</sup>, por lo que se considera que esta diferencia proviene del Río Pecos. Por lo que se recomienda hacer un estudio a detalle del Río Pecos, considerando los distritos de riego (Barstow, Roswell y Santa Rosa). Para el Río Salado se calculó un caudal natural de 1,116 Mm<sup>3</sup>, que se comparó con 925 Mm<sup>3</sup> estimado por Orive (1945); en esta comparación se muestra un incremento en el caudal natural calculado y esto se debe a que se consideró la derivación del distrito de riego Don Martin (DR-004). Para los ríos tributarios de México, se calculó un caudal natural de 1235 Mm<sup>3</sup> el cual se encontró por debajo al estimado por Orive (1945) de 1,557 Mm<sup>3</sup>, sin embargo la diferencia se considera apropiada ya que varía en 322 Mm<sup>3</sup>, los cuales se considera pudieron haber faltado a causa de la información incompleta de los registros históricos. Finalmente, los escurrimientos por cuenca propia sobre el RBG se aproximaron demasiado al comparar 1,319 Mm<sup>3</sup> que fue el calculado con 1,468 Mm<sup>3</sup> que fue el estimado por Orive (1945), por lo que se consideraron correctos.

Para todo el RBG tenemos una diferencia de 1,500 Mm<sup>3</sup> de los cuales se considera que 1,000 Mm<sup>3</sup>/año provienen del Río Pecos y que 500 Mm<sup>3</sup>/año son provenientes de la parte alta del RBG.



# CAPÍTULO 6 FUNCIONES ECOLÓGICAS DEL CAUDAL NATURAL DEL RÍO BRAVO/GRANDE (RBG)

Este capítulo presenta los resultados del objetivo tres de la presente tesis donde se describen las funciones ecológicas que son provistas por el caudal natural del RBG.

## 6.1 Descripción de funciones ecológicas

Basándose en la información de (Postel & Richter, 2003), se encontraron las siguientes funciones ecológicas que realiza un río en su estado natural ver Tabla 6-1 , las cuales se compararon con el régimen de flujo del caudal natural estimado en este estudio, en diferentes puntos a lo largo del cauce del RGB.

**Tabla 6-1. Funciones Ecológicas (Postel & Richter, 2003)**

<i>Funciones ecológicas</i>	
<i>Nivel de flujo</i>	<i>papeles ecológicos</i>
<i>flujo base</i>	<i>Nivel normal</i>
	<i>Provee un espacio de hábitat adecuado para organismos acuáticos</i>
	<i>Mantiene una adecuada temperatura en el agua, disolución de oxígeno y química acuática</i>
	<i>Mantener niveles freáticos en planicies de inundación , humedad de suelo para plantas</i>
	<i>Proporciona agua potable para animales terrestres</i>
	<i>Mantener suspensión para peces y hueva de anfibios</i>
	<i>Permite que los peces se desplacen hacia áreas de alimentación y desove</i>
	<i>Sostén de organismos hiporreicos (que viven en sedimentos saturados)</i>
	<i>Nivel de sequía</i>
	<i>Permite el reclutamiento de ciertas plantas en la llanura de inundación</i>
	<i>Expurga especies invasoras introducidas en comunidades acuáticas y ribereñas</i>
	<i>Concentra presas dentro del límite de áreas benéficas para depredadores</i>
<i>inundaciones</i>	<i>Moldear las características físicas del canal fluvial incluidos estanques y rápidos</i>
	<i>Determina la dimensión de los substratos del lecho (arena, gravilla, adoquín)</i>





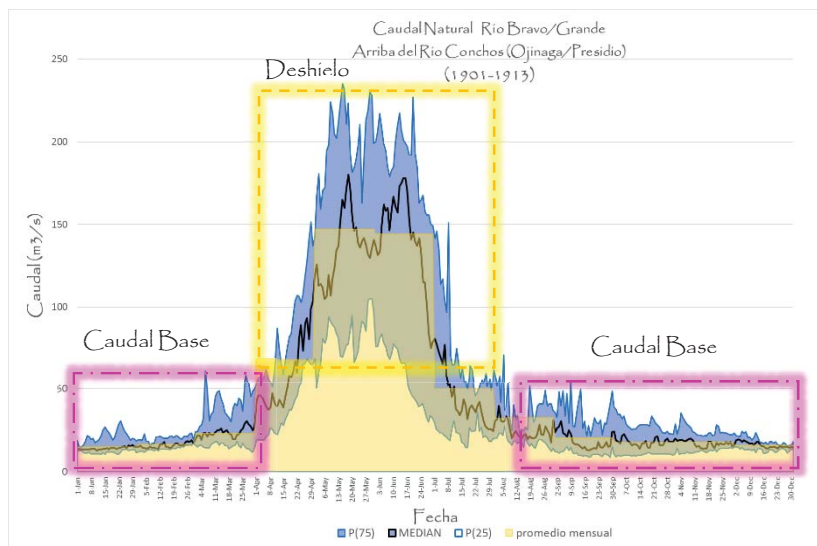
	<i>Evita que la vegetación ribereña invada el canal</i>
	<i>Normalizar las condiciones de calidad de agua luego de escurrimientos basales prolongados, arrastra productos de desecho y contaminantes</i>
	<i>Ventilar hueva en gravilla de desove, prevenir el atasco de la sedimentación</i>
	<i>Mantener condiciones de salinidad sostenibles en los estuarios</i>
<b>crecidas</b>	<i>Provee migración y desove de peces</i>
	<i>Provee nuevas oportunidades de alimentación a peces, aves acuáticas</i>
	<i>Mantiene diversidad en llanuras de inundación</i>
	<i>Controla la distribución y abundancia de plantas sobre la llanura de inundación</i>
	<i>Deposita nutrientes en la llanura de inundación</i>
	<i>Permite el desove en las llanuras de inundación, proporcionar áreas de crecimiento para alevines</i>
	<i>Recarga el manto freático de las llanuras de inundación</i>
	<i>Mantener la diversidad en los bosques de las llanuras de inundación mediante inundaciones prolongadas (es decir, distintas especies vegetales tienen diferentes tolerancias)</i>
	<i>Controlar la distribución y abundancia de plantas en la llanuras de inundación</i>
	<i>Mantener el equilibrio de especies en comunidades acuáticas y ribereñas</i>
	<i>Crear sitios de reclutamiento de plantas colonizadoras</i>
	<i>Moldear los hábitats físicos de las llanuras de inundación</i>
	<i>Depositar gravilla y adoquín en áreas de desove</i>
	<i>Arrastre de materia orgánica (alimento) y detritos de madera (estructura de hábitat) hacia el canal</i>
	<i>Expurgar especies invasoras introducidas en comunidades acuáticas y ribereñas</i>
	<i>Distribuir semillas y frutos de plantas ribereñas</i>
	<i>Impulsar el movimiento lateral del canal fluvial formando nuevos hábitats (canales secundarios, lagos en herradura)</i>
	<i>Proporcionar a las plántulas acceso prolongado a suelos húmedos</i>

### 6.1.1 Discusión conforme a los hidrogramas

Con base a la Tabla 6-1 se pueden describir las funciones ecológicas que genera el RBG, de acuerdo a su régimen de flujo dentro del caudal natural. En este apartado se muestran cuatro hidrogramas donde se muestran cambios importantes en el régimen de flujo en el RBG, considerando el RBG Aguas Arriba del Río Conchos (ver Figura 6-1), Río Conchos (ver Figura 6-2), el RBG Aguas Abajo del Río Conchos (ver Figura 6-3) y el RBG Aguas Abajo de Brownsville (ver Figura 6-4), de los cuales se hace una descripción de las funciones ecológicas. Así mismo, se realiza la comparación entre el hidrograma basado en registros diarios contra el hidrograma con



registros mensuales, donde se observa que el tener un hidrograma con registros diarios ayuda a visualizar a detalle el régimen del flujo entre cada día donde se aprecia la variación como son avenidas máximas, impacto de precipitaciones y caudales bajos los cuales son importantes para determinar los procesos ecológicos que realizaba el RBG en condiciones naturales.



**Figura 6-1. Comparación de caudal natural diario contra mensual del RGB Aguas Arriba del Río Conchos**

En la Figura 6-1 se muestra el régimen de flujo del caudal natural para el RBG Aguas Arriba del Río Conchos donde se muestra que en los meses de enero a abril y de agosto a diciembre se presenta un caudal base el cual es importante para el RBG, ya que provee refugio, protección y sobrevivencia a peces pequeños al no permitir la entrada de depredadores, mantiene a los peces y a los huevos de los anfibios suspendidos, mantiene una adecuada temperatura del agua, proporciona agua potable a los animales terrestres y también mantiene el cauce húmedo para que viva el ecosistema acuático y ripario. En los meses de abril a septiembre se observa un flujo por deshielo considerado como crecida o flujo máximo este tipo de flujo ayuda a mover sedimentos, limpia especies invasoras, limpia el cauce y sirve como señales de calidad del agua para los peces ya que al detectar el agua fría, migran hacia aguas arriba y les es más fácil desplazarse debido a la gran cantidad de agua proveniente de aguas arriba, permite el desove en las planicies de inundación, deposita nutrientes en las planicies de inundación, mantiene el



equilibrio de especies en comunidades acuáticas y ribereñas, distribuye semillas y frutos de plantas riparias, estas funciones son de acuerdo a (Postel & Richter, 2003).

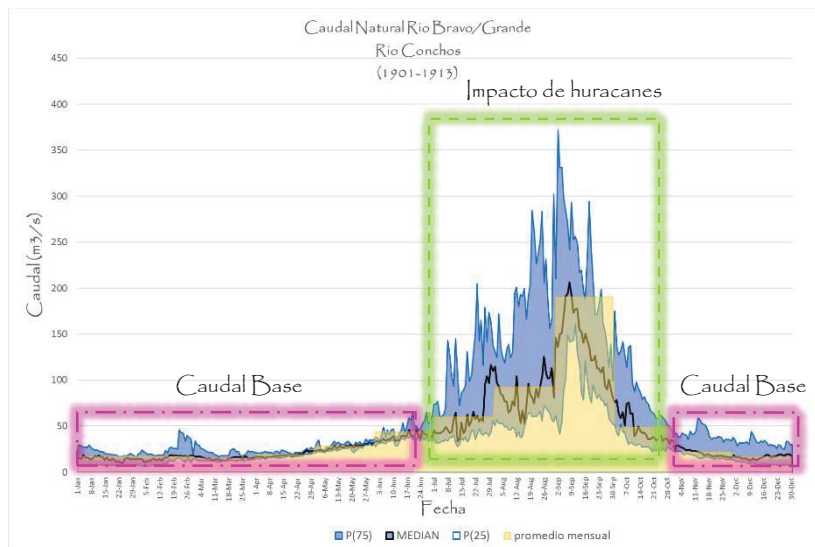


Figura 6-2. Comparación de caudal natural diario contra mensual en Río Conchos

En la Figura 6-2 se muestra el régimen de flujo del caudal natural del Río Conchos; éste presenta un caudal base de enero a junio y de noviembre a diciembre y muestra un flujo por impacto de huracanes de julio a octubre considerado como flujo máximo, éste provee nutrientes a la llanura de inundación, oxigena el agua, mueve sedimentos, contribuye a la calidad del agua y provee nuevas oportunidades de alimentación.

La Figura 6-3 muestra el régimen de flujo en el RBG Aguas Abajo del Río Conchos, punto donde se une el agua proveniente de la parte alta del RBG y el agua proveniente del Río Conchos, mostrando como se observa la combinación de estos dos flujos, mostrando como el RBG contiene una entrada de flujos máximos de abril a octubre, meses donde se unen las aguas provenientes por deshielo y las provenientes de huracanes.

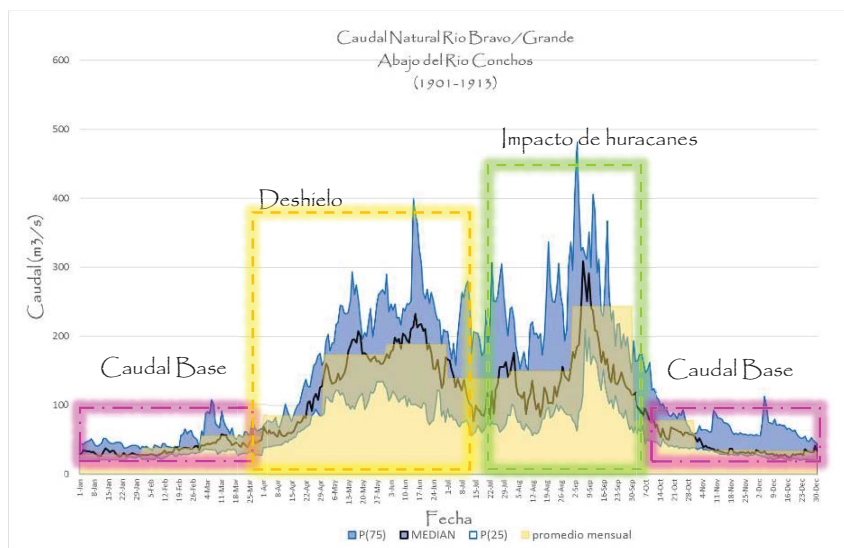


Figura 6-3. Comparación de caudal natural diario contra mensual del RBG Aguas Abajo del Río Conchos

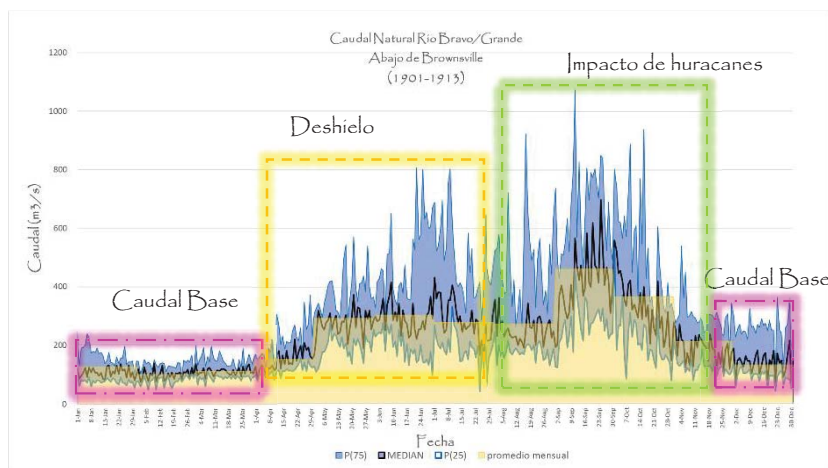


Figura 6-4. Comparación de caudal natural diario contra mensual del RBG Aguas Abajo de Brownsville

En la Figura 6-4 se muestra el régimen de flujo del caudal natural del RBG Aguas Abajo de Brownsville, el cual muestra el régimen de flujo final calculado en este estudio para el RBG, donde se muestra la unión de la parte Alta del RBG y la parte Baja del RBG. En el régimen de flujo se visualiza un caudal base de (enero-abril) y de (noviembre-diciembre), de (abril –julio) se observa un flujo por deshielo y de (agosto-noviembre), se observa un flujo por impacto de huracanes con lo que se define al RBG como un río de suma importancia por su característico régimen de flujo ya que se encuentra compuesto por los tres niveles de flujos considerados por (Postel & Richter,



2003) para funciones ecológicas. Así mismo se observa que la parte de huracanes es más fuerte que la de deshielo; sin embargo, aún se tiene presencia de agua proveniente del deshielo.



# Conclusiones y Recomendaciones

## *Conclusiones*

El RBG por pertenecer a una cuenca con diferentes características geográficas, geológicas, climáticas, hidrológicas, culturales e históricas a lo largo de todo el cauce, se considera un sistema complejo, capaz de proveer bienestar a una infinidad de especies.

- De acuerdo a la hipótesis de esta tesis se concluye que se puede determinar el caudal natural aplicando la ecuación de continuidad.
- Se considera que los datos obtenidos en el periodo de 1901 a 1913 fueron correctos, por lo que la metodología que se aplicó en esta tesis se puede aplicar a otros ríos.
- Gracias al estudio realizado se conoce por primera vez las características del RBG en forma diaria mostrando como se comportaba el río en condiciones naturales.
- Al realizar el estudio en escala diaria se observó que el régimen de flujo natural del RBG muestra a detalle los cambios existentes en el régimen de flujo de un día a otro, con lo cual se pueden determinar en la actualidad proyectos de restauración para el RBG, por lo que se considera importante realizar este tipo de estudio a escala diaria para poder determinar el comportamiento del ecosistema de una forma exacta o adecuada.
- Al realizar la comparación de los datos estimados en la presente tesis con respecto a los estimados por Orive (1945), se observó que los datos estimados eran correctos, algunas estimaciones presentaban similitud y algunas se igualaron.
- Al momento de analizar el Río Pecos se presentó una limitante ya que no fue posible contar con registros completos del caudal regulado en algunas estaciones hidrométricas a lo largo del río; así mismo, en el Río Conchos presentó la misma



limitante en el periodo de 1914 a 1930 debido a la falta de mediciones en el río durante la Revolución Mexicana, motivo por lo que se consideró el estudio hasta el año 1913.

- Mediante el cálculo del caudal natural en el RBG se observó que el régimen de flujo tiene dos fuentes hidrológicas una de deshielo y otra por huracanes; ambas fuentes dan equilibrio al ecosistema acuático y ribereño del RBG, el cual ha sufrido impacto por la alteración en su régimen de flujo.
- Con el régimen de flujo del caudal natural estimado en esta tesis se determinó que los ecosistemas acuáticos y ribereños del desierto Chihuahuense evolucionaron con las dos fuentes hidrológicas del RBG.
- Las fuentes hidrológicas contienen a lo largo del RBG, caudal base, crecidas por precipitación y presencia de inundaciones.
- La presencia del caudal base ayuda a que peces y otras especies de agua dulce cuenten con el espacio suficiente para moverse hacia aguas arriba y aguas abajo dentro del cauce; así mismo, les provee alimentos, nutrientes, protección y permite que los peces se desplacen hacia áreas de alimentación y desove.
- Las crecidas por precipitaciones lavan los residuos y restauran la calidad del agua dentro del cauce, transportan sedimentos y alimentos a todo el río; así mismo, forman el canal fluvial; cuando hay presencia de inundaciones se estimulan las migraciones de peces y permite que se desplacen hacia las llanuras de inundación con una temperatura ambiente que contiene nutrientes depositados los cuales sirven como alimento.
- La cantidad importante de agua por deshielo así, como por huracanes permite la presencia de inundaciones, el agua de deshielo sirve como indicador para los peces proporcionando mediante el cambio de temperatura pistas de migración y desove a los peces, evita que la vegetación riparia invada el canal, previene el atasco de sedimentos en el cauce y ventila la hueva desovada en las llanuras de inundación; así mismo, mantiene condiciones de salinidad sostenibles en los estuarios.



- Todos los componentes mencionados anteriormente, contribuyen a proveer hábitat, mover sedimentos, transportar nutrientes, oxigenar el agua, mantener el control de la calidad del agua, depositar sedimentos en planicies, a la distribución de semillas y frutos riparios, al arrastre de materia orgánica (alimento) y detritos de madera (estructura del hábitat), a expurgar especies invasoras introducidas en comunidades acuáticas y riparias, a la recarga del manto freático de las llanuras de inundación, todo en pro a los ecosistemas.
- El régimen de flujo natural determinado en el RBG se puede considerar como base científica que oriente y monitoree las propuestas del caudal ecológico; así mismo, ayuda a conocer el comportamiento y las características del RBG con lo cual se pueden elaborar proyectos de restauración del RBG.

## *Recomendaciones*

Como trabajo a futuro se continuará con un estudio basado en los resultados obtenidos en la presente tesis, en el cual se determinará el caudal natural de la cuenca del RBG desde su nacimiento en el estado de Colorado hasta la desembocadura en el Golfo de México, mediante el software Python que es utilizado para programación así, como el software estadístico “R”, donde se utilizará la misma metodología empleada en este estudio, considerando el estudio detallado de todos los afluentes del RBG como del cauce principal desde 1900 al 2015. Por lo que se realizará un modelo estocástico para completar los registros faltantes de caudal en las estaciones hidrométricas dentro del Río Conchos como del Río Pecos, así mismo, se consideraran los cambios de almacenamiento dentro del cauce principal como en sus afluentes, por lo que se contemplaran las dos presas internacionales (Falcón y Amistad) localizadas en el cauce principal del RBG y se considerarán los distritos de riego (Barstow, Roswell y Santa Rosa) al realizar el estudio a detalle del Río Pecos.





Se recomienda realizar un estudio del caudal ecológico; así como, un estudio de la huella hídrica en el RBG, ambos estudios basándose en el régimen de flujo natural determinado en este estudio y elaborar proyectos de restauración para el RBG; así mismo, realizar una comparación del caudal natural con el caudal regulado actual.



## Glosario

**Biomás:** unidad ecológica en que se divide la biosfera atendiendo a un conjunto de factores climáticos y geológicos que determinan el tipo de vegetación y fauna.

**Caudal Ecológico:** cantidad, tiempo y calidad del flujo de agua requerida para sostener la vida en agua dulce y estuarios, así como, los medios de vida del ser humano y el bienestar que dependen sobre estos ecosistema.

**Caudal natural:** cantidad, tiempo y calidad del flujo de agua que mantiene un equilibrio en los ecosistemas acuáticos y ribereños y no ha sufrido alteración en su régimen de flujo por infraestructura antropogénica.

**Detrito:** son residuos, generalmente sólidos permanentes, que provienen de la descomposición de materia orgánica (vegetales y animales). Es materia muerta.

**Ecosistemas ribereños:** son hábitats diversos, dinámicos y complejos, ya que son la interface entre los sistemas terrestres y los acuáticos, por lo que abarcan diferentes gradientes ambientales, comunidades y procesos ecológicos.

**Embalse:** es un depósito de agua que se forma de manera artificial. Lo habitual es que se cierre la boca de un valle a través de una presa o de un dique, almacenando el agua de un río o de un arroyo. Con dichas aguas, se puede abastecer a poblaciones cercanas, producir energía eléctrica o regar terrenos.

**Endémicas:** especies que no se encuentran en ningún otro lugar del planeta.

**Escurrencimiento natural:** es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica.

**Flujo regulado:** flujo en una corriente de agua que ha sido regulado por estructuras de control o derivaciones.

**Funciones ecosistémicas:** funciones que realiza un río en beneficio al ecosistema.

**Huella hídrica:** indicador que define el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos.



**Ictiólogos:** Estudia y describe los peces.

**Llanura de inundación:** es la parte orográfica que contiene un cauce y que puede ser inundada ante una eventual crecida de las aguas de éste.

**Sistema ecosistémicos:** funciones que realiza el río en beneficio al hombre como lo es la recarga de acuíferos.

**Trasvases:** son obras hidráulicas cuya finalidad es la de incrementar la disponibilidad de agua en una población adicionando agua desde una cuenca vecina.



## Referencias

(WWF), W. W. F., 2007. *World's top 10 rivers at risk*, World Wildlife Fund International, Gland, Switzerland. s.l.:s.n.

ANONIMO[A], 2016. *Western Spotted*. [En línea]  
Available at: <http://hapa.dvrlists.com/western-spotted/>

ANONIMO[B], 2016. *naturalista*. [En línea]  
Available at: <http://www.naturalista.mx/observations/458457>

Aparicio, F. J., 2001. *fundamentos de Hidrologia de superficie*. Mexico, D.F.: Limusa.

Arthington, A. H., 2012. *environmental Flows Saving river in third millennium*. London: s.n.

avespr, 2016. [En línea]  
Available at: <http://avespr.org/speciesinfo.php?spid=377&la=es&picID=9214>

Bravo, I. L., Chávez, S. J. & Ramírez, L. O., 2000. *EVALUACIÓN INTEGRAL DE LA CUENCA DEL RÍO BRAVO USANDO*. [Arte] (IMTA).

Brisbane, 2007. *Declaración de Brisbane*. s.l.:s.n.

Burt, C. & Styles, S, 2000. *Irrigation District Service in the Western United States*, s.l.: American Society of Civil Engineers.

Bustillo 2011, S., s.f. *El agua en la frontera Mexico-Estados Unidos*. [Arte] (Revista Araucaria ).

Bustillos, S. D., s.f. *El agua en la frontera*. Mexico: s.n.

Cantopajaros, 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.canto-pajaros.es/pardillo-piquigualdo>

CILA, 1944. *Estudio binacional relativo a la presencia de sustancias tóxicas en el río Bravo/ río p. 1-9.*

CILA & SRE, 1964. *Cumbre Binacional del Río Bravo documento base*. [En línea]  
Available at: <http://www.cila.gob.mx/home/newwp/DocBase.pdf>

CNA, 2003. *Programa Hidraulico Regional Region VI Rio Bravo*. s.l.:s.n.



CONAGUA [A], 2012. *Atlas Digital del Agua Mexico*. [En línea]  
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html>

CONAGUA [B], 2012. *Atlas Digital del Agua Mexico*. [En línea]  
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo20.html>

CONAGUA [C], 2012. *Programa Hidrico Nacional 2030*. Mexico: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, 2010. *Comision Nacional del Agua*. [En línea]  
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/ocrb/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=4dc3d216-7c19-46d7-beb4-fd894b4c6ddb%7CCon%3%B3cenos%7C1%7C0%7C0%7C0%7C0>

CONAGUA, 2., 2015. *Actualizacion de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Bajo Rio BRavo(2801) Estado de Tamaulipas*. [Arte] (CONAGUA).

CONAGUA, SEMARNAT & IMTA, 2013. *Programa de medidas preventivas y mitigacion de la sequía Consejo de cuenca del Río Bravo*, MEXICO: s.n.

Cravioto y Lowry, 1944. *Runoff of the conchos river*, s.l.: s.n.

Cravioto, 1946. *rrunof of the conchos river at ojinaga under present and future conditions*, s.l.: s.n.

Cravioto, E., 1946. *rrunof of the conchos river at ojinaga under present and future conditions*, C. juarez Chihuahua: s.n.

Cravioto, E. & Lowry, 1944. *runoff of the conchos River at Ojinaga under present and future conditions*, s.l.: s.n.

Dyson M.J, G. Bergkamp & J.Scanlon, 2003. *Caudal UICN.U.K*. s.l.:s.n.

Enriquez Coyro, E., 1975. *El tratado entre Mexico y Estados Unidos de America sobre rios internacionales*, s.l.: CONAGUA.

Flickriver, 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.flickriver.com/photos/tags/easternredbat/>

Geoenciclopedia, 2016. *Rio Bravo*. [En línea]  
Available at: <http://www.geoenciclopedia.com/rio-bravo/>



Hoth, J., Rodriguez, A. & de la maza, M., 2010. *Cuenca Transfronteriza del Rio Bravo/Grande*. [Arte] (INECC 2010).

INEGI, 2000. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. s.l.:s.n.

Mary E. Kelly, 2001. *El Rio Conchos: Un informe preeliminar*, Texas: TCPS.

Miguel, D. A. d. S., s.f. [En línea]  
Available at: <https://conveniosanmiguel.wordpress.com/2014/01/22/informe-salida-de-campo-ii/>

morcegos, 2016. [En línea]  
Available at: [http://morcegosdobrasil.blogspot.com/2013\\_07\\_01\\_archive.html](http://morcegosdobrasil.blogspot.com/2013_07_01_archive.html)

Nacional, L. H., s.f. [En línea]  
Available at: <http://lahora.com.ec/index.php/noticias/show/1101420531#.WAFcWPhC00>

naturalista, 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.naturalista.mx/observations/2370817>

OAS, 2008. *Organization of American States*. [En línea]  
Available at: [http://www.oas.org/dsd/WaterResources/projects/RioBravo\\_esp.asp](http://www.oas.org/dsd/WaterResources/projects/RioBravo_esp.asp)

Orive, 1945. *Informe tecnico sobre el tratado internacional de aguas*, s.l.: Comision Nacional de Irtigacion.

pcman, 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.pcma.com.ar/tadarida.html>

Planet, M., 2016. [En línea]  
Available at: <http://www.planet-mamiferes.org/drupal/en/node/64?choixzone=&input2=Baja+California&plus=0&fin=5>

Postel & Richter, 2003. *Rivers for life*. s.l.:ISLAND PRESS.

Presas, C. N. d., 2000. s.l.: s.n.

Rendon P., L., 2011. *CONAGUA, SEMARNAT Tratado sobre aguas internacionales*. Mexico: s.n.

Richter, S. P. & B., 2003. where have all the rivers gone. En: *Rivers for life*. s.l.:Island Press, p. 2.



Rios, s.f. [En línea]  
Available at:

<http://www.robinsonlibrary.com/america/uslocal/gulf/texas/regions/graphics/bigbend.jpg>

Sandoval S., S., 2011. *Water Planning and Management for Large Scale River Basins Case of Study: the Rio Grande/Rio Bravo Transboundary Basin*. Texas: s.n.

Sergi Sebat, J. C. D. A. G. & A. E., 2009. El río como ecosistema. p. Fundacion BBVA.

Tapety, s.f. [En línea]  
Available at: [http://tapety.tja.pl/tapeta\\_118694](http://tapety.tja.pl/tapeta_118694)

Tharme, 2013. *A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers*. [En línea]  
Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.736/abstract>

Tharme & R.E, 2003. *A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers*. *River Research and Applications 2003*. s.l.:<http://doi.wiley.com/10.1002/rra.736>.

USGS, 2016. [En línea]  
Available at: <http://nas.er.usgs.gov/queries/factsheet.aspx?SpeciesID=750>

Valley, T. R. G., s.f. [En línea]  
Available at: <http://cookfamilyhome.com/mar2007.htm>

Watercourse, T., 2001. *Descubre una cuenca Río Grande/Río Bravo*. Montana: s.n.

wikipedia, s.f. *area de proteccion de flora y fauna*. [En línea]  
Available at:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea\\_de\\_protecci%C3%B3n\\_de\\_flora\\_y\\_fauna\\_Ca%C3%B1%C3%B3n\\_de\\_Santa\\_Elena](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea_de_protecci%C3%B3n_de_flora_y_fauna_Ca%C3%B1%C3%B3n_de_Santa_Elena)

WWF, 2016. *World Wildlife Fund*. [En línea]  
Available at:  
[http://wwf.panda.org/about\\_our\\_earth/about\\_freshwater/freshwater\\_problems/river\\_decline/10\\_rivers\\_risk/rio\\_grande\\_bravo/](http://wwf.panda.org/about_our_earth/about_freshwater/freshwater_problems/river_decline/10_rivers_risk/rio_grande_bravo/)



Yazmin Paola Iñiguez Ayon, C. A. P. S. & S. E. S. A., 2015. urban waterway ecosystem: Ecological and visual evaluation of the Tamazula River, located in Culiacán, Sinaloa.. *Quivera, Universidad Autonoma del Estado de Mexico.*





# Anexos

## Anexo 1. Caudal regulado mensual Río Conchos

Caudal regulado mensual calculado para el Río Conchos millones de metros cúbicos														
Año	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1906	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913
Enero	0	13.7	13.8	27.1	13.6	55.0	109.8	47.1	49.2	38.0	89.7	2.8	46.3	22.6
Febrero	0	21.5	7.7	79.0	8.4	53.3	230.7	27.1	28.4	31.8	41.2	11.8	34.1	83.9
Marzo	0	15.0	4.5	33.3	5.8	55.5	97.9	14.9	13.6	15.4	23.2	8.3	23.9	118.0
Abril	0	3.0	1.8	9.5	1.9	34.3	30.2	7.1	6.4	17.9	22.7	12.8	6.9	13.4
Mayo	17.0	1.7	0.8	8.3	6.4	27.0	19.0	14.2	5.3	24.8	11.8	67.8	10.9	16.9
Junio	20.5	4.9	3.5	59.1	48.1	66.8	36.9	31.4	9.8	38.8	58.2	289.3	8.7	46.3
Julio	336.0	65.3	405.8	34.4	47.0	238.2	687.2	80.2	91.5	384.8	159.4	275.4	21.2	32.5
Agosto	466.9	100.9	424.8	118.5	70.3	502.9	1337.1	168.6	429.1	494.9	54.2	186.9	376.9	83.6
Septiembre	199.0	128.6	774.0	178.4	1804.9	550.2	534.2	436.5	479.6	452.5	155.4	309.9	733.3	176.6
Octubre	116.7	80.0	98.7	148.2	493.1	352.4	139.2	101.6	41.5	71.8	39.4	203.2	214.7	26.6
Noviembre	30.1	32.5	41.2	28.7	129.6	310.3	56.9	316.6	30.6	33.5	18.2	131.0	51.9	5.0
Diciembre	18.0	16.6	36.8	19.1	120.7	322.9	53.3	302.7	36.9	74.0	6.3	74.9	40.6	5.8
Anual	1204.2	483.9	1813.2	743.5	2749.7	2568.8	3332.5	1548.0	1221.7	1678.3	679.8	1574.1	1569.5	631.3

## Anexo 2. Caudal regulado calculado por Eduardo Cravioto y Robert L. Lowry en Mayo de 1944

Escurrimiento Del Río Conchos en Ojinaga, Chihuahua (millones de metros cúbicos)													
Año	Ene.	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1900	34.2	42.8	27.5	10	15.9	19	333	466.3	197.4	116.2	30.1	18	1310.4
1901	13.7	21.5	15.1	3	1.5	3.8	64.4	99.8	127	77.8	32.1	16.6	476.3
1902	13.8	7.7	4.4	1.8	0.8	2.5	404.6	424.3	773.4	97.8	41.2	36.8	1809.1
1903	27.2	78.9	33.4	9.3	6.8	58.4	31.2	117.4	177.6	146.8	28.6	19.1	734.7
1904	13.6	8.4	5.8	1.9	6.4	47.2	46.1	69.6	1800.9	492.2	129.5	120.9	2742.5
1905	55	53.3	54.3	34.8	26	65.9	236.8	502	550.2	351.6	309.6	321.9	2561.4
1906	110	230.7	97.7	30.5	16.2	28.9	687.1	1332.2	534.1	138.1	56.8	53.5	3315.8
1907	47.1	27.1	14.3	4	12.5	30.1	78.3	166.5	435.4	100.8	317	303.5	1536.6
1908	49.2	28.5	12.4	1.6	4.9	9	90.3	426.8	478.6	40.6	30.6	36.8	1209.3
1909	38	31.8	15.4	12.4	24.8	35	383.6	494.6	451.5	70.9	33.6	74	1665.6
1910	89.7	42.2	31.1	22.6	1.4	57.4	159.1	53.5	154.2	38.6	18.2	6.3	664.3
1911	2.7	11.9	7.9	13.1	65.5	271.4	283.7	186.3	308.4	202.3	130.7	74.5	1558.4
1912	46.1	34	23.1	6.3	10	7.9	18	376.2	732.7	213.4	51.8	39.4	1558.9
1913	22.6	84	118	13.4	16	45.6	32.1	82.8	176.4	25.8	5	5.9	627.6



*Anexo 3. Temperaturas de los distritos de riego para el Río Conchos*

	<i>Bajo Río Conchos Ojinaga (DR-090) (PRISM) °C</i>											
<b>Año</b>	<i>ene</i>	<i>feb</i>	<i>marz</i>	<i>abril</i>	<i>may</i>	<i>jun</i>	<i>jul</i>	<i>ago</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>nov</i>	<i>dic</i>
<b>1899</b>	9.2	10.2	18.1	22.3	26.6	30.5	30.2	30.8	27.8	22.1	15.9	11
<b>1900</b>	11.9	12.8	18.6	20.2	26.7	31.8	30.7	31	28.3	23.4	16.6	11.2
<b>1901</b>	12.5	12.8	17.8	21.8	28.1	32.1	31.8	31.4	28.1	23.3	17	11.2
<b>1902</b>	10.9	13.8	17.1	24.6	28.3	32.5	29.9	30.7	26.7	22.3	16.5	11.3
<b>1903</b>	11	10.5	16.2	22.6	25.2	27.4	31	30.2	27.3	21	16.3	10.9
<b>1904</b>	10.3	16.4	20.7	23	26.6	29.5	29.8	29.6	26.4	21.3	14.5	10.9
<b>1905</b>	10.7	10.2	18.5	20.3	26.8	30.1	29.4	30.4	28	21.2	16	8.2
<b>1906</b>	10.4	12.9	17	21.8	26.4	30.5	28.6	28	27	19.9	14	13.6
<b>1907</b>	14.1	16.2	20.9	22.3	24.1	29.6	30.2	30.9	28.1	22	13.6	12.3
<b>1908</b>	11.2	13.7	20.4	22.2	26.1	30.6	29	29	26.5	21.1	15.4	12.5
<b>1909</b>	14.1	14.7	17.5	22.5	26.2	31.1	31.4	30.1	26.7	22.4	18.3	8.5
<b>1910</b>	11.8	12.7	21	22.6	27	31.2	32.2	31.7	29.1	22	17.1	12
<b>1911</b>	14.6	14	19.9	22.3	26.8	30.5	30	30.8	29.6	22.1	13.9	8.9
<b>1912</b>	10.8	11.9	16.6	20.8	27.1	29.4	30.9	30.3	26.3	21.2	14.8	9.2
<b>1913</b>	9.8	12.1	15.8	21.3	27.5	28.1	30.1	29.9	25	20.8	17.2	9.6
<b>1914</b>	13.8	13.1	16.2	22.6	26.8	29.3	30.3	29.5	27.2	21.9	16.5	9.1
<b>1915</b>	9.5	13.8	13.9	21.6	26	31	30.9	28.9	27.4	22.1	16.6	12.1
<b>1916</b>	14.1	16.2	20.7	21.8	27.7	32.8	30.4	28.9	26.6	22.2	14.2	10.7
<b>1917</b>	11.7	15	16.9	21.8	24.6	30.5	31.6	30.8	27.2	21.9	16.4	11.9
<b>1918</b>	8.2	15.8	19.2	21.1	26.7	30.4	31.2	29.7	25.9	22.1	14.4	9.5
<b>1919</b>	8.6	12.7	16.6	22.5	25.8	28.1	29.4	30.2	26.9	23.3	15.9	11.2
<b>1920</b>	10.4	15.6	16.5	20.2	27	28.6	30.5	28	27.6	21.1	14.7	10.5
<b>1921</b>	12.3	14	19.6	20.7	26.6	28.7	29.7	30.3	29.3	23.2	16.5	13.6
<b>1922</b>	9.8	14.7	16.5	21.8	26.8	28.5	30.4	30.9	27.7	21.4	14.2	12.3
<b>1923</b>	14.1	12.7	15.2	21.1	26.8	30.5	29.7	29.4	27.4	22.6	14.7	10.3
<b>1924</b>	9.1	13.1	14	20.8	23	31.9	30.8	31.6	26.7	21.1	15.8	9.4
<b>1925</b>	9.3	15.8	18.4	23.6	27.3	30.5	29.8	29	26	22.7	14.7	8.8
<b>1926</b>	9.5	15.4	14.1	20.8	25.4	30.6	30.9	29.6	28.5	23.4	16.1	11.5
<b>1927</b>	12.1	16.3	17.6	22.8	29.6	30.5	30.3	30.4	27.3	21.3	18	7.7
<b>1928</b>	10.5	13.4	19.1	19.8	25.8	32	31.2	28.4	24.5	23.6	13.4	11.3
<b>1929</b>	10.5	12.8	16.5	22.7	25.1	31	30.5	29.7	28.3	22.4	12.2	12.6
<b>1930</b>	8.4	15.4	15.8	24.1	25.5	29.8	30.4	29.6	28.9	22.4	13.4	9.3
<b>1931</b>	8.4	12.5	14.6	18.6	24.3	29	29.6	29	29.3	23.7	15.7	10.5
<b>1932</b>	8.3	14.3	13.6	21	25.8	30.7	29.9	29	23.3	19.2	12.7	8.7
<b>1933</b>	9.9	11.8	16.9	19.3	25.1	29.1	29.8	29.7	28.5	22.8	15.3	13.4
<b>1934</b>	9.2	14.3	16.2	22.1	26.6	31.1	29.9	30.3	27.5	23.4	16.9	11.8



1935	11.2	11.5	18.1	21.5	24.4	29.2	29.8	29.7	24.8	22.1	15.3	10.2
1936	8.5	12.5	17	22	24.8	29.9	29	28.4	25.4	20.8	12.6	9.9
1937	9.2	12.1	14.6	22.6	26	29.6	29.9	30.1	26.5	22.9	13.5	9.9
1938	10.1	14.9	17.2	21.2	25	28.6	27.9	28.4	25.9	23.5	12.9	11.5
1939	9.5	10.3	17.2	22.6	25.2	30.1	29.5	27.5	28.1	20.9	12.4	10.8
1940	8.4	12.6	17.4	20.8	25.5	28.1	30.3	28.3	26.9	22	14.5	12.9
1941	10.7	14.3	15.4	21.2	25.8	28.4	29	28.8	27.2	22.4	14.4	10.7
1942	10.3	12.8	15	21.4	26.7	30.8	30.7	29.1	25.5	21.8	16.8	12
1943	10.3	14.8	17.6	24.1	27	30.1	29.3	31.6	26	21.7	15	10.1
1944	9.4	15.1	16	21.9	26.5	30.8	30.1	29.9	25.8	21.7	14.5	10
1945	11.7	13.7	17.7	20.1	25.9	29.7	28.9	29.7	28.1	19.9	14.8	11.5

	Delicias (DR-005) (ERIC III) °C											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1899	2.7	3.2	9.1	13.3	18.0	21.8	21.0	21.0	18.3	13.0	7.3	3.7
1900	3.9	5.0	9.3	11.7	18.0	23.0	21.3	21.2	18.6	13.7	7.6	3.8
1901	4.2	5.0	8.9	12.9	18.8	23.2	22.0	21.4	18.5	13.6	7.7	3.8
1902	3.5	5.6	8.7	15.0	18.9	23.6	20.9	21.0	17.6	13.1	7.5	3.9
1903	3.5	3.4	8.3	13.5	17.2	19.2	21.5	20.7	18.0	12.4	7.5	3.7
1904	3.2	7.4	10.1	13.8	18.0	21.0	20.8	20.3	17.4	12.6	6.9	3.7
1905	3.4	3.2	9.2	11.8	18.1	21.5	20.6	20.8	18.4	12.5	7.4	2.6
1906	3.2	5.0	8.6	12.9	17.8	21.8	20.1	19.3	17.8	11.8	6.7	4.8
1907	4.9	7.3	10.2	13.3	16.5	21.1	21.0	21.1	18.5	12.9	6.6	4.3
1908	3.6	5.6	10.0	13.2	17.7	21.9	20.3	19.9	17.5	12.5	7.2	4.3
1909	4.9	6.3	8.8	13.5	17.7	22.4	21.8	20.6	17.6	13.1	8.2	2.8
1910	3.8	4.9	10.3	13.5	18.2	22.4	22.3	21.6	19.1	12.9	7.8	4.1
1911	5.1	5.8	9.8	13.3	18.1	21.8	20.9	21.0	19.4	13.0	6.7	2.9
1912	3.4	4.3	8.4	12.2	18.2	20.9	21.5	20.7	17.3	12.5	7.0	3.0
1913	3.0	4.5	8.1	12.6	18.5	19.8	21.0	20.5	16.5	12.3	7.8	3.2
1914	4.7	5.2	8.3	13.5	18.1	20.8	21.1	20.2	17.9	12.9	7.5	3.0
1915	2.8	5.6	7.3	12.8	17.6	22.3	21.5	19.8	18.0	13.0	7.6	4.2
1916	4.9	7.3	10.1	12.9	18.6	23.8	21.2	19.8	17.5	13.0	6.8	3.6
1917	3.8	6.5	8.6	12.9	16.8	21.8	21.9	21.0	17.9	12.9	7.5	4.1
1918	2.3	7.0	9.5	12.4	18.0	21.8	21.7	20.3	17.1	13.0	6.8	3.2
1919	2.4	4.9	8.4	13.5	17.5	19.8	20.6	20.7	17.7	13.6	7.3	3.8
1920	3.2	6.9	8.4	11.7	18.2	20.2	21.2	19.3	18.1	12.5	6.9	3.5
1921	4.1	5.8	9.7	12.1	18.0	20.3	20.7	20.7	19.2	13.6	7.5	4.8
1922	3.0	6.3	8.4	12.9	18.1	20.1	21.2	21.1	18.2	12.6	6.8	4.3
1923	4.9	4.9	7.9	12.4	18.1	21.8	20.7	20.1	18.0	13.2	6.9	3.5



1924	2.7	5.2	7.4	12.2	15.9	23.1	21.4	21.5	17.6	12.5	7.3	3.1
1925	2.8	7.0	9.2	14.3	18.4	21.8	20.8	19.9	17.2	13.3	6.9	2.9
1926	2.8	6.8	7.4	12.2	17.3	21.9	21.5	20.3	18.7	13.7	7.4	3.9
1927	4.0	7.4	8.9	13.7	19.7	21.8	21.1	20.8	18.0	12.6	8.1	2.4
1928	3.3	5.4	9.5	11.4	17.5	23.1	21.7	19.5	16.2	13.8	6.5	3.9
1929	3.3	5.0	8.4	13.6	17.1	22.3	21.2	20.3	18.6	13.1	6.1	4.4
1930	2.4	6.8	8.1	14.6	17.3	21.2	21.2	20.3	18.9	13.1	6.5	3.1
1931	2.4	4.7	7.6	10.5	16.7	20.5	20.7	19.9	19.2	13.8	7.3	3.5
1932	2.3	6.0	7.2	12.3	17.5	22.0	20.9	19.9	15.5	11.5	6.3	2.8
1933	3.0	4.3	8.6	11.1	17.1	20.6	20.8	20.3	18.7	13.3	7.1	4.7
1934	2.7	6.0	8.3	13.2	18.0	22.4	23.1	22.9	20.2	18.7	11.0	9.2
1935	4.5	4.1	11.4	14.6	19.1	22.8	23.3	22.5	19.2	15.4	9.0	5.1
1936	3.6	7.1	9.4	14.9	19.8	22.9	22.0	21.3	19.6	13.7	7.9	5.0
1937	5.1	6.9	9.1	14.4	18.6	24.1	22.6	23.6	19.6	14.0	8.7	5.5
1938	5.5	8.5	11.2	12.9	18.6	22.9	21.4	20.9	17.3	14.4	7.5	3.9
1939	3.9	4.1	11.1	14.2	20.1	24.1	23.4	21.7	19.9	15.1	10.2	7.5
1940	3.8	6.0	10.3	14.0	20.5	23.2	23.4	21.8	19.8	15.3	8.5	7.1
1941	4.9	7.7	8.5	13.0	20.1	22.6	23.2	21.7	20.4	16.0	9.1	5.8
1942	5.2	8.5	9.1	15.2	21.9	25.0	23.1	21.3	18.3	14.4	9.7	4.1
1943	5.0	8.9	11.3	16.7	21.5	24.0	22.6	23.7	19.9	13.6	8.5	6.8
1944	5.7	11.0	11.8	14.2	17.9	22.1	21.0	22.1	17.5	14.0	10.7	3.1
1945	3.8	7.6	11.9	15.6	22.0	25.8	23.0	23.5	19.9	15.3	9.4	3.1

	Río Florido (DR-103) (ERIC III) °C											
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1899	2.2	1.7	8.6	13.6	18.2	21.6	20.9	20.7	17.9	12.8	7.2	3.5
1900	3.9	4.0	8.9	13.0	18.2	22.5	21.2	20.8	18.1	13.1	7.4	3.6
1901	4.2	4.0	8.4	13.5	18.9	22.8	21.9	21.0	18.0	13.1	7.6	3.6
1902	3.2	4.9	7.9	14.3	19.0	23.1	20.7	20.6	17.6	12.8	7.4	3.6
1903	3.3	1.9	7.4	13.7	17.4	19.2	21.4	20.4	17.8	12.5	7.3	3.4
1904	2.9	7.2	10.2	13.8	18.2	20.8	20.7	20.1	17.4	12.6	6.7	3.4
1905	3.1	1.7	8.8	13.0	18.3	21.3	20.4	20.5	18.0	12.6	7.2	2.1
1906	2.9	4.1	7.9	13.5	18.1	21.6	20.0	19.3	17.7	12.3	6.5	4.8
1907	5.3	7.0	10.3	13.6	16.8	20.9	20.9	20.7	18.0	12.8	6.3	4.1
1908	3.4	4.8	10.0	13.6	17.9	21.6	20.2	19.8	17.5	12.6	7.0	4.2
1909	5.3	5.7	8.2	13.7	17.9	22.0	21.6	20.3	17.6	12.9	8.0	2.3
1910	3.8	3.9	10.4	13.7	18.4	22.1	22.1	21.1	18.4	12.8	7.6	4.0
1911	5.6	5.1	9.7	13.6	18.3	21.6	20.8	20.7	18.6	12.8	6.4	2.5
1912	3.2	3.2	7.6	13.2	18.4	20.7	21.3	20.4	17.4	12.6	6.8	2.6