



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLOGÍCO EN LA ZONA NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

## TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

OSCAR MARIO SALAS RODRIGUEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARIO REBOLLEDO VIEYRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

Ciudad Universitaria, Cd. MX., Marzo

2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
DEFINICIONES Y ABREVIATURAS .....	IX
AGRADECIMIENTOS .....	XIII
INTRODUCCION .....	1
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>3</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	4
1.2. Justificación .....	4
1.1. Hipótesis.....	4
1.2. Objetivos.....	5
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>7</b>
2.1. Estudios previos .....	7
2.2. Balance hídrico.....	14
2.2.1. Precipitación.....	15
2.2.2. Evapotranspiración.....	15
2.2.3. Infiltración.....	16
2.3. Balance subterráneo .....	17
2.3.1. Entradas .....	18
2.3.1.1. Recarga vertical (Rv).....	18
2.3.1.2. Flujo subterráneo horizontal (Entrada).....	19
2.3.2. Salidas .....	19
2.3.2.1. Evapotranspiración subterránea ETR .....	19
2.3.2.2. Bombeo .....	20
2.3.2.3. Flujo subterráneo horizontal (Salida) .....	20
2.3.3. Cambio de almacenamiento .....	20
2.4. Escenarios de cambio climático.....	21
2.4.1. Escenarios de cambio climático.....	22
2.4.2. Modelos circulación general (MCG).....	23
<b>3. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>27</b>



<b>3.1.</b>	<b>Área de estudio .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.</b>	<b>Medio físico .....</b>	<b>31</b>
3.2.1.	Clima.....	31
3.2.2.	Edafología.....	32
3.2.3.	Vegetación .....	34
3.2.4.	Hidrografía .....	35
3.2.5.	Fisiografía .....	37
3.2.6.	Geología .....	38
3.2.7.	Hidrogeología.....	43
3.2.7.1.	Piezometría .....	46
3.2.7.2.	Parámetros hidráulicos.....	51
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.</b>	<b>Balance superficial.....</b>	<b>55</b>
4.1.1.	Delimitación de estaciones climatológicas .....	56
4.1.1.1.	Contenido de la información de las estaciones .....	56
4.1.1.2.	Generación de información faltante .....	56
4.1.2.	Análisis de precipitación y temperatura.....	58
4.1.3.	Cálculo de evapotranspiración potencial.....	59
4.1.1.	Estimación de la humedad a capacidad de campo.....	60
4.1.1.1.	Método de Green-Ampt .....	60
4.1.2.	Método de Thornthwaite .....	65
<b>4.2.</b>	<b>Balance subterráneo .....</b>	<b>67</b>
4.2.1.	Delimitación de los aprovechamientos subterráneos.....	68
4.2.2.	Cálculo del flujo lateral .....	68
4.2.3.	Evapotranspiración subterránea .....	69
4.2.4.	Extracción .....	69
4.2.5.	Cambio de almacenamiento .....	70
4.2.6.	Recarga .....	70
<b>4.3.</b>	<b>Calibración de la recarga .....</b>	<b>71</b>
<b>4.4.</b>	<b>Escenarios de cambio climático.....</b>	<b>71</b>



---

4.4.1.	Obtención de la información de los escenarios .....	71
4.4.2.	Estimación de la recarga con base en los escenarios .....	74
<b>4.5.</b>	<b>Variación de la recarga bajo distintos escenarios .....</b>	<b>75</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1.</b>	<b>Balance superficial.....</b>	<b>77</b>
5.1.1.	Delimitación de las estaciones climatológicas .....	77
5.1.2.	Análisis de la precipitación .....	78
5.1.3.	Evapotranspiración potencial.....	82
5.1.4.	Capacidad de campo.....	84
5.1.5.	Resultados del balance superficial.....	91
<b>5.2.</b>	<b>Balance subterráneo .....</b>	<b>95</b>
5.2.1.	Ubicación de aprovechamientos subterráneos .....	95
5.2.2.	Hidrógrafos .....	99
5.2.3.	Flujo lateral .....	102
5.2.4.	Evapotranspiración subterránea (ETS) .....	104
5.2.5.	Extracción .....	105
5.2.6.	Cambio de almacenamiento .....	106
5.2.7.	Resultado del balance subterráneo.....	107
<b>5.3.</b>	<b>Recarga directa .....</b>	<b>108</b>
5.3.1.	Calibración de la recarga.....	108
<b>5.4.</b>	<b>Proyecciones climáticas .....</b>	<b>109</b>
5.4.1.	Escenario RCP 4.5.....	109
5.4.2.	Escenario RCP 8.5.....	113
<b>5.5.</b>	<b>Balance hídrico considerando los escenarios de cambio climático.....</b>	<b>118</b>
<b>5.6.</b>	<b>Comparación de los volúmenes de recarga.....</b>	<b>125</b>
5.6.1.	Análisis de los horizontes calculados.....	128
<b>5.7.</b>	<b>Análisis de resultados.....</b>	<b>133</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>137</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>139</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de humedad durante la infiltración. Fuente: Chow, 1994. ....	17
Figura 2. Calculo del flujo horizontal. Fuente: Conagua, 2002. ....	19
Figura 3. Relación evapotranspiración profundidad. Fuente: Conagua, 2002. ....	20
Figura 4. Resumen de los experimentos de larga duración del CMIP5. Fuente: <a href="http://escenarios.inecc.gob.mx/">http://escenarios.inecc.gob.mx/</a> . ....	22
Figura 5. Modelos climáticos. Fuente: Atlas climático. ....	25
Figura 6. Estado de Quintana Roo. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Google, 2015. ....	27
Figura 7. Distribución municipal del Estado de Quintana Roo. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: INEGI. ....	28
Figura 8. Delimitación de la zona de Sian Kaán y la zona fracturada del lineamiento El Ideal. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Bauer et al. (2011). ....	30
Figura 9. Delimitación del área de estudio. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración Propia. ....	31
Figura 10. Clima dentro del estado de Quintana Roo. Fuente: CONABIO. ....	32
Figura 11. Distribución de los tipos de suelo del estado de Quintana Roo. Fuente: INEGI. ....	33
Figura 12. Regiones hidrológicas (RH) dentro de la Península. Lineas azules delgadas, indican ríos. Lineas más Guesas azules, indican el limite entre RH. Fuente: CONAGUA, 2012. ....	36
Figura 13. Estratigrafía de la Península de Yucatán. Fuente: CONAGUA, 2002. ....	39
Figura 14. Desarrollo de acuíferos en sistemas kársticos. Fuente: Programa de monitoreo, 2005. ....	44
Figura 15. Unidades hidrogeológicas en la península de Yucatán. Fuente: Conagua 2002. ....	45
Figura 16. Direcciones de flujo de agua subterránea de acuerdo a Perry y otros (2002). ....	46
Figura 17. Ubicación de los aprovechamientos subterráneos. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: REPDA. ....	47
Figura 18. Ubicación de la red de monitoreo Cancún-Tulum. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Conagua. ....	48
Figura 19. Elevación del nivel estático. Valores expresados en metros. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia. ....	50
Figura 20. Diagrama ternario de textura de suelo. ....	62
Figura 21. Relación ETS vs profundidad del agua. Fuente: Conagua, 2002. ....	69
Figura 22. Atlas Climático. Fuente: <a href="http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/">http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/</a> . ....	72
Figura 23. Pestaña del cambio climático. Fuente: UNAM. ....	72
Figura 24. Descarga de datos climatológicos. Fuente: UNAM. ....	73
Figura 25. Descarga de la base de datos. Fuente: UNAM. ....	73
Figura 26. Digitalización de los valores dentro del programa de computo. ....	74
Figura 27. Ubicación de las estaciones. La nomenclatura y características se muestran en la Tabla 23 (nombre y coordenadas de cada estación). Coordenadas UTM (16Q). Fuente: SMN. ....	78
Figura 28. Lámina de precipitación anual de las estaciones climatológicas. Fuente: Elaboración propia. ....	81



Figura 29. Lámina de precipitación acumulada para el año 2006. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia. ....	82
Figura 30. Comportamiento de la evapotranspiración potencial, estación 23011. Fuente: Elaboración Propia. ....	83
Figura 31. Comportamiento de la arcilla. Fuente: Elaboración Propia. ....	85
Figura 32. Comportamiento del franco arcilloso. Fuente: Elaboración Propia. ....	86
Figura 33. Comportamiento del Franco Arenoso. Fuente: Elaboración Propia. ....	87
Figura 34. Comportamiento del Franco. Fuente: Elaboración Propia. ....	89
Figura 35. Comportamiento del arcillo arenoso. Fuente: Elaboración Propia. ....	90
<b>Figura 36. Configuración de evapotranspiración año 2007. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>92</b>
Figura 37. Ubicación de los aprovechamientos medidos. (La característica de cada estación se muestra en la Tabla 40). Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración Propia. ....	96
<b>Figura 38. Configuración de elevación del nivel estático en marzo 2006. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: elaboración propia. ....</b>	<b>98</b>
Figura 39. Dirección del flujo de agua subterránea. Las líneas equipotenciales se tomaron de la figura anterior. Coordenadas UTM (16Q). ....	98
Figura 40. Hidrógrafo de profundidad de nivel estático vs elevación del nivel estático. Elaboración propia. ....	100
Figura 41. Hidrógrafos precipitación (milímetros) vs pozo zona agrícola (metros). ....	101
Figura 42. Configuración de elevación del nivel estático, en noviembre 2009. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia. ....	102
Figura 43. Dirección del flujo subterráneo. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia. ....	102
Figura 44. Configuración de valores de ETS. Valores expresados en milímetros. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración Propia. ....	105
Figura 45. Configuración de niveles de evolución, 2006-2009. Coordenadas UTM (16Q). Valores expresados en metros. .....	107
Figura 46. Láminas de precipitación resultantes de cada escenario. Fuente: Elaboración propia. ....	124
Figura 47. Láminas de precipitación resultantes de cada escenario. Fuente: Elaboración propia. ....	124
Figura 48. Láminas de precipitación resultantes de cada escenario. Fuente: Elaboración propia. ....	125
Figura 49. Volúmenes resultantes del balance superficial del periodo 1990-2009. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	126
Figura 50. Volumen de excedente (recarga directa) de los datos históricos. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	127
Figura 51. Balance hídrico en las diferentes proyecciones climáticas. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	128
Figura 52. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	129
Figura 53. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	129
Figura 54. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	130
Figura 55. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	130



Figura 56. Comparación de la evapotranspiración en el horizonte 2045-2069. Valores expresados en m <sup>3</sup> .....	131
Figura 57. Comparación del excedente (recarga directa) en el horizonte 2045-2069. Valores expresados en m <sup>3</sup> . .....	131
Figura 58. Comparación de la precipitación en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en m <sup>3</sup> . .....	132
Figura 59. Comparación de la evapotranspiración en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en m <sup>3</sup> .....	132
Figura 60. Comparación del excedente (recarga directa) en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en m <sup>3</sup> . .....	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios previos. Elaboración propia.....	7
Tabla 2. Tipo de precipitación. Fuente: Campos, 1994.....	15
Tabla 3. Nuevos escenarios. Fuente: <a href="http://escenarios.inecc.gob.mx/">http://escenarios.inecc.gob.mx/</a> .....	22
Tabla 4. Modelos generales de circulación. Fuente: Atlas climático.....	25
Tabla 5. Municipios de Quintana Roo. ....	27
Tabla 6. Tipos de uso de suelo. Fuente: INEGI, 2005. ....	29
Tabla 7. Vivienda y urbanización. Fuente: INEGI, 2005. ....	29
Tabla 8. Uso de suelo y vegetación, superficie en has. Fuente: INEGI, 2005. ....	29
Tabla 9. Resumen de los diferentes suelos. Fuente: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2007. ....	33
Tabla 10. Porcentaje de suelo dentro del área de estudio. Fuente: INEGI.....	34
Tabla 11. Uso de suelo y vegetación. Fuente: INEGI. ....	35
Tabla 12. Hidrografía municipal. Fuente: INEGI. ....	37
Tabla 13. Descripción Litológica. Fuente: Conagua, 2002.....	39
Tabla 14. Unidades geomorfológicas. Fuente: EXYCO 1989. ....	42
Tabla 15. Ubicación de pozos la red de monitoreo. UTM zona 16Q. Fuente: CONAGUA, 2002.....	47
Tabla 16. Datos de profundidad del nivel estático (N.E.). Fuente: Conagua. ....	49
Tabla 17. Elevación del nivel estático. Valores expresados en metros. ....	49
Tabla 18. Recopilación de valores de conductividad hidráulica. Fuente: Hydrogeology Jourmar 2012.....	51
Tabla 19. Los valores de la conductividad hidráulica ( K ) como se encuentran en la literatura para las áreas de la Península de Yucatán . ....	52
Tabla 20. Valor del coeficiente Ka establecido según la latitud. Fuente: Aparicio, 1994.....	59
Tabla 21. Parámetros de infiltración de Green-Ampt para .....	62
Tabla 22. Tabla tipo del balance hídrico. Fuente: Elaboración propia.....	66



Tabla 23. Estaciones climatológicas, coordenadas UTM 16Q. Fuente: SMN.....	77
Tabla 24. Lámina de precipitación acumulada anual (1990-1997), (valores expresados en milímetros). Fuente: SMN....	79
Tabla 25. Lámina de precipitación acumulada anual (1998-2005), (valores expresados en milímetros). Fuente: SMN....	79
Tabla 26. Lámina de precipitación acumulada anual (2006-2009), (valores expresados en milímetros). Fuente: SMN....	80
Tabla 27. Valores promedio de precipitación. (Valores expresados en milímetros).....	81
Tabla 28. Láminas de evapotranspiración potencial anual (valores expresados en milímetros). ....	83
Tabla 29. Capacidad de campo, suelo Arcilloso.....	84
Tabla 30. Capacidad de campo, suelo Franco Arcilloso.....	85
Tabla 31. Capacidad de campo, suelo Franco Arenoso.....	86
Tabla 32. Capacidad de campo, suelos Francos.....	88
Tabla 33. Capacidad de campo, suelos Arcillo arenoso.....	89
Tabla 34. Capacidad de campo, suelos Arenosos.....	90
Tabla 35. Balance hídrico de Thornthwaite. Valores expresados en milímetros. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Tabla 36. Valores de evapotranspiración efectiva, (Valores expresados en milímetros). ....	92
Tabla 37. Excedente (Recarga directa) de agua. Calculado en el balance superficial, (Valores expresados en milímetros). .....	93
Tabla 38. Resultados del balance superficial del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	93
Tabla 39. Resultados del balance superficial del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia.....	94
Tabla 40. Información piezométrica, zona Cancún-Tulum. Coordenadas corresponden a la zona UTM 16Q. Fuente: Conagua 2014.....	95
Tabla 41. Elevación del nivel estático, (Valores expresados en metros). ....	97
Tabla 42. Comparativa de la profundidad del nivel estático y la elevación del nivel estático. Valores expresados en metros.....	99
Tabla 43. Comparativa de elevaciones del nivel estático (metros) vs valores de precipitación (milímetros).....	101
Tabla 44. Estimación de gastos y volúmenes de entrada y salida del flujo para marzo 2006.....	103
Tabla 45. Estimación de gastos y volúmenes de entrada y salida del flujo para Nov 2007.....	103
Tabla 46. Valores de evapotranspiración superficial y evapotranspiración subterránea. Valores expresados en milímetros. .....	104
Tabla 47. Volumen de evapotranspiración subterránea anual. Valores expresados en metros cúbicos.....	105
Tabla 48. Evolución de niveles de agua. Valores expresados en metros.....	106
Tabla 49. Cambio de almacenamiento anual. Valores expresados en m <sup>3</sup> /año.....	107
Tabla 50. Balance de agua subterránea. Valores expresados en metros cúbicos.....	108
Tabla 51. Comparativa de los valores de recarga. Valores expresados en m <sup>3</sup> .....	109
Tabla 52. Porcentaje del cambio de precipitación.....	109



Tabla 53. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.....	110
Tabla 54. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.....	110
Tabla 55. Porcentaje del cambio de precipitación. ....	111
Tabla 56. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.....	111
Tabla 57. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.....	112
Tabla 58. Porcentaje del cambio de precipitación. ....	112
Tabla 59. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.....	113
Tabla 60. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.....	113
Tabla 61. Porcentaje del cambio de precipitación dentro del escenario RCP 8.5.....	114
Tabla 62. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.....	114
Tabla 63. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.....	115
Tabla 64. Porcentaje del cambio de precipitación. ....	115
Tabla 65. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.....	116
Tabla 66. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.....	116
Tabla 67. Porcentaje del cambio de precipitación. ....	117
Tabla 68. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.....	117
Tabla 69. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.....	118
Tabla 70. Balance hídrico de la estación 23011. Valores expresados en milímetros.....	118
Tabla 71. Lámina de precipitación proyectada acumulada. Valores expresados en milímetros.....	119
Tabla 72. Lámina de excedente (recarga directa) de cada estación climatológica. Valores expresados en milímetros..	119
Tabla 73. Lámina de evapotranspiración de cada estación climatológica. Valores expresados en milímetros.....	119
Tabla 74. Lámina de precipitación acumulada. Valores expresados en milímetros. ....	120
Tabla 75. Lámina de evapotranspiración de cada estación climatológica. Valores expresados en milímetros.....	120
Tabla 76. Lámina de excedente (recarga directa) de cada estación climatológica. Valores reportados en milímetros. ...	121
Tabla 77. Volúmenes resultantes del balance hídrico.....	121
Tabla 78. Valores calculados en el balance superficial. Valores expresados en m <sup>3</sup> . ....	122
Tabla 79. Valores calculados en el balance superficial de cada escenario. Valores expresados en metros. ....	122
Tabla 80. Variación del excedente (recarga directa) comparado con la recarga promedio del acuífero.....	125
Tabla 81. Valores estadísticos básicos de los registros históricos utilizados.....	128



## DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

**Acuífero:** Cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

**Agua subterránea:** El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar al material rocoso que está saturado de agua.

**Aguas superficiales:** Son aquellas que se encuentran sobre la superficie del suelo. Se producen por la escorrentía generada a partir de las precipitaciones o por afloramiento.

**Cambio de almacenamiento:** Incremento o decremento del volumen de agua almacenada en la unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo cualquiera.

**Caudal:** Cantidad de agua que lleva una corriente o fluye de un manantial o fuente.

**CC:** Cambio Climático.

**CNRMCM5:** Modelo de circulación global, generado por Centre National de Recherches Mééorologique (CNRM-CERFACS).

**CNRMCM5:** Modelo de Circulacion realizado por Centre National de Recherches Méteorologiques (CNRM-CERFACS)

**Coefficiente de almacenamiento:** Volumen de agua desplazado por una columna del acuífero de superficie unitaria ( $1 \text{ cm}^2$ ).

**Conagua:** Comisión Nacional del Agua.

**Conductividad hidráulica:** Es la facilidad con la que el agua se mueve a través de espacios porosos y fracturas porosas en el suelo o rocas, sujeta a un gradiente hidráulico y condicionado por el nivel de saturación y la permeabilidad del material.

**Descarga natural comprometida:** Fracción de la descarga natural de una unidad hidrogeológica, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a una unidad hidrogeológica.

**Descarga natural:** Volumen de agua que descarga una unidad hidrogeológica a través de manantiales, vegetación, ríos y humedales, o subterráneamente a cuerpos de agua (mares, lagos y lagunas).

**Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica:** Volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

**Efluente:** Es la salida de un flujo de agua de una instalación, planta o de un proceso específico.



**Evapotranspiración:** Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

**Extracción de agua subterránea:** Volumen de agua que se extrae artificialmente de una unidad hidrogeológica para los diversos usos.

**Gasto:** Se define como el volumen de agua que pasa por una sección de un conducto en un determinado tiempo.

**GPS:** Sistema de Posicionamiento Global.

**INECC:** Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

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

**IPCC:** El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.

**Kriging:** Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante.

**NOM:** Norma Oficial Mexicana.

**OMM:** Organización Meteorológica Mundial.

**PNUMA:** Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

**Pozo de abastecimiento:** Pozo de agua que abastece una población, el cual es operado por un municipio o un comité vecinal.

**Pozo:** Es una excavación o túnel vertical realizado sobre la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar una reserva de agua subterránea.

**Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2015\_2039:** Horizonte del periodo 2015-2039, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 4.5, considerando la proyección de la precipitación.

**Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2045\_2069:** Horizonte del periodo 2045-2069, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 4.5, considerando la proyección de la precipitación.

**Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2075\_2099:** Horizonte del periodo 2075-2099, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 4.5, considerando la proyección de la precipitación.

**Pre\_CNRMCM5\_RCP 8.5\_2015\_2039:** Horizonte del periodo 2015-2039, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 8.5, considerando la proyección de la precipitación.



Pre\_CNRMCM5\_RCP 8.5\_2045\_2069: Horizonte del periodo 2045-2069, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 8.5, considerando la proyección de la precipitación.

Pre\_CNRMCM5\_RCP 8.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 8.5, considerando la proyección de la precipitación.

Pre\_REA\_RCP 4.5\_2015\_2039: Horizonte del periodo 2015-2039, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 4.5, considerando la proyección de la precipitación.

Pre\_REA\_RCP 4.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 4.5, considerando la proyección de la precipitación.

Pre\_REA\_RCP 8.5\_2015\_2039: Horizonte del periodo 2015-2039, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 8.5, considerando la proyección de la precipitación.

Pre\_REA\_RCP 8.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 8.5, considerando la proyección de la precipitación.

RCP 4.5: Forzamientos radiactivos o Trayectorias Representativas de Concentraciones con base a la estabilización de emisiones.

RCP 4.5: trayectorias representativas de concentraciones, de emisiones bajas

RCP 8.5: Forzamientos radiactivos o Trayectorias Representativas de Concentraciones con base a un incremento muy alto de emisiones.

RCP 8.5: trayectorias representativas de concentraciones, de emisiones bajas

RCP: Forzamientos radiactivos o Trayectorias Representativas de Concentraciones.

REA: Fiabilidad del Ensamble Ponderado, por sus siglas en inglés.

Recarga total: Volumen de agua que recibe una unidad hidrogeológica, en un intervalo de tiempo específico.

REPDA: Registro Público de Derechos de Agua.

Retornos: Son los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua.

RH: Región hidrológica.

RHA: Región Hidrológica Administrativa.

SIGMAS: Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas.

SMN: Servicio Meteorológico Nacional.

Transmisibilidad: Tasa de flujo bajo un determinado gradiente hidráulico a través de una unidad de anchura de acuífero de espesor dado y saturado.



Unidad hidrogeológica: Conjunto de estratos geológicos hidráulicamente conectados entre sí, cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales subterráneas.

%Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2015\_2039: Horizonte del periodo 2015-2039, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 4.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación histórica.

%Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2045\_2069: Horizonte del periodo 2045-2069, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 4.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 4.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_CNRMCM5\_RCP 8.5\_2015\_2039: Horizonte del periodo 2015-2039, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 8.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_CNRMCM5\_RCP 8.5\_2045\_2069: Horizonte del periodo 2045-2069, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 8.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_CNRMCM5\_RCP 8.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del modelo de circulación global CNRMCM5, dentro del escenario RCP 8.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_REA\_RCP 4.5\_2015\_2039: Horizonte del periodo 2015-2039, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 4.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_REA\_RCP 4.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 4.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_REA\_RCP 8.5\_2015\_2039: Horizonte del periodo 2015-2039, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 8.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.

%Pre\_REA\_RCP 8.5\_2075\_2099: Horizonte del periodo 2075-2099, del ensamble REA, dentro del escenario RCP 8.5, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación.



---

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al posgrado de Ciencias de la Tierra por aceptarme y darme la oportunidad de pertenecer a esta gran comunidad y de poder continuar con mis estudios.

Al CONACYT por la beca entregada para realizar mis estudios de maestría.

A mi Tutor el Dr. Mario Rebolledo por aceptarme como su estudiante y apoyarme con sus consejos y sus conocimientos

A mis tutores, por sus aportes a para la realización de la tesis en especial a la Dr Blanca Prado por su apoyo constante durante este tiempo y al Dr Oscar Escolero por todos sus conocimientos que he adquirido en estos años.

A mi esposa Mariana y mi hijo por estar conmigo apoyándome y ser la mayor motivación que tengo todos los días.



"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLÓGICO EN EL NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO"





## INTRODUCCION

El área de estudio a analizar es nombrada acuífero del Norte de Quintana Roo, con un área de 7,476,504,395 m<sup>2</sup>, abarcando los municipios de Solidaridad, Lázaro Cárdenas, Benito Juárez, Isla Mujeres y Tulum, siendo las ciudades principales Cancún y Playa del Carmen.

El área de estudio pertenece a la región hidrológica 32, entre sus características hidrológicas principales es que, teniendo una elevada precipitación en la región, carece de escurrimientos superficiales de gran magnitud esto debido a su alta capacidad de infiltración. Dentro de su geología se tienen como características principales que está formado por rocas sedimentarias que fueron originadas en los periodos Paleogeno y Cuaternario, en los últimos 66 millones de años.

Debido a lo antes mencionado es importante resaltar que la fuente principal de aprovechamiento es el agua subterránea la cual es fundamental para el desarrollo de la región.

Considerando la importancia de la recarga vertical en el comportamiento de los niveles de agua del acuífero se determinó calcula dicha recarga mediante el método del balance hídrico realizado por Thornthwaite (Remeneiras, 1972), donde utilizando láminas de precipitación y la temperatura se determina las láminas de evapotranspiración y el excedente que será considerado como la recarga.

La validación del método Thornthwaite, fue estimado mediante la comparación de los valores de recarga vertical tanto en el balance hídrico superficial y en el balance de agua subterránea. Una vez calibrada la recarga Una vez calibrada la recarga, se obtuvo el valor de la capacidad de campo de cada estación climatológica y se recalcularon las láminas para posteriormente, calcular los volúmenes de precipitación, evapotranspiración y excedente (recarga) en el balance superficial.

Una vez calibrado el balance hídrico, se calculó la recarga con base en los horizontes de los dos escenarios de cambio climático seleccionados RCP 4.5 y RCP 8.5, determinando las láminas de precipitación y temperatura de los mapas de las proyecciones climáticas. Obteniendo los valores de Precipitación, Evapotranspiración y Recarga en cada estación climatológica.

Con los resultados del balance superficial se determino el comportamiento histórico de los parámetros de Precipitación, Evapotranspiración y Excedente (Recarga) en el periodo de 1990 al 2009. Dichos resultados fueron la base para determinar la variación de la recarga de los escenarios del modelo de circulación RCP 4.5 y RCP 8.5, en los horizontes (2015-2039), (2045-2069) y (2075-2099).



"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLÓGICO EN EL NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO"





## 1. GENERALIDADES

El Estado de Quintana Roo, se ubica en la parte suroeste de la República Mexicana, se caracteriza por su superficie donde no existen grandes elevaciones topográficas. En su hidrología superficial, sabemos que no existen grandes escurrimientos en la región; el cauce principal es el Río Hondo que se encuentra al sur del estado; en la parte central y norte no se tiene ningún tipo de escurrimiento superficial. Las principales fuentes de aprovechamientos de agua son los afloramientos superficiales, como las dolinas (conocidos en la región como "cenotes") y pozos perforados para el suministro del agua. (Conagua, 2002)

Al no encontrarse escurrimientos en la zona, se asume que el agua que precipita, y no llega a evapotranspirar, se infiltra. Es importante conocer cuál es la tasa de infiltración en la región y determinar la influencia de los suelos en el proceso.

El comportamiento hídrico inicial se consideró de la siguiente manera, alrededor del 80% de la precipitación pluvial se infiltra a través de las fisuras y oquedades de la roca calcárea, pero solo una parte ingresa al acuífero: De acuerdo con la sinopsis Geohidrológica (INEGI, 1989). El acuífero de Quintana Roo recibe un volumen medio anual del orden de 13,350 Mm<sup>3</sup> (100 %) de agua, originado por infiltración dentro de la propia entidad, y descarga un volumen equivalente integrado como sigue: 6,300 Mm<sup>3</sup> (47.19 %) retornan a la atmósfera por evapotranspiración, 850 (6.37 %) afloran en el cauce del río Hondo, 1,350 pasan subterráneamente a Yucatán, 4,500 (33.71 %) escapan al mar y 350 (2.62 %) son extraídos por las captaciones. (SARH, 1990)

El presente estudio se realizó en la zona norte del Estado de Quintana Roo, comprendida entre las ciudades principales de Cancún, Tulum y Cobá, esta área es importante en el estado debido a la alta densidad poblacional. Se consideró un área de estudio de 7,476,504,395 m<sup>2</sup>. Con el fin de simplificar términos, se denominará al sitio de estudio como Acuífero Norte de Quintana Roo.

Los datos de precipitación, piezometría y características físicas de los suelos, obtenidos de las instituciones oficiales (Conagua, SMN, Inegi) utilizados en el presente estudio, fueron la base para generar el balance hídrico.

El estado de Quintana Roo está formado por rocas sedimentarias que fueron originadas en los periodos Paleogeno y Cuaternario, en los últimos 66 millones de años. Las rocas más antiguas son calizas dolomitizadas, silicificadas y recristalizadas, de coloración clara y con delgadas intercalaciones de margas y yeso. Estas rocas datan del Paleoceno al Eoceno, (SARH, 1990)

Se trata de un acuífero de tipo freático y con marcada heterogeneidad respecto a sus características hidráulicas. En la llanura el acuífero presenta notable desarrollo krástico al que se debe su gran permeabilidad secundaria. (SARH, 1990)

Mediante el balance superficial realizado por el método de Thornthwaite (Remeneiras, 1972) y el balance subterráneo dentro del acuífero Norte de Quintana Roo se lograron determinar los volúmenes de precipitación, evapotranspiración, flujo subterráneo, extracción, cambio de almacenamiento y recarga en el acuífero. La recarga del acuífero se calculó mediante la relación



entre el balance superficial y subterráneo. Al considerar que se tiene un acuífero libre con una permeabilidad anisotrópica con direcciones de flujo preferenciales relacionada con el fracturamiento.

Al conocer los volúmenes de recarga directa por parte de la precipitación, se determinó el comportamiento de dicha recarga empleado el modelo de circulación general CNRMCM5 (Centre National de Recherches Meteorologiques), y el ensamble REA (Fiabilidad del Ensamble ponderado), utilizando los escenarios de cambio climático RCP (Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por siglas en inglés)). RCP 4.5 y RCP 8.5, en los horizontes 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099. (escenarios.inecc.gob.mx).

### **1.1. Planteamiento del problema**

Debido a que la recarga al Acuífero del Norte de Quintana Roo se produce por medio de la precipitación que ocurre en la zona, es importante conocer cómo afectará dicha recarga los cambios en la temperatura y en los regímenes de precipitación en los próximos años e impacto en los volúmenes de recarga en el agua subterránea.

### **1.2. Justificación**

El Estado de Quintana Roo se ubica dentro de la Región denominada Península de Yucatán, debido a características cársticas, sus casi nulas elevaciones del terreno, alta porosidad en el suelo por lo que carece de escurrimientos superficiales. Al ser casi nulos dichos escurrimientos, no es posible generar fuentes de almacenamiento de agua superficial, por lo que su principal fuente de abastecimiento es el agua subterránea. Es necesario conocer el comportamiento del agua subterránea en el estado para proyectar a futuro los cambios que puedan ocurrir.

Se considera que la recarga principal del agua subterránea, debida a la precipitación en la zona, por lo que el conocimiento de los volúmenes de recarga al acuífero y sus cambios mensuales y anuales, es posible estimar el modo como el cambio climático, afecta a los volúmenes de recarga en el estado.

#### **1.1. Hipótesis**

La precipitación pluvial es la principal fuente de recarga del Acuífero del Norte de Quintana Roo; esta recarga repercute de manera directa y rápida en los niveles estáticos. La diferencia que ocurre mensualmente entre la evapotranspiración y la precipitación es considerada la reserva de agua. Dicha reserva de agua se mueve en dos formas y dos velocidades diferentes: 1) la que llega a retenerse en el suelo y después regresa en forma de evapotranspiración, y una parte que se puede transportar al agua subterránea, mientras que otra; 2) la que se traslada directamente al agua subterránea por las fracturas.



Debido a los cambios climáticos, se espera que en los próximos años la temperatura promedio aumente, teniendo un incremento directo en la evapotranspiración, por lo que generará una disminución en los volúmenes de recarga.

## 1.2. Objetivos

### Objetivo principal

Estimar los volúmenes de recarga de agua subterránea que ocurren en la zona norte del estado de Quintana Roo y predecir su comportamiento, ante dos escenarios de cambio climático.

### Objetivos específicos

- 1) determinar la capacidad de infiltración encontrada en los diferentes tipos de suelos presentes en el estado.
- 2) llevar a cabo mensualmente un balance hídrico superficial considerando las variables actuales de temperatura y precipitación.
- 3) realizar un balance de agua subterránea teniendo en cuenta los valores históricos de niveles de agua.
- 1) llevar a cabo un pronóstico de la recarga considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 (IPCC).



"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLÓGICO EN EL NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO"





## 2. MARCO TEORICO

Es este capítulo se describirán los antecedentes de las bases teóricas de lo que se utilizara como base de la metodología que se aplicara en el presente estudio.

### 2.1. Estudios previos

En la Tabla 1, se presenta la relación de estudios previos consultados que se realizaron en la zona de estudio, así como estudios tomados como referencia para elaborar la presente tesis.

**Tabla 1. Estudios previos. Elaboración propia.**

Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
¿Explotación De Roca Caliza Por Debajo Del Nivel Freático En Quintana Roo: Industria Turística O Minera?			Articulo	Ana Muñoz-Colunga, Marisa González Y Luis Marín
Abc Del Cambio Climático En Mesoamérica	2009	Catie	Libro	Pablo Imbach
Actividades Geohidrológicas Complementarias En El Área Del Corredor Turístico Cancún –Tulum, Edo De Quintana Roo	1989	Comisión Nacional Del Agua	Estudio	Exyco, S.A.
Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Cerros Y Valles (2301), Estado De Quintana Roo	2002	Comisión Nacional Del Agua	Informe	Conagua
Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Isla Cozumel (2305), Estado De Quintana Roo	2002	Comisión Nacional Del Agua	Informe	Conagua
Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Península De Yucatán (3105), Estado De Quintana Roo	2002	Comisión Nacional Del Agua	Informe	Conagua
Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Xpujil (0405), Estado De Campeche	2002	Comisión Nacional Del Agua	Informe	Conagua



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Actualización Del Inventario Y Padrón De Usuarios De Aprovechamientos Hidráulicos Y Descargas De Agua Residuales Del Corredor Turístico Cancún-Tulum-Punta Sam-Isla Mujeres Y Cozumel	1992	Comisión Nacional Del Agua	Estudio	Exyco, S.A.
Amenazas, Vulnerabilidad Y Riesgo De Contaminación De Las Aguas Subterráneas En La Península De Yucatán	2011	Teoría Y Praxis	Articulo	Francisco Bautista, Yameli Aguilar Duarte, Eduardo Batllori
Aplicación Del Método De Infiltración De Green-Ampt Con Redistribución De Humedad Del Suelo Entre Encharcamientos	2005	Estudios De La Zona No Saturada Del Suelo	Articulo	R. Muñoz-Carpena Y L. Gowdish
Calibration Of The Equations Of Hargreaves And Thornthwaithe To Estimate The Potential Evapotranspiration In Semi-Arid And Subhumid Tropical Climates For Regional Applications	2009	Atmósfera	Articulo	F. Bautista, D. Bautista, C. Delgado-Carranza
Cambio Climático: Una Visión Desde México	2004	Semarnat	Libro	Julia Martínez, Adrián Fernández
Características Hidrogeoquímicas De Un Acuífero Calcáreo Costero En La Parte Norte La Península De Yucatán	1979	Seminario Sobre Aprovechamiento Y Manejo Racional De Los Recursos Hidráulicos Subterráneos De La Península De Yucatán	Libro	Ing. Juan Manuel Lesser Illades, Ing. Enrique Espinosa Amador
Carta Geológico Minera Cancún F16-8	1996		Mapa	Sgm
Carta Geológico Minera Chetumal E16-4-7	1996		Mapa	Sgm
Clase Viii Infiltración		Universidad Nacional Agraria La Molina	Curso	Ing. Eduardo A. Chavarri Velarde
Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Benito Juárez, Quintana Roo	2010	Inegi	Informe	Inegi



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Isla Mujeres, Quintana Roo	2010	Inegi	Informe	Inegi
Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Lázaro Cárdenas, Quintana Roo	2010	Inegi	Informe	Inegi
Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Solidaridad, Quintana Roo	2010	Inegi	Informe	Inegi
Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Tulum, Quintana Roo	2011	Inegi	Informe	Inegi
Deterioro De La Calidad De Agua Subterránea Por El Desarrollo Poblacional: Cancún, Q. Roo.	2002	Ingeniería	Articulo	Eduardo Granel Castro Y Luis González Hita
El Agua Subterránea En El Desarrollo Regional De La Península De Yucatán	2002	Avance Y Perspectiva		Eduardo Batllori Sampedro, Y José Luis Febles Patrón
El Balance Hídrico En Cuerpos De Agua Cársticos De La Península De Yucatán	2007	Teoría Y Praxis	Articulo	Adrián Cervantes Martínez
El Cambio Climático Y El Agua	2008	Documento Técnico Vi Del Ippc	Libro	Ippc
El Manejo Del Agua En La Península De Yucatán Aspectos Químicos Y Desarrollo Histórico	1977	Srh, Boletín De Divulgación Técnica		Dr. William Back, Ing. Juan Manuel Lesser
El Sistema Hidrológico De Quintana Roo	2007	Comisión Nacional Del Agua	Informe	Conagua
Entornos, Problemática Y Estructura Económica De Quintana Roo	2000	Gobierno Del Estado De Quintana Roo	Libro	Gobierno Del Estado De Quintana Roo
Escenarios De Emisiones	2000	Ippc	Libro	Ippc
Estrategia De Manejo Y Conservación De Recursos Hídricos Para La Zona De Influencia Norte De Sian Ka´An	2007	Universidad Autónoma De Querétaro	Tesis	Judith Adriana Morales López



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Estrategia De Pago De Servicios Ambientales Por Desempeño Hidrológico En Quintana Roo	2009	Comisión Nacional Para El Conocimiento Y Uso De La Biodiversidad	Libro	Hilda Hesselbach, Luis Miguel Galindo, Karina Caballero, Roberto De La Maza, Luis Felipe Sánchez Y Yaatsil Guevara
Estudio Geohidrológico De Evaluación Y Censo En El Estado De Quintana Roo, Zona Del Arroyo Ucum	1978	Secretaria De Agricultura Y Recursos Hidráulicos	Estudio	Georama
Estudio Geohidrológico De: Cancún	1981	Subsecretaria De Bienes Inmuebles Y Obras Públicas.	Estudio	Geofísica De Exploraciones Guysa, S.A. De C.V.
Estudio Geohidrológico Del Norte De Quintana Roo, Mexico	2008	Universidad De Quintana Roo (Uqroo), Unidad Cozumel	Libro	Martha Angélica Gutiérrez-Aguirre Adrián Cervantes-Martínez (Compiladores)
Estudio Geohidrológico En El Área Cancún-Leona Vicario Y En La Isla De Cozumel, Edo. De Quintana Roo	1990	Comisión Nacional Del Agua	Estudio	Exyco, S.A.
Estudio Hidrológico Del Estado De Quintana Roo	2002	Inegi	Libro	Inegi
Estudio Piezométrico Y De Calidad del Agua Subterránea del Corredor Turístico Cancún-Tulum	1991	Comisión Nacional Del Agua, Gerencia Regional Sureste	Estudio	Conagua
Estudios Geohidrológicos Y Análisis Físicoquímico De Los Abastecimiento de Agua De Embotelladora del Caribe, S.A. De C.V.	1992	Embotelladora Del Caribe	Estudio	Embotelladora Del Caribe
Evaluación de Escenarios Regionales de Clima Actual Y de Cambio Climático Futuro Para México		Escenario De Cambio Climático En La Península De Yucatán	Libro	
Fundamentos de Hidrología de Superficie	1992	Limusa	Libro	Francisco Javier Aparicio Mijares
Geología De La República Mexicana		Instituto Nacional De Estadística Geografía E Informática	Libro	Dante J. Moran Zenteno



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Glosario De Términos		Ipcc	Libro	Ipcc
Groundwater Pollution In A Karstic Region (Ne Yucatan): Baseline Nutrient Content And Flux To Coastal Ecosystems	2011	Water Air Soil Pollut	Articulo	Laura Hernández-Terrones & Mario Rebolledo-Vieyra & Martin Merino-Ibarra & Melina Soto & Adrien Le-Cossec & Emiliano Monroy-Ríos
Guía Para La Generación De Escenarios De Cambio Climático A Escala Regional	2008	Centro De Ciencias De La Atmosfera	Libro	Francisco Estrada, Oscar Sánchez, Jorge Ramírez, Jorge Zavala, David Zermeño Díaz
Hidrogeología De La Península De Yucatán	2005	El Agua Vista Desde La Academia	Articulo	Luis Ernesto Marín Stillman, Julia Guadalupe Pacheco Ávila Y Renán Méndez Ramos
Hidrogeología De La Península De Yucatán	2008	Seminario Sobre La Conservación De La Zona Norte De Quintana Roo	Articulo	Mario Rebolledo Vieyra
Hidrografía: Factores Naturales Que Condicionan Los Regímenes Fluviales		Geografía De España.		
Hidrología Aplicada	1994	Mcgraw-Hill	Libro	Ven Te Chow
Hydrogeology Of The South-Eastern Yucatan Peninsula: New Insights From Water Level Measurements, Geochemistry, Geophysics And Remote Sensing	2010	Journal Of Hydrology	Articulo	Bibi R.N. Gondwe A,*, Sara Lerer A, Simon Stisen B, Luis Marín C, Mario Rebolledo-Vieyra D, Gonzalo Merediz-Alonso E, Peter Bauer-Gottwein A
Infiltración. Método Del Frente Abrupto De Mojado De Green Y Ampt	2010	Congreso Internacional De Hidrología De Llanuras	Articulo	Daniel Barrera



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Informe De La Actividad De Piezometría Y Toma De Muestras De Agua A Diferentes Profundidades Para La Elaboración De Perfiles De Salinidad En El Corredor Turístico Cancún Tulum, Q. Roo	1991	Comisión Nacional Del Agua	Estudio	Gerse
Informe Geohidrológico Estado De Yucatán	1986	Secretaria De Agricultura Y Recursos Hidráulicos	Informe	Sarh
Interacción De Las Aguas Subterráneas Con La Laguna De Nichuté. Q.R.	1997	Imta	Estudio	Fis. Luis Gonzales Hita; Ing. Fernando Lara Guerrero
Introducción A Los Modelos Climáticos Simples Utilizados En El Segundo Informe De Evaluación Del Ipcc	1997	Ipcc	Libro	Ipcc
Introducción Al Cambio Climático Y El Agua				
Ipcc Glosario		Ipcc	Libro	Ipcc
Manuales De Difusión Y Divulgación Sobre Temas Selectos De Agua Subterránea "Conceptos Básicos De Hidrogeología" (I Parte)	2000	Conagua	Libro	Rubén Chávez Guillen, Fernando Lara Guerrero
México Y El Cambio Climático Global	2007	México Y El Cambio Climático Global	Libro	Cecilia Conde
Modelación Del Sistema Lagunar De Nichupté	2008	Evaluación De Alternativas Para La Recuperación De Playas En La Zona Norte Del Estado De Quintana Roo		Instituto De Ingeniería De La Unan
Parte Iii. Regionalización Edáfica Del Territorio De México, Capítulo 24. Península De Yucatán			Libro	Francisco Bautista Y Gerardo Palacio



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Programa De Monitoreo De Aguas Subterráneas De La Caleta De Xel-Ha Y Sus Alrededores, Estado De Quintana Roo	2005	Universidad Nacional Autónoma De México	Informe	Dr. Oscar A. Escolero Fuentes, Dr. Luis E. Marín Stillman, Dr. Mario Rebolledo Vieyra, M. En C. Víctor Martínez
Proyecto Para La Disposición De Aguas Tratados Excedentes En Cancún, Q.Roo	1984	Fonatur	Estudio	Lesser Y Asociados, S.A.
Regional Climate Change Scenarios For México	2011	Atmósfera	Articulo	C. Conde, F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez And C. Gay
Repercusiones Por Ascenso Del Nivel Del Mar En El Litoral Del Golfo De Mexico	1996	Una Visión Xxi	Articulo	Mario Arturo Ortiz Pérez Y Ana Patricia Méndez Linares
Resumen Del Estudio Geohidrológico E Hidrológico De La Península De Yucatán	1976	Srh, Boletín De Divulgación Técnica	Articulo	Jumanuel Lesser
Servicios De Prospección Y Levantamientos Geológicos Y Geofísicos En La Zona De Lázaro Cárdenas, Quintana Roo	1980	Dirección General De Programas De Infraestructura Hidráulica	Informe	Rocha Y Asociados S.A.
Sinopsis Geohidrológica Del Estado De Quintana Roo	1990	Secretaria De Agricultura Y Recursos Hidráulicos	Libro	Srh
Síntesis De Las Condiciones Geohidrológicas Del Área Cancún-Tulum En El Estado De Quintana Roo	1990	Comisión Nacional Del Agua	Estudio	Gerencia De Aguas Subterráneas
Una Extensión Del Modelo De Gree-Ampt A Condiciones De Inundación De Profundidad Variable En Llanuras, Con Solución Explicita	2010	Congreso Internacional De Hidrología De Llanuras	Articulo	Sergio Masuelli, Daniel Barrera



Titulo	Año	Publicación	Tipo	Autor
Vulnerabilidad De Las Zonas Costeras Mexicanas Ante El Cambio Climático	2010	Vulnerabilidad De Las Zonas Costeras Mexicanas Ante El Cambio Climático	Libro	Alfonso V Botello, Susana Villanueva-Fragoso, Jorge Gutiérrez Y José Luis Rojas Galaviz

## 2.2. Balance hídrico

"El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. (Métodos de balance, 1981).

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden:

La precipitación ( $P$ ), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo.

Las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera ( $Q_{SI}$  y  $Q_{UI}$ ).

Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua ( $E$ ) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada ( $Q_{SO}$  y  $Q_{VO}$ ).

Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada ( $\Delta S$ ) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia ( $\nu$ ). (Métodos de balance, 1981).

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación:

$$(1) \quad P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{VO} - \Delta S - \nu = 0$$

Donde

$P$ , la precipitación de la cuenca, expresada en mm/año.

$Q_{SI}$ , el agua superficial que entra a la cuenca, expresada en m<sup>3</sup>/año.



$Q_{UI}$ , el agua subterránea que entra a la cuenca, expresada en  $m^3/año$ .

$Q_{SO}$ , el agua superficial que sale de la cuenca, expresada en  $m^3/año$ .

$Q_{UO}$ , el agua subterránea que sale de la cuenca, expresada en  $m^3/año$ .

$E$ , la evaporación de la cuenca, expresada en  $mm/año$ .

$\Delta S$ , cambio de almacenamiento en el agua, expresada en  $m^3/año$ .

$v$ , la diferencia del volumen de agua, expresada en  $m^3/año$ .

### 2.2.1. Precipitación

"Desde el punto de vista de la hidrología, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios relacionados al uso y control del agua. Las características fundamentales de la precipitación son: la forma y tamaño, mediante algunos métodos se puede predecir dicha precipitación dada ciertas condiciones atmosféricas" (Tabla 2) (Aparicio, 1994). Tabla 2.

**Tabla 2. Tipo de precipitación. Fuente: Campos, 1994.**

Clase de precipitación	Numero de gotas	Tamaño de gotas	Velocidad de caída	Cantidad de agua	Nube de precedencia
Lluvia	Grande	Mediano (0.5 mm)	Moderada	Variable	Nimbostratus, stratocumulus
Llovizna	Enorme	Pequeño (0.5 mm)	Muy lenta	Escaso	Altostratos y estratos
Aguacero	Moderada	Grande	Grande	Grande	Cúmulonimbos
Nieve	Solo copos	Mediano	Lentísimo	Pequeña	Altostratos, nimbostratos y stratocumulus
Granizo	Son congeladas gotas	Grande o muy grande	Muy grande	Grande	Cúmulonimbos

### 2.2.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación (Chow, 1994).

De acuerdo con (Aparicio, 1994), se definen la evaporación y la transpiración de la siguiente manera:



*Evaporación* es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, ha estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

*Transpiración* es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas. Esta agua es tomada por las plantas, naturalmente, del suelo.

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración potencial y la Evapotranspiración real). Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica.

### 2.2.3. Infiltración

"La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el suelo. Estratos de suelo con propiedades físicas diferentes pueden superponerse unos sobre otros formando *horizontes*. Los suelos también presentan una gran variabilidad espacial aun dentro de pequeñas áreas, como en un sembrado. Como resultado de las propiedades del suelo que ocurren a medida que cambia el contenido de humedad de este, la infiltración es un proceso muy complejo que puede describirse mediante ecuaciones matemáticas solamente en forma aproximada." (Chow, 1994).

En la distribución de humedad dentro del perfil del suelo durante el movimiento hacia abajo del agua, existen cuatro zonas de humedad una *zona saturada* cerca de la superficie, una *zona de transmisión* de flujo no saturado y contenido de humedad aproximadamente uniforme, una *zona de mojado* en la cual la humedad decrece con la profundidad y un frente de mojado en el cual el cambio de contenido de humedad con la profundidad es tan grande que da la apariencia de una discontinuidad aguda entre el suelo mojado arriba y el suelo seco debajo. Dependiendo de la cantidad de infiltración y las propiedades físicas del suelo, el frente de mojado puede penetrar en el suelo desde unas pocas pulgadas hasta varios pies.

*De acuerdo a (Chow, 1994). La tasa de infiltración  $f$* , que se expresa en pulgadas por hora o centímetros por hora, es la tasa a la cual el agua entra al suelo en la superficie. Si el agua se encharca en la superficie, la infiltración ocurre a la *tasa de infiltración potencial*. Si la tasa de suministro de agua en la superficie, por ejemplo, la lluvia, es menor que la tasa de infiltración potencial, entonces la tasa de infiltración describe la tasa potencial. La mayor parte de las ecuaciones de infiltración describen la tasa potencial. La *infiltración acumulada  $F$*  es la profundidad acumulada de agua infiltrada dentro de un periodo dado y es igual a la integral de la tasa de infiltración en ese periodo:

$$(2) \quad F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$$

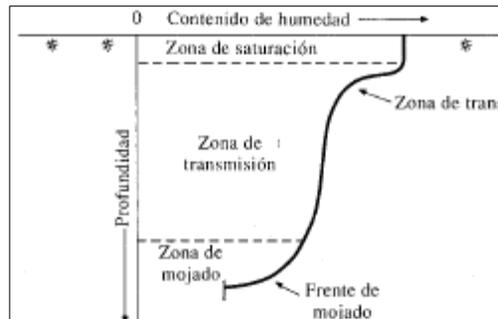


Figura 1. Zona de humedad durante la infiltración. Fuente: Chow, 1994.

Donde  $\tau$  es una variable auxiliar de tiempo en integración. A la inversa, la tasa de infiltración (Figura 1) es la derivada temporal de la infiltración acumulada:

$$(3) \quad F(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

### 2.3. Balance subterráneo

El balance subterráneo se utiliza para conocer la cantidad de agua disponible, en una región Geohidrológica; este nos determina la cantidad de agua existente, obteniendo las variaciones en los volúmenes de agua, durante un periodo de tiempo determinado.

Los registros de los niveles de profundidad en los aprovechamientos subterráneos serán utilizados para establecer las redes de flujo del agua subterránea, dichas redes se analizan para obtener las curvas de nivel estático en diferentes etapas de tiempo, logrando calcular los volúmenes de evolución del agua subterránea; para obtener el volumen mencionado se requiere conocer la transmisibilidad y la conductividad hidráulica del acuífero.

Para establecer el volumen de agua en un acuífero, es necesario conocer los niveles de agua en los aprovechamientos subterráneos. Entre estos se encuentran: manantiales, pozos, norias y flujo base en escurrimientos superficiales.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa es la siguiente:

$$(4) \quad \textit{Entradas (E)} - \textit{Salidas (S)} = \textit{Cambio de masa}$$



Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero:

$$(5) \quad \textit{Recarga total} - \textit{Descarga total} = \textit{Cambio de almacenamiento}$$

### 2.3.1. Entradas

Considerando el modelo conceptual del funcionamiento del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero ocurre por tres procesos naturales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el acuífero que se considera como ( $R_v$ ), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo ( $E_h$ ).

#### 2.3.1.1. Recarga vertical ( $R_v$ )

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el suelo y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

La recarga vertical es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$(6) \quad R_v + R_i + E_h - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S)$$

Dónde:

$R_v$ = Recarga vertical  $m^3/año$ ;

$R_i$ = Recarga inducida  $m^3/año$ ;

$E_h$ = Entradas horizontales por flujo subterráneo horizontal  $m^3/año$ ;

$B$ = Bombeo  $m^3/año$ ;

$Sh$ = Salidas por flujo subterráneo horizontal  $m^3/año$ ;

$ETR$ = Evapotranspiración  $m^3/año$ ;

$\Delta V(S)$  =Cambio de almacenamiento  $m^3/año$ ;

De esta manera, despejando la ecuación (6) recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R_v = B + Sh + ETR - E_h - R_i \pm \Delta V(S)$$

### 2.3.1.2. Flujo subterráneo horizontal (Entrada)

El cálculo de entradas por flujo horizontal (Figura 2) se realiza con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación de los niveles estáticos de la piezometría del sitio, utilizando la siguiente expresión:

$$(7) \quad Q = T * B * i$$

Donde:

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ ).

$T$  = Transmividad ( $m^2/s$ ).

$B$  = Longitud de la celda (m).

$i$  = Gradiente Hidráulico (adimensional).

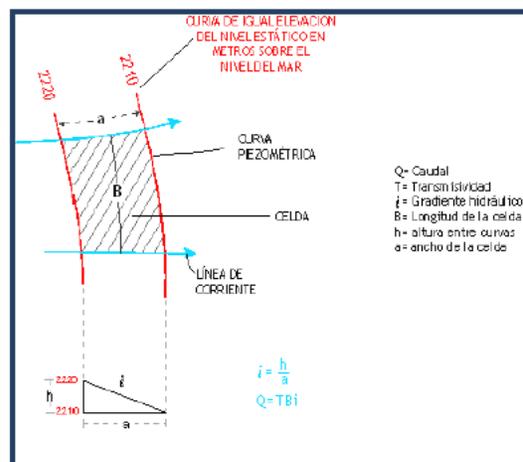


Figura 2. Cálculo del flujo horizontal. Fuente: Conagua, 2002.

## 2.3.2. Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. De manera particular se refiere a evapotranspiración, descargas naturales, bombeo, flujo subterráneo horizontal y descarga por ríos.

### 2.3.2.1. Evapotranspiración subterránea ETR

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia

hasta una profundidad máxima de 10 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a cinco metros, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (Figura 3), (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 metros para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje de ETR, de tal manera que a diez metros el valor de ETR es nulo y a cero el valor es del 100%. (CONAGUA, 2002).

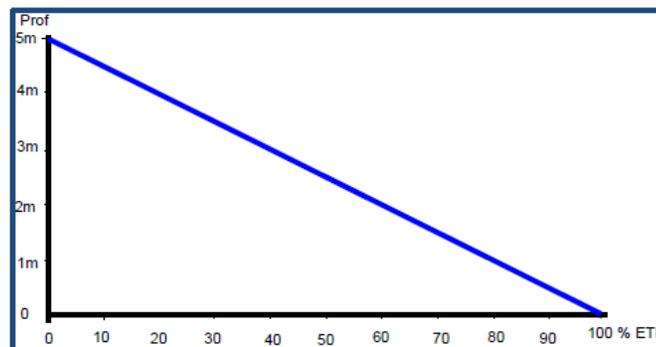


Figura 3. Relación evapotranspiración profundidad. Fuente: Conagua, 2002.

#### 2.3.2.2. Bombeo

Representa normalmente el volumen mayoritario de las descargas del acuífero y se encuentra constituido por la suma de los volúmenes de agua que se extrae del subsuelo para satisfacer las demandas de los diversos sectores productivos de la zona.

#### 2.3.2.3. Flujo subterráneo horizontal (Salida)

El volumen de descargas a través de flujos subterráneos horizontales, al igual que las entradas del mismo tipo, fue estimado mediante celdas de flujo, considerando los mismos criterios que el apartado 2.3.1.2.

#### 2.3.3. Cambio de almacenamiento

Para la estimación del cambio de almacenamiento se toma en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático de los niveles estáticos de agua. Con base en ella y considerando un coeficiente de almacenamiento (S), se puede determinar por la variación del almacenamiento en el área de balance, mediante la siguiente expresión:

$$(8) \quad \Delta VS = S * A * h$$



Donde:

$\Delta VS$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

$S$ = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

$A$ = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático ( $m^2$ );

$h$ = Valor de la variación piezométrica en el período ( $m$ );

#### 2.4. Escenarios de cambio climático

Desde la época de la revolución industrial, se ha detectado la tendencia de incremento de la temperatura media del planeta por la actividad humana, lo cual es uno de los indicadores de cambio climático, sin embargo, esto es a nivel global por lo cual es necesario tener una aproximación espacial mayor de ese fenómeno.

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Un "escenario climático" es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual. Estos escenarios no son pronósticos climáticos ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro. Una proyección puede servir como material fuente para un escenario, pero los escenarios en general requieren de información adicional (por ejemplo, condiciones económicas que permiten el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero).

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con la finalidad de proveer al mundo una visión científica sobre estado actual del conocimiento en Cambio Climático (CC) y sus impactos potenciales ambientales y socioeconómicos. El IPCC es un órgano intergubernamental abierto a todos los países miembros del PNUMA y de la OMM. Cada gobierno cuenta con un punto focal que coordina las actividades relacionadas con el IPCC en el país. En el caso de México el punto focal es el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

La función del IPCC es analizar de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos del riesgo que supone el CC provocado por las actividades humanas, sus posibles repercusiones y las opciones de adaptación y atenuación de este.

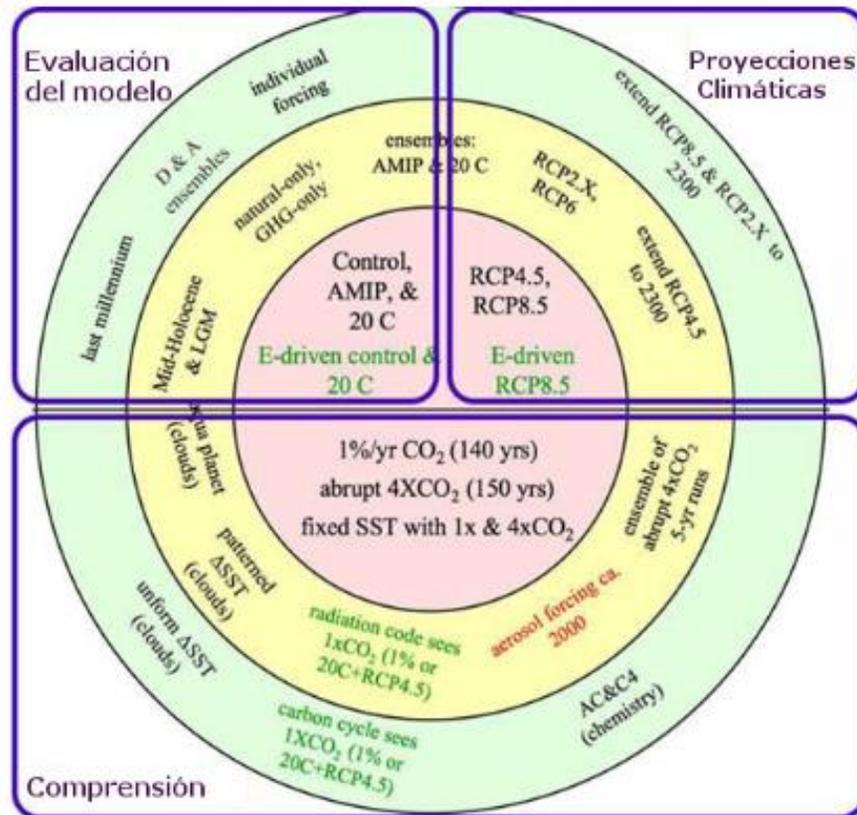


Figura 4. Resumen de los experimentos de larga duración del CMIP5. Fuente: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>.

### 2.4.1. Escenarios de cambio climático

El término “forzamiento radiativo” ha sido utilizado por el IPCC con el sentido específico de un proceso que altera el balance energético del sistema climático global o parte de los forzamientos radiativos o Trayectorias Representativas de Concentraciones (RCP’s por sus siglas en inglés) expresadas en  $W/m^2$  que consideraron para cada uno de los 15 MGC y el ensamble REA del proyecto “Actualización de los escenarios de climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación”(Figura 4). En la Tabla 3, se muestran las características de los nuevos escenarios.

Tabla 3. Nuevos escenarios. Fuente: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>.

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	$>8.5 Wm^{-2}$ en 2100	$>1,370 CO_2$	Aumentando	MESSAGE (Austria)



Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 6.0	6 Wm <sup>-2</sup> estable después de 2100	850 CO <sub>2</sub> estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM (Japón)
RCP 4.5	4.5 Wm <sup>-2</sup> estable después de 2100	650 CO <sub>2</sub> estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM (EU)
RCP 2.6	Pico en 3Wm <sup>-2</sup> antes del 2100 y disminuye después	Pico en 490 CO <sub>2</sub> antes del 2100 y disminuye después	Aumenta posteriormente disminuye	y IMAGE (Países bajos)

- RCP 4.5 (emisiones bajas)
- RCP 8.5 (emisiones altas)

Los horizontes que se seleccionados para cada uno de los 15 MGC:

- Futuro cercano (2015-2039)
- Futuro medio (2045-2069)
- Futuro lejano (2075-2099)

Para el horizonte REA, los horizontes considerados, fueron:

- Futuro cercano (2015-2039)
- Futuro lejano (2075-2099)

#### 2.4.2. Modelos circulación general (MCG)

Además de los pronósticos del tiempo atmosférico local para los próximos días utilizando modelos numéricos de alta resolución de la atmósfera, algunos centros meteorológicos mundiales también producen proyecciones estacionales (del clima), que brindan probabilidades de la temperatura media y precipitación mayor, aproximada o menor de lo normal. Estas perspectivas no pronostican el clima para un día en particular, sino que ofrecen predicciones de los promedios estacionales. Las proyecciones estacionales también se realizan con un modelo de atmósfera, pero utilizan los valores observados climatológicos para el estado evolutivo de las condiciones de la superficie del océano, la tierra y el hielo marino. Sin embargo, si se requieren pronósticos con ventana temporal

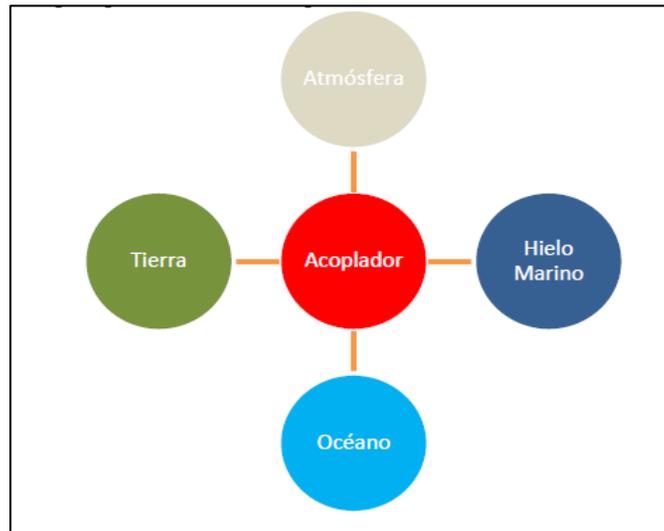


mayor a una temporada, no será suficiente utilizar solamente un modelo de atmósfera, ya que debe resolverse también la evolución de los estados del océano, la tierra, y del hielo marino utilizando modelos numéricos para estos componentes del sistema climático. La razón es que la superficie del océano, la tierra y los estados del hielo marino interactúan con la atmósfera e influyen en su evolución futura, ya que se basan en una escala de tiempo mucho más lenta que la atmósfera.

Los Modelos de Circulación General Acoplados son programas de cómputo que reproducen la dinámica atmosférica en diferentes escalas incluyendo los efectos del océano y los continentes. Son herramientas versátiles y de suma utilidad que incluyen un complejo grupo de procesos, basados en leyes físicas. Con estas herramientas se realizan simulaciones bajo diferentes condiciones radiativas, incluidas las de cambio climático mediante escenarios, como RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, con las cuales se generan proyecciones a futuro (Tabla 3). (<http://escenarios.inecc.gob.mx/>).

Un modelo climático es de utilidad para entender cómo funciona el sistema climático, y cómo los diversos componentes interactúan entre sí. Se utiliza para simular el clima actual día, el clima del pasado reciente, y los climas de diferentes épocas paleoclimáticas. También se puede aplicar para simular el estado estadístico de la atmósfera de una década o un siglo en el futuro, pero no predice el tiempo local en determinados días. La resolución de un modelo climático es mucho más reducida en comparación con la utilizada en la predicción del tiempo, por lo que la información climática se da en escalas regionales a globales, y no a escala local. El estado del clima a un período de tiempo largo depende de los niveles futuros de las cantidades que fuerzan al sistema climático, tales como las concentraciones de bióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, aerosoles atmosféricos de diferentes tipos, y los niveles de actividad solar y volcánica. Por lo tanto, estas proyecciones climáticas dependen de muchas opciones futuras a realizar por la humanidad, lo cual determinará las concentraciones de gases de efecto invernadero y de aerosoles durante el próximo siglo.

Por lo tanto, un modelo de clima físico consta de cuatro componentes; la atmósfera, el océano, la tierra y el hielo marino (Figura 5). Estos componentes se utilizan para calcular el estado futuro dado un estado inicial y las diversas cantidades que fuerzan el componente. Estos cuatro elementos básicos interactúan entre sí, por lo que la mayoría de los modelos climáticos tienen un quinto componente, a menudo llamado el acoplador, que tiene dos funciones principales: la primera función es la de iniciar, supervisar la evolución en el tiempo, y terminar cada simulación del modelo, la segunda es para recibir toda la información de cada componente que es requerido por el resto de los componentes y para enviar de nuevo a cada componente toda la información que se requiere para continuar su simulación avanzando en el tiempo (Tabla 4). ([http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas\\_2\\_190215\\_documentacion.pdf#page=6](http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf#page=6)).



**Figura 5. Modelos climáticos. Fuente: Atlas climático.**

**Tabla 4. Modelos generales de circulación. Fuente: Atlas climático.**

MODELO	INSTITUCIÓN	PAIS
BBC_CSMI	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CAnESM	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma)	Canadá
CNRMCM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	Francia
CSIRO_Mk3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia
GFDL_CM3	Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL)	estados unidos
GISS_E2_R	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	estados unidos
HADGEM2_ES	Met Office Hadley Centre (MOHC)	reino unido
INM	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
IPSLcm5a_lr	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	Francia
MIROC_esm	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC_ESM_CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MPI_ESM_LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemania
MRI_CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japón
NCC_NorESM1	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega
REA	INECC (IMTA, CCA-UNAM Y CICECE)	México



"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLÓGICO EN EL NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO"



### 3. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

El nombre oficial del estado es Quintana Roo tiene una extensión territorial de 44 825 km<sup>2</sup>, representa el 2.2% de la superficie del país (Figura 6), su capital es Chetumal, está dividido en nueve municipios (Tabla 5), se ubica en la parte sur de la República Mexicana, sus coordenadas geográficas extremas son Al norte 21°37', al sur 17°53' de latitud norte; al este 86°42', al oeste 89°20' de longitud oeste. El Estado de Quintana Roo colinda al norte con Yucatán y con el Golfo de México; al este con el Mar Caribe; al sur con la Bahía de Chetumal y Belice; al oeste con Campeche y Yucatán, La población del Estado es de 1 325, 578 habitantes divididos en un 88% es urbana y 12% rural.

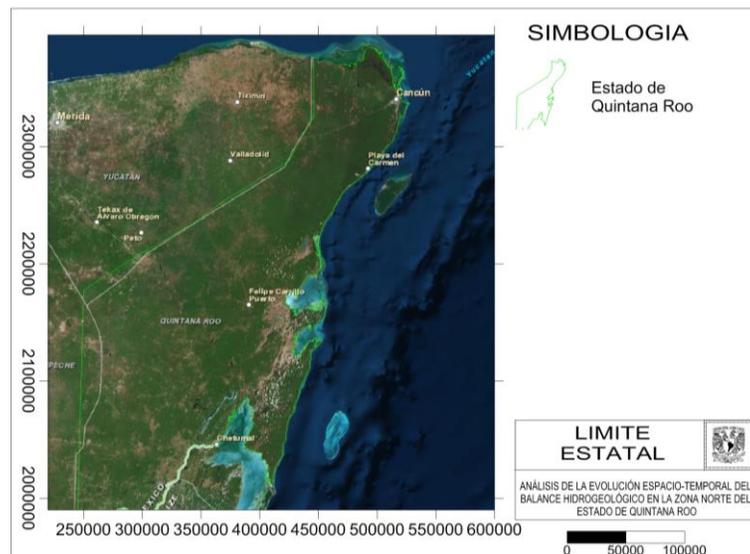


Figura 6. Estado de Quintana Roo. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Google, 2015.

Tabla 5. Municipios de Quintana Roo.

Fuente: Secretaría de Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2015.

Clave del municipio	Municipio	Cabecera municipal	Habitantes
1	Cozumel	Cozumel	79 535
2	Felipe Carrillo Puerto	Felipe Carrillo Puerto	75 026
3	Isla Mujeres	Isla Mujeres	16 203
4	Othón P. Blanco	Chetumal	244 553
5	Benito Juárez	Cancún	661 176
6	José María Morelos	José María Morelos	36 179



Clave del municipio	Municipio	Cabecera municipal	Habitantes
7	Lázaro Cárdenas	Kantunilkín	25 333
8	Solidaridad	Playa del Carmen	159 310
9	Tulum	Tulum	28 263
10	Bacalar	Bacalar	32 000
11	Puerto Morelos	Puerto Morelos	37 099

De acuerdo con la secretaria de gobierno del Estado de Quintana Roo, los municipios más importantes en el estado son los ubicados en la zona norte Benito Juárez (Cancún), Tulum, Solidaridad (Playa del Carmen) y la Isla de Cozumel (Figura 7).en la Tabla 6, se muestra el tipo de suelos en el estado, en la Tabla 7y Tabla 8, se muestra la información recopilada por parte de INEGI.

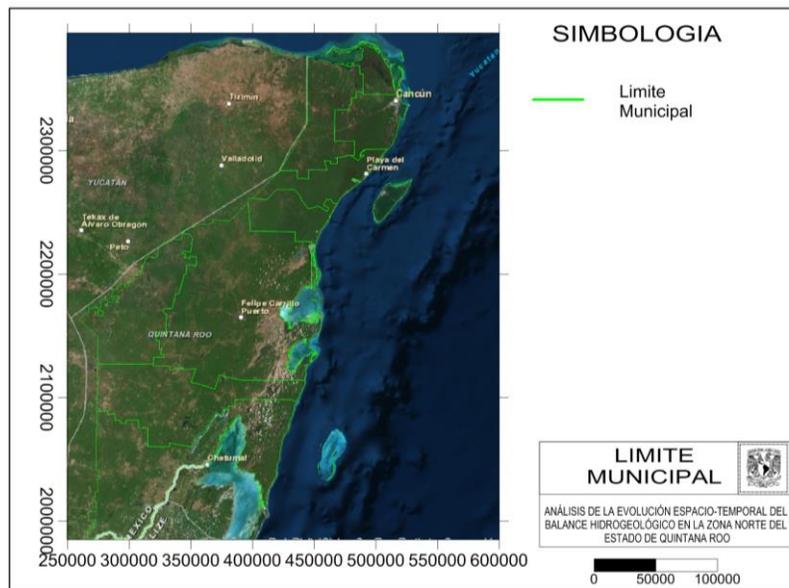


Figura 7. Distribución municipal del Estado de Quintana Roo. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: INEGI.



**Tabla 6. Tipos de uso de suelo. Fuente: INEGI, 2005.**

Medio Ambiente (Km Cuadrados), 2005	Quintana Roo	Estados Unidos Mexicanos
Superficie De Cuerpos De Agua	444.41	25,769.47
Superficie Continental	42360.97	1,959,247.98
Superficie De Agricultura	1036.74	310,178.89
Superficie De Pastizal	1308.82	274,269.49
Superficie De Bosque	4.46	222,294.11
Superficie De Selva	11106.41	122,244.97
Superficie De Matorral Xerófilo	0	528,776.39
Superficie De Otros Tipos De Vegetación	3954.99	30,230.55
Superficie De Vegetación Secundaria	24208.06	423,543.25
Superficie De Áreas Sin Vegetación	80.08	9,306.86
Superficie De Áreas Urbanas	217.01	12,633.97

**Tabla 7. Vivienda y urbanización. Fuente: INEGI, 2005.**

Vivienda Y Urbanización	Quintana Roo	Estados Unidos Mexicanos
Total De Viviendas Particulares Habitadas, 2010	369235	28,607,568
Promedio De Ocupantes En Viviendas Particulares Habitadas, 2010	3.6	3.9
Viviendas Particulares Habitadas Que Disponen De Agua De La Red Pública En El Ámbito De La Vivienda, 2010	325451	24,808,420
Capacidad Instalada De Las Plantas Potabilizadoras En Operación (Litros Por Segundo), 2009	No disponible	99,337
Volumen Suministrado Anual De Agua Potable (Millones De Metros Cúbicos), 2009	No disponible	1,847
Agua Suministrada (Litros Por Segundo), 2008	3907	No disponible
Porcentaje De Viviendas Con Agua Entubada, 2010	92.2	91.5
Porcentaje De La Población Que Dispone De Servicio De Agua Potable, 2006	92.8	No disponible

**Tabla 8. Uso de suelo y vegetación, superficie en has. Fuente: INEGI, 2005.**

Medio Ambiente	Quintana Roo	Porcentaje Nacional
Superficie Total (Hectáreas)	4236097	2.162104
Agricultura	103674	0.334239
Pastizal	130882	0.477202
Bosque	446	0.002006
Selva	1110641	9.085372
Otros Tipos De Vegetación	395499	13.08276
Vegetación Secundaria	2420806	5.715605
Áreas Sin Vegetación	8008	0.860441
Cuerpos De Agua	44441	1.72456
Áreas Urbanas	21701	1.717671
Superficie Reforestada	3449	1.513861

### 3.1. Área de estudio

Para el presente estudio el área será denominada como “Acuífero del Norte de Quintana Roo”. Debido a que su ubicación geográfica y para simplificar términos.

El área de estudio se encuentra ubicada dentro del estado de Quintana Roo, entre los municipios de: Solidaridad, Lázaro Cárdenas, Benito Juárez, Isla Mujeres y Tulum; tiene un área de estudio de 7,476,504,395 m<sup>2</sup>. Las principales localidades son Cancún, Playa del Carmen y Akumal (Figura 7).

Las fronteras del área de estudio están delimitadas, al norte y este por la línea de costa, al oeste por el lineamiento *el ideal*, originada en la localidad de Chiquilá que cruza desde la Costa Norte del estado hasta la localidad de Cobá. La frontera al sur es el límite norte de la Reserva de la Biosfera de Sian Kaán (Figura 8). En dicha biosfera se marca como una frontera natural, donde en su mayor parte se encuentran aguas superficiales. Aunque, intuitivamente éstas provienen del acuífero no existen estudios conclusivos al respecto. En la Figura 9, se muestra la delimitación de la zona de estudio.

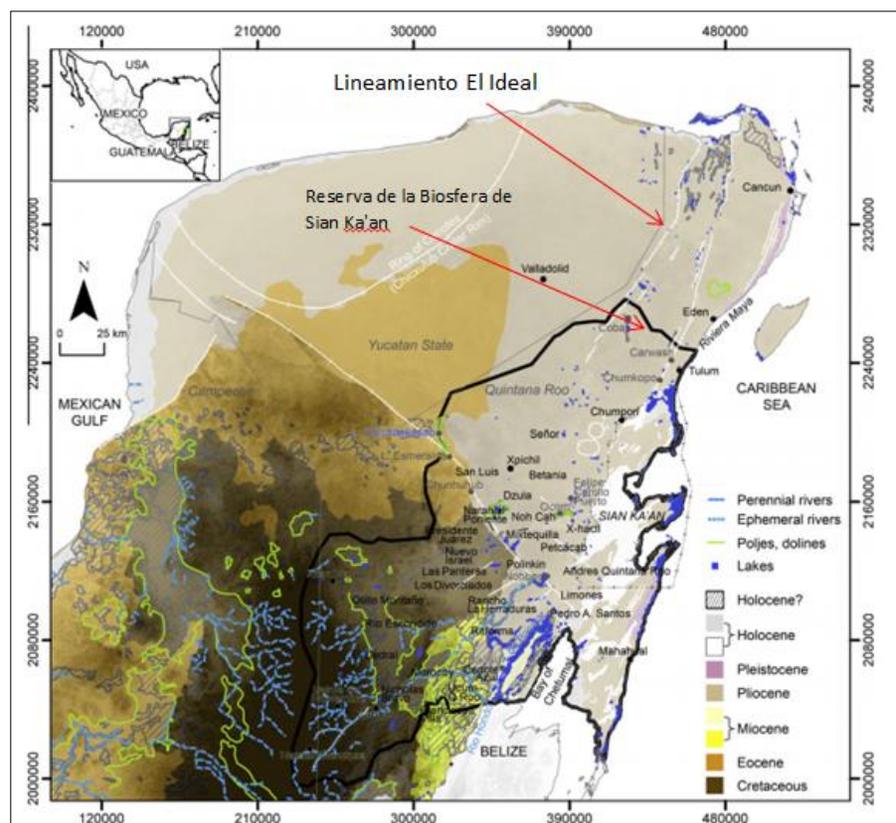


Figura 8. Delimitación de la zona de Sian Kaán y la zona fracturada del lineamiento El Ideal. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Bauer et al. (2011).

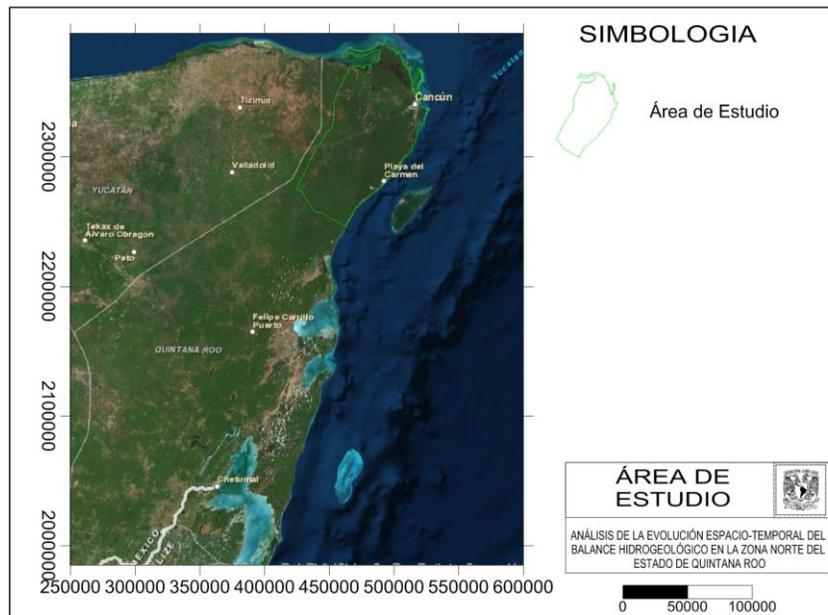


Figura 9. Delimitación del área de estudio. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2. Medio físico

Se presenta a continuación las características físicas y ambientales de la región y del área de estudio, con el fin de obtener un mejor conocimiento del sitio en cuestión.

#### 3.2.1. Clima

El clima que se encuentra en el estado de Quintana Roo presenta un clima cálido subhúmedo y el 1% cálido húmedo. La temperatura media anual del estado es de 26°C, la temperatura máxima promedio es de 33°C y se presenta en los meses de abril a agosto, la temperatura mínimo promedio es de 17°C durante el mes de enero (Figura 10).

Dentro del área de estudio se tiene un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. El rango de temperatura oscila en rangos de 24-28°C, en los municipios de Benito Juárez, Isla Mujeres, Solidaridad y Tulum, en el municipio de Lázaro Cárdenas se tiene rangos de temperatura de 24-26°C.

La precipitación se encuentra en los siguientes rangos: de cero a 1,100 mm en Isla Mujeres, de cero a 1,300 mm, en Benito Juárez, de cero a 1,500 mm en Tulum, de 700 a 1,500 mm en Lázaro Cárdenas y de 1,100 a 1,500 mm en el municipio de Solidaridad.



Figura 10. Clima dentro del estado de Quintana Roo. Fuente: CONABIO.

### 3.2.2. Edafología

Los suelos predominantes en el estado de Quintana Roo, tienen la característica de ser poco profundos, carecen de una estructura compleja se han identificado solo dos grandes capas un horizonte A, subsecuentemente se encuentran la roca madre. En algunos puntos es nulo y florece la roca.

La Figura 11, muestra una distribución de los suelos en la región, de acuerdo con la información edafológica del El Instituto Nacional Estadística Geografía, e Informática (INEGI). En la Tabla 9 se presenta un resumen de las características generales de dichos tipos de suelo.

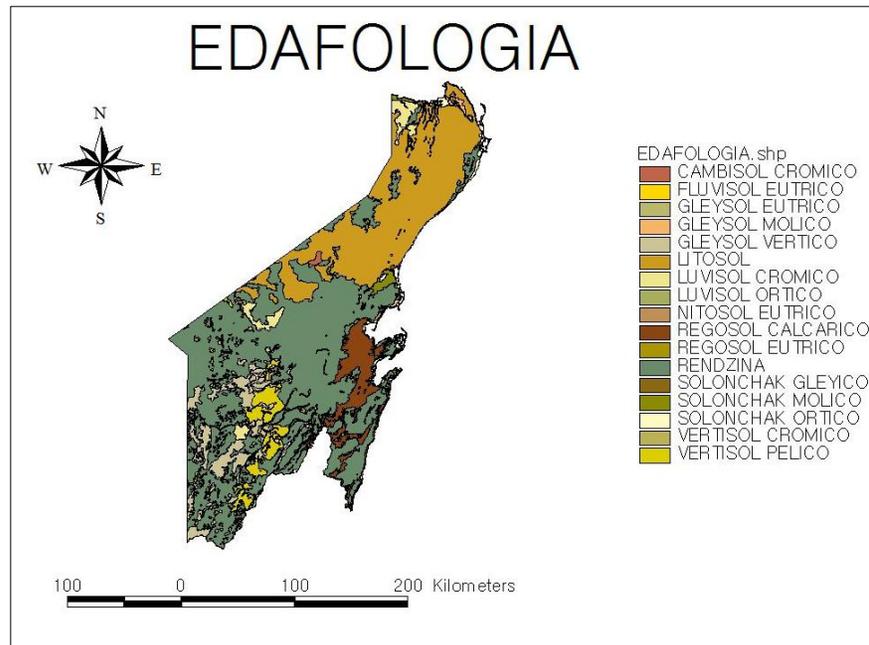


Figura 11. Distribución de los tipos de suelo del estado de Quintana Roo. Fuente: INEGI.

Tabla 9. Resumen de los diferentes suelos. Fuente: Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, 2007.

Descripción		Porcentaje	Observaciones
Cambisol	Crómico	0.1	Suelo de color claro, con desarrollo débil, presenta cambios en su consistencia debido a su exposición a la intemperie
Fluvisol	Eutrico	0.01	
Gleysol	Eutrico	3.56	Suelos con signos claros de influencia del agua freática. Un amplio rango de materiales no consolidados, principalmente fluviales, marinos y lacustre del Pleistoceno u Holoceno
	Molico		
	Vertico		
Litosol		17.6	Suelos muy delgados, se distinguen por tener una profundidad menor a los 10 cm. Se localizan en las sierras, en laderas y barrancas, así como en lomeríos y algunos terrenos planos. Tiene características muy variables, pues pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos.
Luvisol	Crómico	1.62	Superficial como resultado de procesos pedogenicos
	Ortico		
Nitosol	Eutrico	0.06	Suelos tropicales muy bien desarrollados. Profundos. Endopedión nitico con límite superior dentro de los 100 cm. Límite entre



Descripción		Porcentaje	Observaciones
			horizontes gradual o difuso, generalmente formados a partir de Rocas Básicas.
Regosol	Calcáreo	3.19	Suelo poco desarrollado, constituido por material suelto semejante a la roca.
	Eutríco		
Rendzina		68.91	Suelos poco profundos (10-15 cm) que sobreyacen directamente a material carbonatado (ejemplo roca caliza), generalmente pozos profundos, desarrollados sobre la roca caliza
Solonchak	Gleyico	1.33	Suelos fuertemente salinos. Sales más solubles que el yeso
	Molico		
	Ortico		
Vertisol	Crómico	3.64	Suelos muy arcillosos, con grietas anchas y profundas cuando están secos; si se encuentran
	Pelico		

Dentro de los municipios donde se encuentra el área de estudio, se encuentra una variedad de suelos, donde el que tiene un porcentaje mayor es el Leptosol, con porcentajes superiores del 50% (Tabla 10).

**Tabla 10. Porcentaje de suelo dentro del área de estudio. Fuente: INEGI.**

MUNICIPIO	PORCENTAJE DE SUELO DOMINANTE						
	Leptosol	Phaeozem	Luvisol	Gleysol	Solonchak	Arenosol	Histosol
Isla Mujeres	70.2			16.34	9.05	3.11	
Tulum	55.98	37.74		1.26	1.34	0.97	0.44
Benito Juárez	83.12			0.8	6.92	0.43	
Lázaro Cárdenas	78.08	0.01	12.79	3.21	4.17	1.53	
Solidaridad	85.26	11.37			0.77	0.19	0.25

### 3.2.3. Vegetación

En el estado de Quintana Roo, predomina la selva que cubre alrededor del 90% de la entidad, existe también vegetación acuática. Los manglares y Tulares se encuentran en la zona costera, existe zonas de cultivo con un área menor al 10%. La Tabla 11 hace referencia el uso de suelo y tipo de vegetación de la zona de estudio.



**Tabla 11. Uso de suelo y vegetación. Fuente: INEGI.**

Municipio	PORCENTAJE DE USO DE SUELO Y VEGETACION								
	Agricultura	Pastizal cultivado	Zona urbana	Selva	Tular	Manglar	Pastizal	Área sin vegetación	Otro
Solidaridad		1.23	1.84	95.73	0.03			0.04	
Lázaro Cárdenas	0.27	4.2		88.58	2.15	3.55	0.05		0.94
Isla Mujeres			0.21	65.42	7.29	22.15	1.81	0.01	2.03
Tulum	0.89		0.26	90.37	1.38	1.8	2.59	0.33	
Benito Juárez	1.57		6.43	83.28	1.19	4.86			

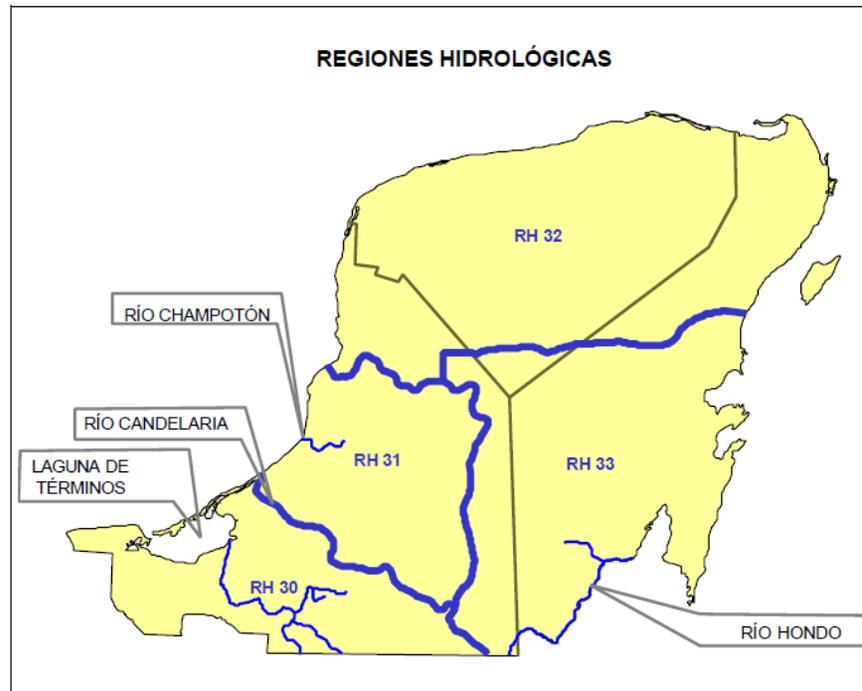
### 3.2.4. Hidrografía

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) distribuye el territorio nacional en 12 regiones administrativas, 37 hidrológicas y 79 subregiones también hidrológicas. La región administrativa XII, comprende los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

La Península de Yucatán carece de escurrimientos superficiales de gran magnitud y los pocos que se producen tienen muy corto recorrido, debido a su alta capacidad de infiltración que existe. Se tiene una elevada precipitación pluvial y carece de grandes elevaciones topográficas.

Quintana Roo se encuentra dentro de las regiones hidrológicas Yucatán este (RH 33) y Yucatán norte (RH 32). Teniendo como cuencas principales Bahía de Chetumal, cuencas cerradas y Quintana Roo.

La subregión principal de la península denominada como la Candelaria, la cual queda comprendida entre las coordenadas 89° 27' y 92° 05' de longitud oeste y 17° 49' y 19° 00' de latitud norte y colinda al norte con la Laguna de Términos, el Golfo de México y la subregión Campeche (o Región Hidrológica RH 31); al este con la "RH 31" y al sur y suroeste limita con Guatemala y el estado de Tabasco.



**Figura 12. Regiones hidrológicas (RH) dentro de la Península. Líneas azules delgadas, indican ríos. Líneas más gruesas azules, indican el límite entre RH. Fuente: CONAGUA, 2012.**

El Río Candelaria es el principal escurrimiento de tipo perenne y desemboca en la Laguna de Términos, con un patrón de drenaje dendrítico. Dentro de la RH 30, localizada al suroeste de la región, se encuentran los ríos más caudalosos de la Península de Yucatán: Chumpán, Candelaria y Mamantel y al sureste, dentro de la RH 33, se localiza el Río Hondo el cual funge como límite internacional con el vecino país de Belice (Figura 12).

En la RH 33 el Río Hondo es el único cuerpo superficial importante. Su cuenca tributaria tiene una extensión de 9,958 km<sup>2</sup>, y tiene una extensión de 125 km y sirve de frontera entre México y Belice. Hacia el suroeste del estado de Campeche existe el sistema lagunar más importante del litoral del Golfo de México, constituido por la Laguna de Términos y otras que la circundan como son: Pom-Atasta, Puerto Rico, Del Corte, El Vapor, San Francisco, Del Este, Balchacah y Panlao. Con respecto al Estado de Quintana Roo, cuenta con 51 lagunas siendo las más importantes la de Bacalar con 50 km de longitud, Chichancanab y el Sistema Lagunar Nichupté con 12 km (Tabla 12). (INEGI, 1989)

El área de estudio se encuentra en las region hidrológica RH32, ubicándose en la cuenca Quintana Roo, donde existen cuerpos de agua perenes, siendo algunos son siguientes: Lagunas: Chabela, Laguna El Recreo, Chunyaxché, Caapechén, Nachacam, La Unión, Chumkopó, Cobá, Zamach, Boca Paila y Verde; Bahías La Ascensión y Espíritu Santo.



**Tabla 12. Hidrografía municipal. Fuente: INEGI.**

MUNICIPIO	REGIÓN HIDROLÓGICA (%)		CUENCA (%)	
	Yucatán este	Yucatán norte	Cuencas cerrada	Quintana Roo
Isla Mujeres	100			100
Tulum	12.73	87.27	9.63	87.27
Benito Juárez	100			100
Lázaro Cárdenas	100			94
Solidaridad	100			100

### 3.2.5. Fisiografía

El área de estudio queda comprendida en la provincia Fisiográfica denominada "Península de Yucatán". Debido a sus características litológicas, se le denomina "Plataforma Calcárea de Yucatán" que se caracteriza por ser una superficie sensiblemente plana, principalmente en la parte norte de la Península y lomeríos prolongados de gran altura, que constituyen el anticlinal que limita los Estados de Campeche y Quintana Roo. (Conagua, 2002).

Geologicamente se considera como una plataforma parcialmente emergida, constituida por una secuencia de rocas carbonatadas y evaporíticas depositadas durante el Mesozoico tardío y Cenozoico, este conjunto de rocas fisiográficamente ha sido dividido en dos áreas principales:

1. Una gran plataforma sumergida limitada por escarpes:

La somera y amplia plataforma submarina que forma el banco de Yucatán-Campeche, corresponde a la porción de la plataforma masiva carbonatada de la Península.

La Península de Yucatán ha sido caracterizada por Logan et al (Isophording, 1975). Como inclinada de sur a Norte y limitada sobre sus tres lados, por pendientes continentales y escalonadas que caen bruscamente en las profundidades abisales del Golfo de México. La característica principal es la presencia de arrecifes de coral, alojados en la periferia y la presencia de terrazas sumergidas relacionadas con antiguas líneas de costa.

2. Una plataforma emergida limitada por las costas dividida en dos zonas, La plataforma emergida y la Zona Costera y tierra firme las cuales se describen a continuación:

La plataforma emergida de la península de Yucatán ha sido descrita como una plataforma masiva de calizas horizontalmente estratificadas y subdividida por varios autores en dos regiones fisiográficas: una planicie al Norte y una región de colinas al Sur que se extiende hasta el Norte de Guatemala. No existe drenaje superficial, toda el agua de lluvia que no se evapora en la superficie del terreno se infiltra a través de las dolinas y de otras aberturas que se encuentran en el terreno rocoso, el suelo se encuentra en pequeños y delgados manchones y como relleno en las fisuras de las rocas. Sin embargo, soporta una vegetación tropical muy densa compuesta de árboles altos, maleza y plantas trepadoras. (Conagua, 2002).



### 3.2.6. Geología

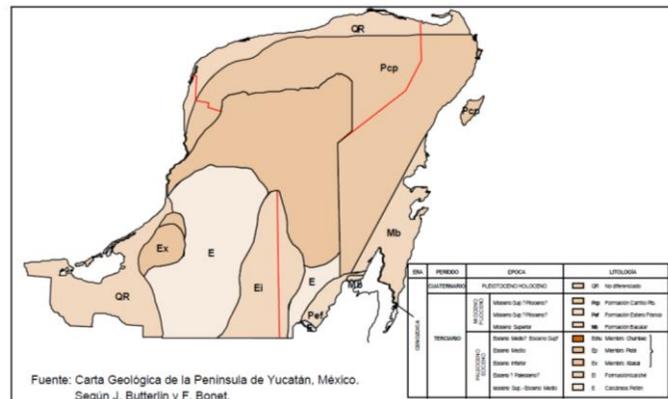
#### Geología Historica

La Península de Yucatán ha tenido una evolución geológica y ha jugado un papel importante en el origen del Golfo de México y en el desarrollo de la geología del Caribe. Se caracteriza por un basamento metamórfico de edad paleozoica, sobre el cual ha evolucionado una secuencia sedimentaria de más de 3,000 m de espesor depositada desde el Jurásico hasta Reciente. El ciclo sedimentario comienza con un depósito de rocas Jurásicas de origen continental con intercalaciones volcánicas; al parecer la fuente de suministro de los materiales provenía de un basamento paleozoico. (Ampliación de la Red Piezométrica, 2009).

De acuerdo con el estudio de disponibilidad de Conagua elaborado en el 2002. Los principales ejes estructurales presentan una orientación ONO-ESE y NNE-SSO, que se asocian con la Sierrita de Ticul y el Sistema Bacalar-Río Hondo, respectivamente. Las calizas que ocupan una gran área, y de mejores características acuíferas, son las del Eoceno y Mio-Plioceno, las cuales están relacionadas con el Miembro Pisté de la Formación Chichén Itzá y la Formación Carrillo Puerto respectivamente (Figura 13).

ESTRATIGRAFÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN		
EDAD	PORCIÓN NORTE	PORCIÓN SUR Y CENTRO
HOLOCENO	RECIENTE ARENAS DE PLAYA ARCILLAS Y TURBAS	RECIENTE
PLEISTOCENO	SUELOS RESIDUALES CALIZAS DE MOLUSCOS	SUELOS RESIDUALES
PLIOCENO	CARRILLO PUERTO	INDIFERENCIADO
MIOCENO	SIN NOMBRE (LUTITAS,CALIZAS, MARGAS)	INDIFERENCIADO
EOCENO	MIEMBRO CHUMBEC (CALIZAS)	MIEMBRO CHUMBEC (CALIZAS)
PALEOCENO	MIEMBRO PISTÉ (CALIZAS)	MIEMBRO PISTÉ (CALIZAS) F. ICAICHÉ (CALIZA,DOLOMITA,EVAPORIT A)
CRETÁCICO SUPERIOR		PETÉN (?) (CALIZAS)

Fuente: Velázquez Aguirre Luis (1986)



**Figura 13. Estratigrafía de la Península de Yucatán. Fuente: CONAGUA, 2002.**

En la zona estudiada se encuentran materiales sedimentarios de origen marino y costero, y edad que va en terciario al cuaternario (Tabla 13). Para los fines que se persiguen en el presente trabajo, se clasificaron para los materiales existentes en la región en cuatro grupos, de los cuales tres de ellos aloran y el restante se encuentra bajo la laguna de Bojorquez. Estos corresponden a Cuaternario arenas de costa y eolianitas; Cuaternario manglares; Cuaternario arcillas lagunares; Terciario Formación Carrillo Puerto. (Conagua, 2002) A continuación de describen en orden cronológico iniciando por la más antigua:

**Tabla 13. Descripción Litológica. Fuente: Conagua, 2002.**

	Edad	Formación	Descripción litológica
Terciario	Cuaternario		Suelos lateríticos rojizos formados a partir de la alteración fisicoquímica de las calizas de la formación Felipe carrillo puerto. Suelos oscuros derivados de la alteración y descomposición de la materia orgánica vegetal. Terrenos pantanosos constituidos por limos orgánicos y humos derivados de la vegetación
	Mioceno superior-plioceno	Felipe Carrillo Puerto	Caliza arcillo-arenosa, color crema amarillento e intemperiza a café rojizo, se presenta en forma masiva, su espesor promedio es de 1.5m presenta fracturas pequeñas y abundantes cavidades de disolución. Contiene lamelibranquios y peneroplidas



	Edad	Formación	Descripción litológica
	Mioceno superior	Balacar	Calizas cretosas blancas y a veces amarillentas blandas nodulosas, ligeramente margosa, irregularmente laminadas. En ocasiones se encuentran intercalaciones de estratos delgados de yesos o de calizas maduras o dolomías en capas delgadas. Ocasionalmente se encuentran dentro de estas calizas fragmentos de arrecifes. El espesor de las calizas de los 30 m.
	Mioceno medio	Unidad litológica Morocoy	Son sedimentos carbonatados finos y sueltos que empaquetan fragmentos de rocas caliza y dolomítica angulosos o subredondeados en tamaños que varían de 2 a 50 cm. Estos sedimentos son producto de la erosión de otras formaciones se encuentran empaquetados con arcilla de color crema a ocreo, su espesor alcanza los 70 m.
		Miembro piste	Caliza blanca y amarillenta, masiva
	Mioceno	Unidad litológica Francisco villa	Calizas amarillentas de textura sacaroide, con cristales muy desarrollados de calcita que intemperizan a café oscuro dispuestos en estratos definidos su espesor fluctúa de 0.5 a 2m la potencia de esta unidad alcanza aproximadamente 100 m.
		Unidad litológica Gonzales-Ortega	Calizas cristalinas de grano fino de color blanco o rosado. Cuando intemperiza cambia a color crema amarillento, no presenta estratificación. Los afloramientos parecen remanentes erosionales
		Estero-franco	Dolomías compactas con estratos de 5 a 10 cm, Fracturadas, color amarillo ocre con echados de 15 a 20° NE y SW. Su depósito probablemente ocurrió en un medio ambiente de poca profundidad con bastante agilización
	Eoceno	Icaiche	Caliza verde olivo, al intemperizarse toman un color crema. Se depositó en un medio ambiente epicontinental

### Geología regional

De acuerdo con la información recabada en los documentos de SARH en 1990. Quintana Roo esta formado por rocas sedimentarias que fueron originadas en los periodos Terciario y Cuaternario, en los últimos 66 millones de años. Las rocas mas antiguas son calizas dolomizadas, siicificadas y recristalizadas, de coloración clara y con delgadas intercalaciones de margas y yeso. Estas rocas



datan del Paleoceno al Eoceno (66-52 millones de años); afloran en la porción sur del estado, y tienen espesores de varios de cientos de metros. Sobre estas rocas y aflorando en la parte centro occidental de la entidad, se encuentran calizas fosilíferas del Eoceno Medio (52-43 millones de años), cuyo espesor promedio es de 185 m. una secuencia de rocas que datan del intervalo Mioceno Superior-Plioceno (11-2 millones de años) están expuestas en la región Balacar-Chetumal; margas, yesos y cretas, con espesor total menor que 100 m. Estas constituyen la parte inferior de la secuencia, mientras que la parte superior está constituida por coquinas y calizas que en conjunto tienen un espesor de unos 20 m. (SARH, 1990).

Sedimentos arcillosos y depósitos evaporíticos rellenaron las depresiones entre el Terciario Superior y el Cuaternario, en los últimos 23 millones de años, variando su espesor entre 10 y 140 m. las rocas más jóvenes, depositadas entre el Pleistoceno y el Reciente (menos de 1.5 millones de años), afloran en áreas dispersas: coquinas, calizas y depósitos de litoral arenoso arcilloso en la faja costera; material residual arcilloso y caliche, producto de alteración, de espesor reducido, en las áreas interiores (SARH, 1990)

Las rocas presentan una disposición prácticamente horizontal en casi toda la entidad, excepto en las inmediaciones del Río Hondo donde se encuentran plagadas, y en la porción meridional de aquella, donde la continuidad de los estratos es interrumpida por fallas normales que dan al terreno configuración escalonada. Las fallas tienen longitud de varios kilómetros y se manifiestan en escarpes con desnivel de 10 a 100m. algunas de ellas han originado fosas, gradualmente convertidas en pantanos, lagos y lagunas, siendo la mayor de ellas la laguna de Balacar (SARH, 1990).

Las Dolinas conocidas localmente como cenotes son manifestaciones kársticas típicas de esta parte del país, varían en diámetro desde unos cuantos metros hasta más de 100 m, fueron formados principalmente por la acción vertical de la disolución y paso del agua hacia niveles profundos del nivel estático durante los períodos glaciales y revelan que las calizas han estado sujetas a un proceso intenso de disolución más espectacular y se encuentran de diversos tamaños y extensión en función de la edad de la roca e incidencia de los aspectos geológicos estructurales. El carst superficial presente en la zona de estudio se caracteriza por manifestar pequeñas dolinas de disolución y microvalas o depresiones someras del terreno que varían en su morfología y dimensiones (EXYCO, 1989).

La mayor parte de los materiales que constituyen a carbonatos de calcio cuaternarios, se llegan a presentar en forma de arenas finas, re TRABAJADAS por la acción del oleaje y parte de ellas transportadas tierra adentro, donde se han dado lugar a la formación de eolianitas. Interdigitadas con los materiales anteriores, se encuentran lodos calcáreos depositados en las zonas de manglar y lagunas costeras, que en su conjunto forman un paquete que se extienden prácticamente a todo lo largo de la costa de Quintana Roo y con un espesor medio de 10 metros. Estos materiales se encuentran descansando sobre calizas compactas y permeables de la formación Carrillo Puerto, del Terciario.



## Geomorfología

La topografía en la región es muy suave, mostrando solo corrientes superficiales de tipo embrionario asociadas a formas cársticas de absorción (dolinas, uvales y lapiaz), existen dolinas, cenotes, microcupula, cársticas, lagunas y llanuras de inundación, estas últimas con dimensiones de metros hasta km, presentando formas circulares, alargadas e irregulares manifestados hacia el área de Coba el mayor grado de carsticidad, en la línea de costa se presentan playas angostas y grado moderado de carsticidad, clasificado como merocarst de acuerdo a sus características morfológicas y estructurales. (Conagua, 2002)

### A.- Costera

Subdividida en playas, áreas de mareas y costera del Caribe.

### b.- Planicie interior

Subdividida en Noroccidental, centro, norte y Central inferior.

### C.- Colinas y valles

Comprende la sierrita de Ticul y las colinas de Bolonchen.

### D.- Cuencas Escalonadas

Subdivididas en Porción Norte y Porción Sur

Para el caso de la zona de estudio, las unidades que pertenecen son costeras y cuencas escalonadas (Tabla 14).

**Tabla 14. Unidades geomorfológicas. Fuente: EXYCO 1989.**

Unidad geomorfológica	Subdivisiones	Geoformas	Ubicación	Geología
Costera	Playas	Playas de barrera largas y angostas	De shangri-la a puerto Juárez (a lo largo de la costa)	Depósitos recientes asociados a la erosión marina
	Áreas de mareas	Lagunas de inundación	De shangri-la a Cancún (detrás de las playas, separándolas del continente)	Depósitos recientes provocados por la acción de las mareas



Unidad geomorfológica	Subdivisiones	Geoformas	Ubicación	Geología
	Costera del caribe	Playas rocosas y angostas, costas abruptas y cortadas. Playas semicirculares, caletas, cenotes de origen freáticos y cavernas de hundimiento y manantiales submarinos controlados por las estructuras secundarias NW-SE. Predominio de formas de conducción y emisión	De punta X-Calacoco a Tulum (a lo largo de la costa, hasta unos 2 km continente adentro).	Depósitos recientes asociados de alta energía. Calcarenitas con estratificación cruzada, calizas arrénciales y calizas
Cuencas escalonadas	Norte	Cuerpos de agua, cenotes, cúpulas y microdonoskársticos, simas, dolinas y uvales de colapso, controlados por fracturas NE-SW. Predominan las formas de absorción abiertas	En la porción contigua a la unidad geomorfológica costera	Calizas, calcarenitas, calizas arrecifales. Predominio de porosidad secundaria producto de las fallas NE-SW.Y el fracturamiento NW-SE.

### 3.2.7. Hidrogeología

El estado de Quintana Roo se encuentra dentro del acuífero administrativo denominado acuífero Península de Yucatán con clave (3105), dicho acuífero tiene una superficie de 141,523 km<sup>2</sup>, conformada por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. (Conagua, 2002). Se considera a la Península de Yucatán como una Unidad Regional denominada "Acuífero Península de Yucatán", conformada por cuatro Unidades Hidrogeológicas denominadas: Cerros y Valles, Península de Yucatán, X'pujil e Isla Mujeres.

#### Descripción del acuífero

Existe un acuífero que subyace a todo el Estado de Quintana Roo. Está formado por calizas de características variadas y depósitos de litoral con un espesor máximo de 400 metros. La porosidad

y permeabilidad primarias del acuífero dependen de su litología. Sus valores son altos en los estratos constituidos por conchas y esqueletos de organismos, y bajos en los estratos de caliza masiva. A lo largo del tiempo, estas características originales han sido modificadas por facturamiento, disolución y abrasión, dando lugar a la porosidad y permeabilidad secundarias, que varían dentro de un amplio rango de valores altos y presentan una distribución espacial muy regular, tanto en el área como en el sentido vertical, a causa del errático curso y variado su tamaño de conductos. (SARH, 1990)

A escala estatal, se trata de un acuífero de tipo freático y con marcada heterogeneidad respecto a sus características hidráulicas. En la llanura el acuífero presenta notable desarrollo krástico al que se debe su gran permeabilidad secundaria, con manifestaciones en la superficie (cenotes de gran tamaño), en tantos que, en el área de lomeríos, la red de drenaje subterráneo está menos desarrollada que en la llanura y no tiene manifestaciones importantes en la superficie del terreno. (SARH, 1990)

El acuífero se encuentra en rocas calizas del Terciario y Cuaternario y depósitos de litoral de este último período, con permeabilidad alta en material consolidado en la mayor parte de la entidad, excepto en su área suroeste que es de permeabilidad media; así como también en una pequeña franja al norte en material no consolidado (Figura 14).

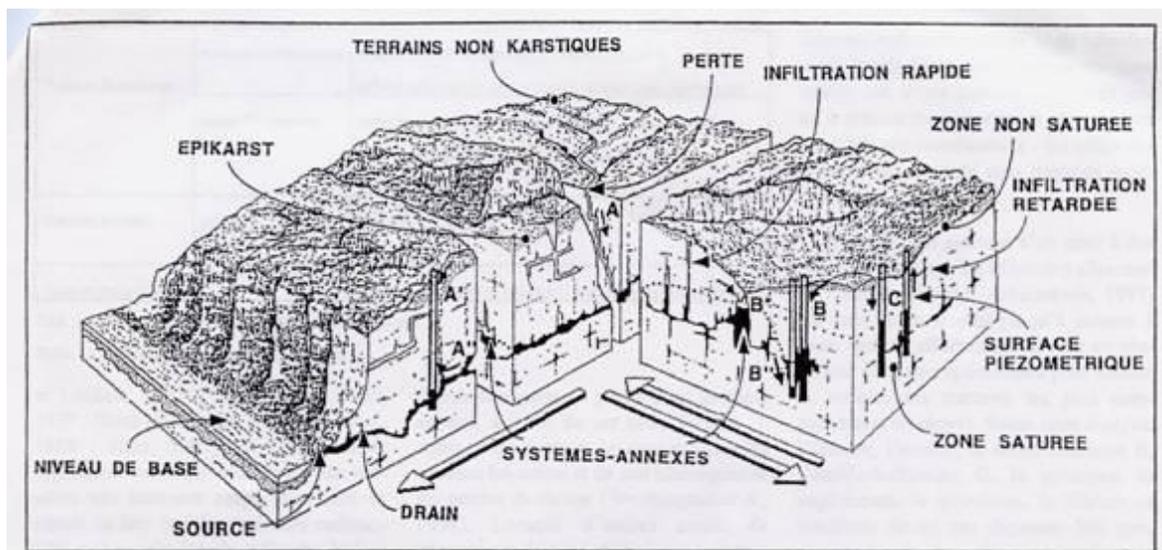


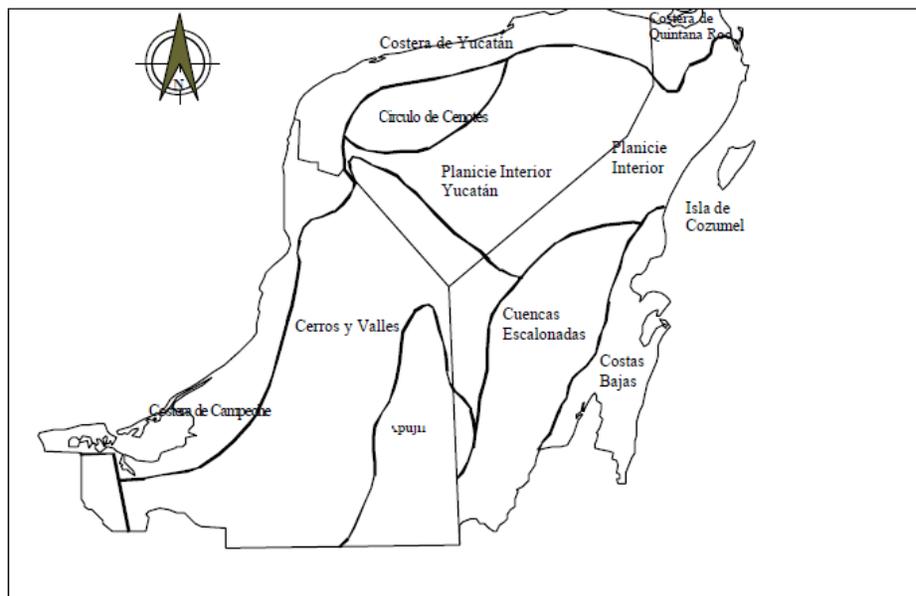
Figura 14. Desarrollo de acuíferos en sistemas kársticos. Fuente: Programa de monitoreo, 2005.

La unidad acuífera regional de la porción noreste de la península se caracteriza por una muy alta permeabilidad y transmisibilidad que permiten un rápido movimiento lateral de agua subterránea, ya que hay poca carga y gradiente hidráulico y nivel freático estable.

La forma del acuífero del área de estudio es similar a la que caracteriza a los acuíferos costeros de la península de Yucatán, las dimensiones dependen principalmente del movimiento ascendente o descendente de la interfase salina que funciona como límite dinámico inferior del acuífero (Figura 14).

### Unidades hidrogeológicas

Se considera a la Península de Yucatán como una Unidad Regional denominada “Acuífero Península de Yucatán”, conformada por trece Unidades Hidrogeológicas, seis ubicadas en Quintana Roo: Cerros y Valles, Cuencas Escalonadas, Planicie Interior, Costas Bajas, Costera e Isla de Cozumel; tres en Campeche: Cerros y Valles, Costera y Xpujil y las cuatro restantes en Yucatán: Costera, Círculo de Cenotes, Planicie Interior y Cerros y Valles (Figura 15) (Conagua, 2002). El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la región hidrogeológica denominada Planicie interior y Costera de Quintana Roo.



**Figura 15. Unidades hidrogeológicas en la península de Yucatán. Fuente: Conagua 2002.**

La permeabilidad del acuífero es anisotropía ya que tiene direcciones de flujo preferenciales relacionada con el fracturamiento. Por ello el flujo no es ortogonal a las equipotenciales, sino que está controlado por las estructuras locales. Sin embargo, la dirección general de flujo se puede establecer como semi-perpendicular a la línea de costa.

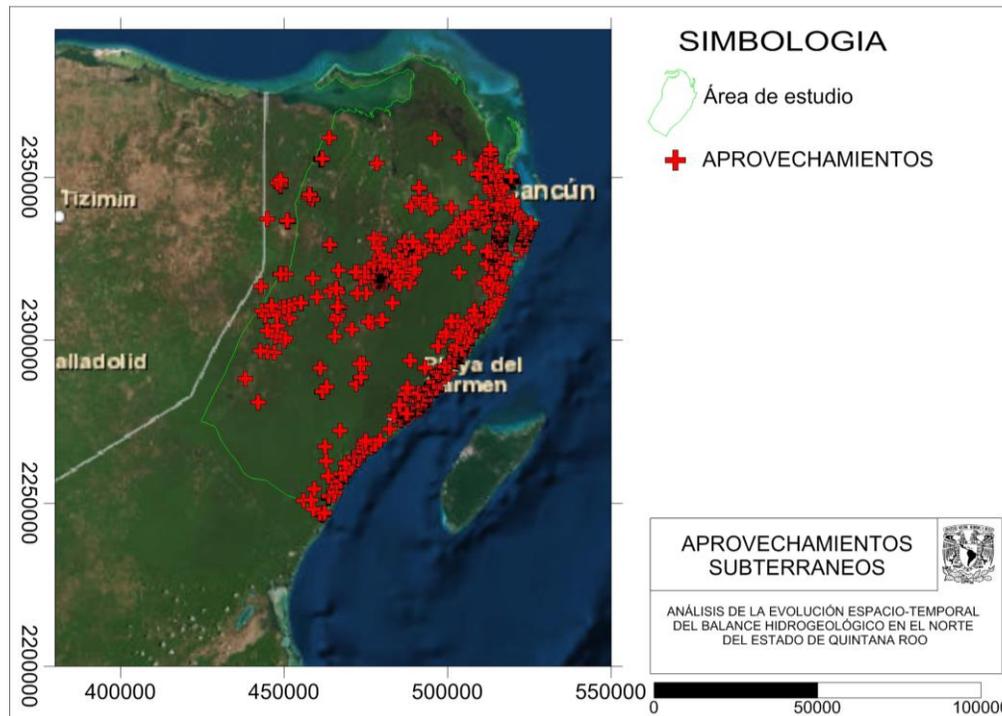
De acuerdo a la información piezométrica, la dirección de flujo a nivel regional tiene un comportamiento radial en dirección del mar, teniendo como referenciala parte central de la Península de Yucatán, de acuerdo a Perry 2002, en la siguiente figura se observa el sistema de flujo del acuífero de la Península de Yucatán (Figura 16).



Figura 16. Direcciones de flujo de agua subterránea de acuerdo a Perry y otros (2002).

### 3.2.7.1. Piezometria

De acuerdo con el Repda (registro público de derechos de agua), se tienen registrados 1,174 aprovechamientos subterráneos distribuidos en la zona de estudio. Teniendo una mayor densidad en la zona norte (Cancún) y en la franja costera.



**Figura 17. Ubicación de los aprovechamientos subterráneos. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: REPDA.**

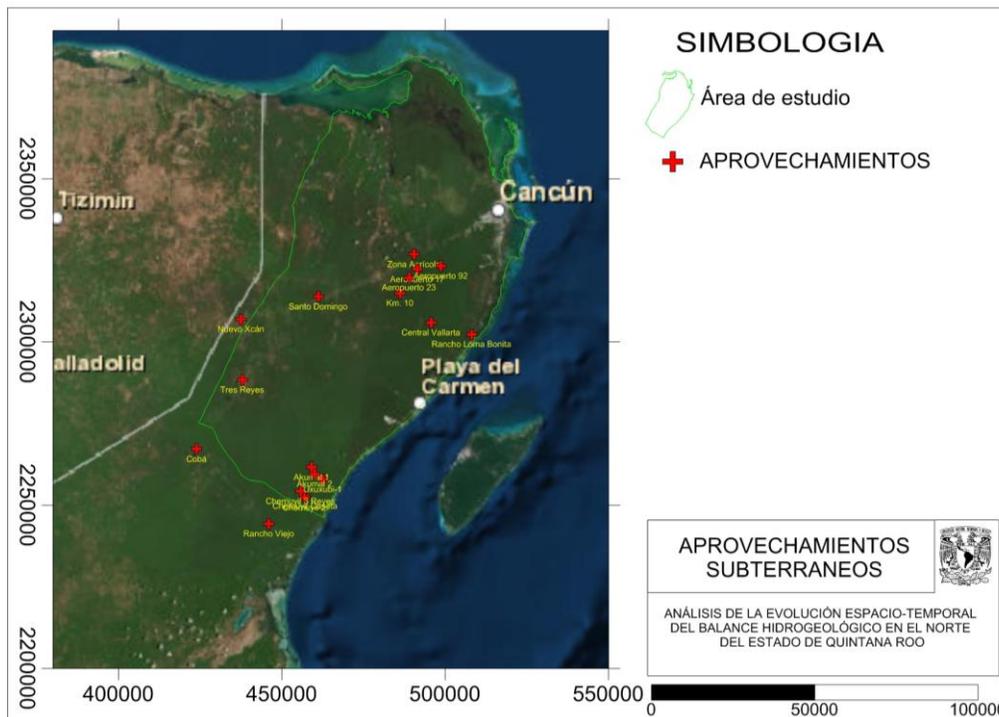
La red de monitoreo operada por Congua, que existe en la zona esta denominada como la zona Cancún-Tulum, de la cual consta de 18 aprovechamientos subterráneos (Figura 17).

**Tabla 15. Ubicación de pozos la red de monitoreo. UTM zona 16Q. Fuente: CONAGUA, 2002.**

Nº	Nombre del Pozo	Latitud	Longitud	X (m)	Y (m)
1	Zona Agrícola	21° 02' 31"	87° 05' 29"	490504.71	2326792.43
2	Santo Domingo	20° 55' 29"	87° 22' 23"	461209.17	2313861.55
3	Nuevo Xcán	20° 51' 42"	87° 36' 02"	437526.74	2306954.67
4	Tres Reyes	20° 41' 37"	87° 35' 46"	437920.49	2288353.46
5	Cobá	20° 30' 06"	87° 43' 45"	423968.31	2267166.81
6	Rancho Viejo	20° 17' 44"	87° 31' 00"	446054.99	2244272.45
7	Chemuyil Caseta	20° 22' 22"	87° 24' 37"	457184.45	2252787.16
8	Chemuyil-2	20° 22' 06"	87° 24' 47"	456893.33	2252295.97
9	Chemuyil 3 Reyes	20° 23' 09"	87° 25' 27"	455738.75	2254235.59
10	Uxuxubi-1	20° 25' 09"	87° 21' 32"	462558.53	2257908.34
11	Akumal 1	20° 27' 08"	87° 23' 30"	459147.65	2261574.27
12	Akumal 2	20° 26' 02"	87° 22' 57"	460099.05	2259543.15

Nº	Nombre del Pozo	Latitud	Longitud	X (m)	Y (m)
13	Rancho Loma Bonita	20° 49' 15"	86° 55' 19"	508121.00	2302320.00
14	Central Vallarta	20° 51' 12"	87° 02' 29"	495694.31	2305916.29
15	Km. 10	20° 56' 04"	87° 07' 57"	486223.42	2314898.1
16	Aeropuerto 17	21° 00' 02"	87° 04' 54"	491512.51	2322211.34
17	Aeropuerto 23	20° 58' 40"	87° 06' 22"	488970.00	2319691.00
18	Aeropuerto 92	21° 00' 36"	87° 00' 44"	498729.84	2323254.41

Los pozos de monitoreo utilizados por la Conagua se encuentran en la central del área de estudio (Tabla 15).



**Figura 18. Ubicación de la red de monitoreo Cancún-Tulum. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Conagua.**

Con base en los registros de monitoreo por parte de Conagua, se tienen registros de niveles de agua de los años 2006, 2007, 2008 y 2009. los niveles de agua oscilan en rangos de 6.15 metros a 20.54 metros (Figura 18), en la Tabla 16, se muestran los datos de profundidad de niveles de agua monitoreados.



**Tabla 16. Datos de profundidad del nivel estático (N.E.). Fuente: Conagua.**

Nº	Nombre del Pozo	Elevación del Brocal m.s.n.m.	Prof. del N.E. (2006), en m. (marzo)	Prof. del N.E. (2007), en m. (Nov)	Prof. del N.E. (2008), en m. (Nov)	Prof. del N.E. (2009), en m. (Nov)
1	Zona Agrícola	7.862	6.23	6.15	6.37	6.20
2	Santo Domingo	10.636	7.75	8.20	8.82	8.82
3	Nuevo Xcán	20.490	16.38	17.59	18.00	18.30
4	Tres Reyes	23.021	18.92	20.05	20.28	20.54
5	Cobá	7.862	4.24	4.64	4.92	5.05
6	Rancho Viejo	13.566	10.84	10.77	10.78	10.94
7	Chemuyil Caseta	12.669	10.81	10.75	10.73	0.00
8	Chemuyil-2	11.517	9.65	9.63	9.55	9.60
9	Chemuyil 3 Reyes	7.011	5.05	4.98	4.96	5.03
10	Uxuxubi-1	13.895	11.94	11.89	11.88	11.97
11	Akumal 1	6.887	5.01	4.88	4.97	5.03
12	Akumal 2	12.776	10.91	10.87	10.87	10.93
13	Rancho Loma Bonita	6.277	5.68	5.60	5.57	
14	Central Vallarta	5.575	4.29	4.20	4.29	4.23
15	Km. 10	6.915	5.45	5.40	5.60	5.46
16	Aeropuerto 17	8.425	6.84	6.76	6.95	
17	Aeropuerto 23	8.916	7.36	7.26	7.46	7.14
18	Aeropuerto 92	9.277	7.73	7.63	7.80	7.46

Considerado los valores de elevación topográfica de los brocales. Se calcula los valores de elevación del nivel estático (Figura 19), en la Tabla 17, se muestran la elevación del nivel estático.

**Tabla 17. Elevación del nivel estático. Valores expresados en metros.**

Nº	Nombre del Pozo	Elevación del Brocal m.s.n.m.	ENE_Mar06	ENE_Nov07	ENE_Nov08	ENE_Nov09
1	Zona Agrícola	7.862	1.632	1.712	1.492	1.662
2	Santo Domingo	10.636	2.886	2.436	1.816	1.816
3	Nuevo Xcán	20.49	4.110	2.900	2.490	2.190
4	Tres Reyes	23.021	4.101	2.971	2.741	2.481
5	Cobá	7.862	3.622	3.222	2.942	2.812
6	Rancho Viejo	13.566	2.726	2.796	2.786	2.626
7	Chemuyil Caseta	12.669	1.859	1.919	1.939	
8	Chemuyil-2	11.517	1.867	1.887	1.967	1.917

Nº	Nombre del Pozo	Elevación del Brocal m.s.n.m.	ENE_Mar06	ENE_Nov07	ENE_Nov08	ENE_Nov09
9	Chemuyil 3 Reyes	7.011	1.961	2.031	2.051	1.981
10	Uxuxubi-1	13.895	1.955	2.005	2.015	1.925
11	Akumal 1	6.887	1.877	2.007	1.917	1.857
12	Akumal 2	12.776	1.866	1.906	1.906	1.846
13	Rancho Loma Bonita	6.277	0.597	0.677	0.707	
14	Central Vallarta	5.575	1.285	1.375	1.285	1.345
15	Km. 10	6.915	1.465	1.515	1.315	1.455
16	Aeropuerto 17	8.425	1.585	1.665	1.475	
17	Aeropuerto 23	8.916	1.556	1.656	1.456	1.776
18	Aeropuerto 92	9.277	1.547	1.647	1.477	1.817

La mayor elevación del nivel estático se encuentra en la zona Sur-Oeste del acuífero y los niveles se van reduciendo a medida que se acercan a la zona costera.

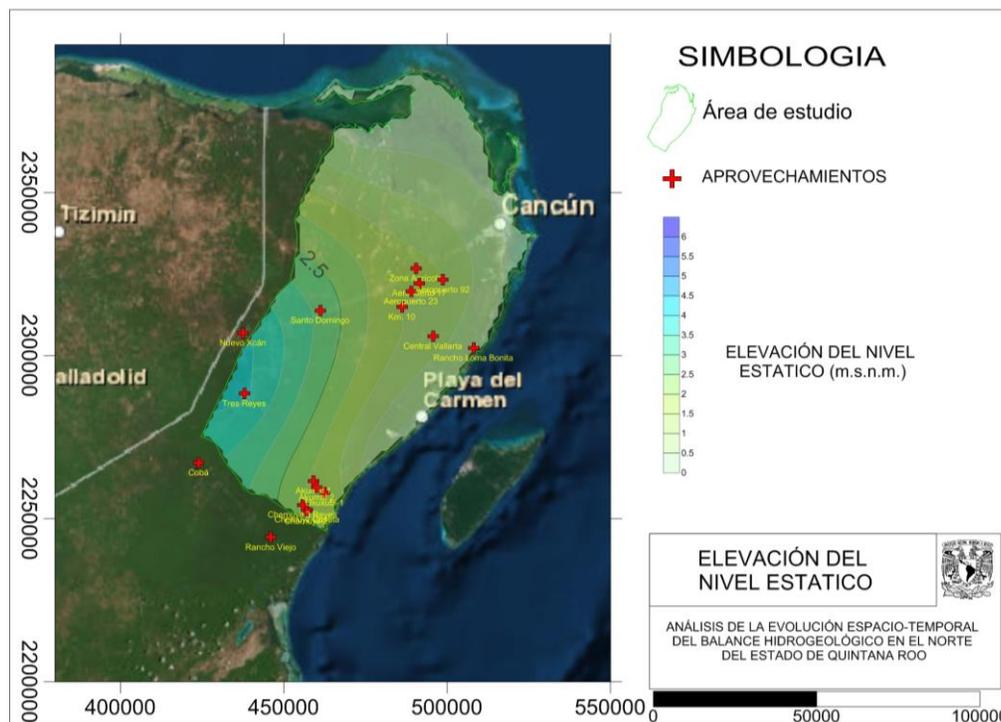


Figura 19. Elevación del nivel estático. Valores expresados en metros. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia.



### 3.2.7.2. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de la Península de Yucatán son tomados de la recopilación realizada en el artículo Hydrogeology Journal 2012 (Tabla 18). Los valores de conductividad hidráulica utilizados se tomaron de la literatura (Tabla 19).

**Tabla 18. Recopilación de valores de conductividad hidráulica. Fuente: Hydrogeology Journal 2012.**

k (m/s)		acuifero	método	localidad	autor
0.0116	0	U	Prueba de bombeo	21.0591 N, 87.0270 W	Aguakan S.A. de C.V. (2009)
0.004		U	Prueba de bombeo	21.0637 N, 87.0331 W	Aguakan S.A. de C.V. (2009)
0.0009	0.011	U	Prueba de bombeo	Mérida	Andrade-Briceño (1984)
0.1		U	Modelo numérico de calibración	Noroeste de Yucatán	Marín (1990)
1		HPZ	Modelo numérico de calibración	Noroeste de Yucatán	Marín (1990)
0.55	1.115	U	Modelo numérico de calibración	Noroeste de Yucatán	Gonzales-Herrera et al (2002)
6		HPZ	Modelo numérico de calibración	Noroeste de Yucatán	Gonzales-Herrera et al (2002)
0.0055		LPZ	Modelo numérico de calibración	Noroeste de Yucatán	Gonzales-Herrera et al (2002)
0.064		U	Modelo numérico de calibración	Mérida	Mendez-Ramos (1991)
0.36	2.59	U	Modelo numérico de calibración	Sureste de Quintana Roo	(B.R.N. Gondwe, Technical University of Denmark, unpublished data, 2010)
0.26	68.84	HPZ	Modelo numérico de calibración	Sureste de Quintana Roo	(B.R.N. Gondwe, Technical University of Denmark, unpublished data, 2010)
0.014	2.48	U	Modelo numérico de calibración	Península de Yucatán	Charvet (2009)
7.38	295.8	HPZ	Modelo numérico de calibración	Península de Yucatán	Charvet (2009)
0.19	065	U	Modelo numérico de calibración	Playa del Carmen	Moore et al. (1992)
0.00001	0.03	M	Prueba hidráulica de muestras de núcleos	Mérida	Gonzales-Herrera et al (1984)
0.031	0.5	M	Prueba hidráulica de muestras de núcleos	Norte de Mérida	Reeve and Perry (1990)



**Tabla 19. Los valores de la conductividad hidráulica ( K ) como se encuentran en la literatura para las áreas de la Península de Yucatán .**

K (m/s)		Localidad	Método utilizado	Autor
0.064		Estado de Yucatán, cerca de Mérida	Modelo matemático	Méndez Ramos (1991), cited in Villasuso & Ramos (2000)
1		Parte noreste de la Península de Yucatán	Used for a high-permeable layer in mathematical model	Marín (1990), cited in Villasuso & Ramos (2000)
0.1		Parte noreste de la Península de Yucatán	Se utiliza para una capa de baja permeabilidad en el modelo matemático, debajo de la capa de alta permeabilidad	Marin (1990), cited in Villasuso & Ramos (2000)
0.0003	0.5	Sitio en el norte de Mérida, ceca del Puerto Chuburna	Determinado en campo (sin referencia del método)	Reeve & Perry (1990). González-Herrera et al. (2002) cite that the upper level of Reeve & Perry's values was 0.5 m/s while Villasuso & Ramos (2000) cited the upper level to be 0.05 m/s.
0.001	0.01	Isla de Cozumel	Modelo matemático	Martínez Guerra (1990), cited in Villasuso & Ramos (2000)
0.000001	0.006	Mérida	Determinado en el laboratorio con pruebas de permeámetro en muestras de rocas de profundidades de hasta 80 m.	González-Herrera (1984), cited in Villasuso & Ramos (2000) and González-Herrera et al. (2002)
0.00032	0.0088	Sin referencia	Método similar al utilizado por González-Herrera (1984) aplicado en campo	Villasuso et al. (1984) and Villasuso (1990), both cited in Villasuso & Ramos (2000)
0.01		Sin referencia	Sin referencia	Back & Lesser (1981), cited in Villasuso & Ramos (2000)
0.0009	0.02	Planta de abastecimiento de agua en Mérida	Calculado	Andrade-Briceño (1984), cited in González-Herrera et al. (2002)
0.55		Estado de Yucatán	Determinado por la calibración de modelo matemático, utilizando un modelo conceptual homogéneo del acuífero	González-Herrera et al. (2002)
6		Estado de Yucatán	Asignados a la zona de alta porosidad en el "Anillo de Cenotes" en modelo matemático	González-Herrera et al. (2002)
0.15		Estado de Yucatán	Modelo matemático	González-Herrera et al. (2002)
0.0055		Estado de Yucatán	Determinado por la calibración del modelo matemático.	González-Herrera et al. (2002)



K (m/s)		Localidad	Método utilizado	Autor
1.115		Estado de Yucatán	Determinado por la calibración del modelo matemático.	González-Herrera et al. (2002)
0.65		8 km al sur de Playa del Carmen	Calculado a partir de la ley de Darcy usando la velocidad del agua medido y gradiente hidráulico medida, porosidad de 0.40	Moore et al. (1992)
0.19		9 km al sur de Playa del Carmen	Calculado a partir de la ley de Darcy usando la velocidad del agua medido y gradiente hidráulico-medida, porosidad de 0.12	Moore et al. (1992)



"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLÓGICO EN EL NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO"





## 4. METODOLOGÍA

Con el fin de determinar la recarga en la zona de estudio, se calculó el balance general dividido en dos partes, primero se estimó el balance superficial, calculando los valores de precipitación, evapotranspiración y la recarga superficial. Posteriormente se realizó el balance subterráneo donde se conocieron los valores de flujo subterráneo, extracción, cambio de almacenamiento y la recarga vertical.

A continuación, se describen las metodologías que se utilizaron para determinar los balances, superficial y subterráneo, así como la forma de relacionarlos en el área de estudio.

### 4.1. Balance superficial

El balance superficial se basó en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. El mismo establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo, la diferencia entre entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

Debido a las características de la zona de estudio, en el balance superficial no se consideró la existencia de escurrimientos superficiales ni almacenamientos como presas o embalses.

Para la zona de estudio el balance se determinó de la siguiente manera:

#### *Entradas*

La precipitación ( $P$ ), en forma de lluvia, realmente recibida en la superficie del suelo.

#### *Salidas*

Evapotranspiración ( $Evp$ ), generada por el suelo y la vegetación.

Infiltración ocurrida dentro del área de estudio ( $I$ ).

Por tanto, el balance hídrico para el área de estudio en cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, será representado por la siguiente ecuación (9):

$$(9) \quad P - Evp - I = 0$$

Dónde:

$P$ , es la precipitación en la zona de estudio.

$Evp$ , es la evapotranspiración superficial en la zona de estudio.

$I$ , es la infiltración en la zona de estudio.

En el caso de la infiltración se consideró que ésta tiene dos componentes, el agua que queda retenida en el suelo denominada como capacidad de campo y el agua que llega al acuífero señalada como recarga superficial, por lo que la infiltración expresada de la siguiente manera:

$$(10) \quad I = Cp + R$$



Donde

$I$ , Infiltración en la zona de estudio.

$Cp$ , La capacidad de campo en la zona de estudio.

$R$ , Recarga en la zona de estudio.

#### 4.1.1. Delimitación de estaciones climatológicas

Para el análisis climatológico del área de estudio, se consideraron las estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio y algunas alrededor de la misma. Se extrajeron los datos de temperatura y precipitación mensual. Los datos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Los criterios para seleccionar las estaciones fueron los siguientes:

- Estaciones con registros de precipitación y temperatura desde el año 1990 hasta 2009
- Utilizar las estaciones con un máximo de cuatro años faltantes de información.

##### 4.1.1.1. Contenido de la información de las estaciones

La información recabada en las estaciones climatológicas fue la siguiente:

- Ubicación geográfica.
- Elevación sobre el nivel medio del mar.
- Precipitación acumulada diaria.
- Precipitación acumulada mensual.
- Precipitación acumulada anual.
- Temperatura promedio mensual.

##### 4.1.1.2. Generación de información faltante

En los casos donde los registros históricos de las estaciones climatológicas carecieran de datos mensuales de temperatura o de precipitación, se utilizaron tres diferentes métodos con el fin de obtener registros históricos continuos:

1. Método U.S. National Weather Service.
2. Método racional deductivo.
3. Método de isoyetas.

**U.S. National Weather Service,**



El método se basa en estimar los datos faltantes a partir de los datos observados en estaciones cercanas.

El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad ( $W$ ), igual al recíproco del cuadrado de la distancia ( $D$ ) entre cada estación vecina y la estación ( $A$ ), (Campos, 1994) la lluvia buscada  $P_x$  será igual a:

$$(11) \quad P_x = \frac{\sum (P_i * W_i)}{\sum W_i}$$

Dónde:

$P_i$  = valor observado para la fecha faltante, en las estaciones auxiliares circundantes (mínimo 2), en milímetros.

$W_i = \frac{1}{D_i^2}$ , siendo  $D_i$  la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en Km.

El método funciona como sigue:

Seleccionar la estación que se utilizará para completar la información, buscar las estaciones cercanas y elegir el mes que carece de dato. Aplicar la ecuación antes mencionada, para obtener el valor deseado.

Cuando el método antes mencionado no logra su objetivo de completar la información, debe usarse otro criterio para completar los datos faltantes.

### Método Racional Deductivo

Este método es utilizado cuando no se tienen estaciones cercanas o éstas no presentan información completa, consiste en realizar un cálculo aritmético de los valores que se considera válidos si sólo se tiene un año faltante de datos. (Campos, 1994).

El método acepta la hipótesis que considera que los meses desconocidos tendrán un porcentaje igual al porcentaje promedio ( $S_j$ ). Se designa las variables siguientes:

$i$  = cada uno de los meses desconocidos, como máximos pueden ser once.

$P_i$  = valor mensual desconocido en cada año incompleto, en milímetros.

$\sum S_i$  = suma de los porcentajes promedio de los meses cuyo valor se desconoce, en porcentaje.

$\sum P$  = suma de los datos mensuales conocidas en los años incompletos, en milímetros.

$S_i$  = porcentajes promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

De acuerdo con las variables anteriores se puede establecer la siguiente proporción:



$$(12) \quad \frac{P_i}{S_i} = \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i}$$

Despejando  $P_i$  de la ecuación(12).

$$P_i = \left( \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i$$

La expresión entre paréntesis es una cantidad constante para cada año incompleto, por lo que finalmente se tiene:

$$(13) \quad P_i = K * S_i$$

### Método de las isoyetas

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones climatológicas; genera líneas que unen puntos de igual altura llamadas isoyetas.

$$(14) \quad \bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (\bar{h}_{pi} A'_i)$$

Donde

$A'$  = área (m<sup>2</sup>).

$\bar{h}_p$  = altura de promedio entre las dos isoyetas (mm).

#### 4.1.2. Análisis de precipitación y temperatura

La información de las estaciones climatológicas obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se calculó la temperatura promedio y las láminas de precipitación promedio y anuales acumulados en el acuífero. Para estimar la lámina de precipitación acumulada, se hace uso de la suma de los meses analizados en cada año, realizando un promedio aritmético con los datos anuales y obteniendo el valor promedio en cada estación. Dichas láminas mensuales fueron utilizadas para calcular el balance hídrico en la zona de estudio. Realizando una configuración de las curvas equipotenciales de precipitación de la zona, obteniendo los volúmenes mensuales y anuales de agua en el estado.

En el caso de la temperatura, se realizó un promedio de valores mensuales de cada estación climatológica. La temperatura fue utilizada en el cálculo de la evapotranspiración potencial.

La lámina de precipitación registrada describe la cantidad de agua acumulada mensualmente en las estaciones, esta información es necesaria para estimar el balance de agua superficial. Los



registros oficiales de las estaciones se complementaron con los datos calculados con los métodos ya mencionados en el capítulo 4.1.2.

#### 4.1.3. Cálculo de evapotranspiración potencial

Para estimar la recarga es necesario conocer los volúmenes que precipitan, infiltran y se evapotranspiran en la zona de estudio. El cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó el método de Thornthwaite, desarrollado en 1944, por medio del cual se determinó el valor potencial de las estaciones climatológicas. Para ello fue necesario contar con la ubicación geográfica de las estaciones climatológicas y temperatura mensual promedio. En esta determinación fue necesario definir ciertos parámetros, como se muestra a continuación:

Se calculó el valor mensual ( $K_a$ ) en cada estación climatológica a través de su coordenada geográfica de latitud (Tabla 20).

**Tabla 20. Valor del coeficiente  $K_a$  establecido según la latitud. Fuente: Aparicio, 1994.**

latitud, grados	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

Para determinar el valor de  $i_j$  se utilizó el siguiente cálculo:

$$(15) \quad i_j = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

Donde:

$T_j$ = Temperatura promedio en el mes  $j$ , en °C.

$j$ = número de mes.

$i_j$ = índice de eficiencia de temperatura.

Lo que sigue a continuación es una sumatoria de todos los valores  $i_j$ , para encontrar el valor de  $I$  en cada estación climatológica, este valor se utilizó para calcular la evapotranspiración potencial.

$$(16) \quad i)I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$



El resultado anterior se utilizó en la siguiente ecuación:

$$(17) \quad ii)a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492$$

Para calcular la evapotranspiración potencial mensual se utilizaron los valores de  $K_a$ ,  $I$  y de cada estación de la siguiente forma:

$$(18) \quad U_j = 1.6k_a \left( \frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Dónde:

$U_j$ = evapotranspiración potencial mensual (cm).

$T_j$ = temperatura promedio en el mes (°C).

$a, I$ = constantes determinadas en las ecuaciones (8) y (9).

$K_a$ = constante que depende de la latitud y el mes del año, obtenida en la Tabla 20. (Aparicio, 1994).

#### 4.1.1. Estimación de la humedad a capacidad de campo

La capacidad de campo fue utilizada para determinar la cantidad de agua retenida en el suelo durante el cálculo del balance superficial. Dicha capacidad fue calculada de forma puntual en cada estación climatológica.

Mediante el método de Green-Ampt, descrito en el capítulo 4.1.1.1, utilizando la información obtenida en campo en los puntos de verificación de las cartas edafológicas de INEGI, escala 1:250,000. La información obtenida en la cartografía requerida en el cálculo de la estimación de campo fue:

- Ubicación.
- Profundidad.
- Horizonte.
- Textura.

Con los resultados de la capacidad de campo calculada, se generó una interpolación de isovalores, con el fin de determinar la capacidad de campo en cada estación climatológica.

##### 4.1.1.1. Método de Green-Ampt

Para determinar los volúmenes de infiltración en la zona de estudio, es necesario conocer la lámina de infiltración puntual. Utilizando las características físicas encontradas en los suelos del



acuífero y asumiendo que se tiene una distribución uniforme de dichas características, la infiltración acumulada y la tasa de infiltración se calculó mediante el método de Green-Ampt.

Utilizando la información de los puntos de verificación de la cartografía de INEGI, se obtuvo las características físicas de forma puntual; en estos puntos se describieron los horizontes de los suelos, los datos manejados fueron:

- Porcentaje de limo, arcilla y arena.
- Profundidad de los horizontes.
- Tipo de horizonte.
- Espesor.
- Color.

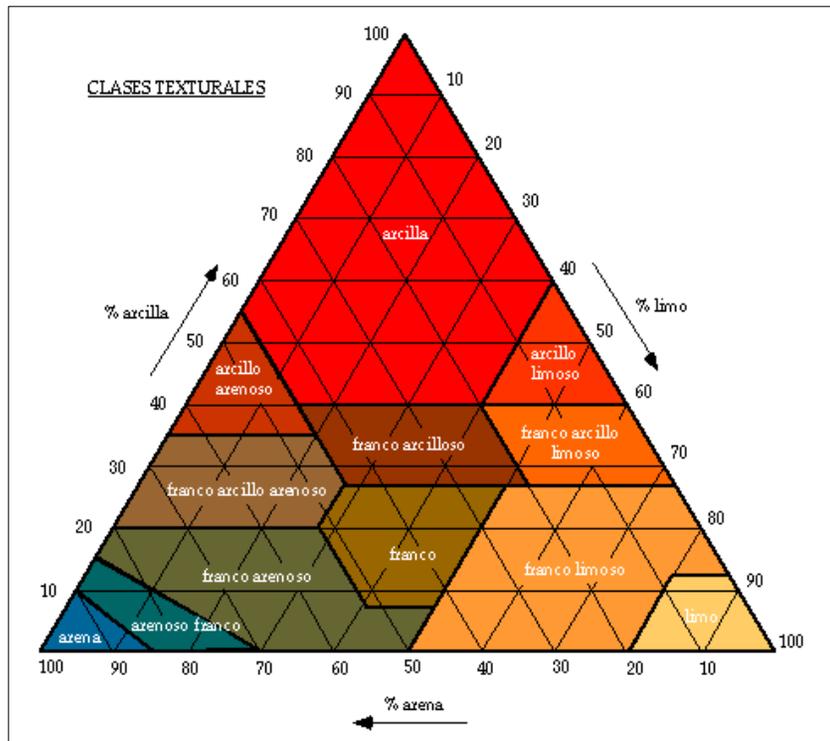
La información puntual del porcentaje de arena limo y arcilla; y utilizando el diagrama ternario se obtuvieron los parámetros iniciales de Green-Ampt:

Conductividad hidráulica ( $K$ ).

Saturada ( $K_s$ ) y no saturada ( $K(\theta)$ ).

Porosidad ( $\eta$ ).

Capilaridad ( $\psi$ ).



**Figura 20. Diagrama ternario de textura de suelo.**

Con base en los datos analíticos del suelo, se consideraron los porcentajes texturales de arena limo y arcilla, determinando la clase textural de suelo (Tabla 22). Con base en la bibliografía se tomaron los valores de Conductividad hidráulica y porosidad (Figura 20).

**Tabla 21. Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelos. Fuente: Chow, 1994.**

Clase de textura de suelo	n	$\psi$ cm	K cm/h
Arena	0.437 (0.374-0.500)	4.95 (0.97-25.36)	23.56
Arena Arcillosa	0.437 (0.363-0.506)	6.13 (1.35-27.94)	5.98
Franco Arenoso	0.453 (0.363-0.506)	11.01 (2.67-45.47)	2.18
Franco	0.463 (0.375-0.551)	8.89 (1.33-59.38)	1.32
Franco Limoso	0.501 (0.420-0.582)	16.68 (2.92-95.39)	0.68
Franco Arcillo	0.398	21.85	0.3



Clase de textura de suelo	n	$\psi$ cm	K cm/h
Arenoso	(0.420-0.582)	(2.92-95.39)	
	0.464	20.88	
Franco Arcilloso	(0.409-0.519)	(4.79-91.10)	0.2
	0.471	27.3	
Franco Arcillo Limoso	(0.418-0.524)	(5.67-131.50)	0.2
	0.43	23.9	
Arcilla Arenosa	(0.370-0.490)	(4.08-140.2)	0.12
	0.479	29.22	
Arcilla Limosa	(0.425-0.533)	(6.13-139.4)	0.1
	0.475	31.63	
Arcilla	(0.427-0.533)	(6.39-156.5)	0.006

$\psi$  , capilaridad, expresada en centímetros.

$K$  , conductividad hidráulica, expresada en cm/hora.

Para calcular la infiltración acumulada se utilizó la siguiente ecuación:

$$(19) \quad F(t) = K\Delta t + \psi\Delta\theta \ln \left\{ 1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right\}$$

Donde.

$F(t)$  , infiltración acumulada.

$K$  , conductividad hidráulica.

$\Delta t$  , intervalo de tiempo.

$\psi$  , succión de entrada de aire.

$\Delta\theta$  , cambio de contenido de humedad.

El valor  $\Delta\theta$  , se determinó de la siguiente manera:

$$(20) \quad \Delta\theta = \eta - \theta_i ,$$

Donde

$\Delta\theta$  , cambio de contenido de humedad.

$\theta_i$  , contenido inicial de agua.

$\eta$  , porosidad efectiva.

Donde la saturación efectiva  $S_e$  ,



$$(21) \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

Despejando se obtiene  $\theta_i$ , proviene de la siguiente expresión:

$$(22) \quad \theta_i = Se(\theta_e - \theta_r) + \theta_r$$

Donde

$\theta_i$ , contenido inicial de agua.

$Se$ , saturación efectiva.

$\eta$ , porosidad efectiva.

$\theta_r$ , contenido residual de humedad.

Conociendo  $\theta_i$ , calculando el valor de  $\Delta\theta$  la siguiente forma  $\Delta\theta = \eta - \theta_i$ ,

El valor de  $\Delta\theta$ , agregando a la ecuación (23):

$$F(t) = K\Delta t + \psi\Delta\theta \ln \left\{ 1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right\}$$

La solución de la ecuación requiere un valor inicial de  $F(t)$ , siendo este  $F(t) = K\Delta t$ , el siguiente valor  $F(t)$  se utiliza el valor encontrado, realizando una iteración.

Para la tasa de infiltración  $f(t)$ , se utilizó el valor de la infiltración acumulada  $F(t)$ , con la ecuación:

$$(24) \quad f(t) = K \left( \frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right)$$

Con los mismos parámetros ya mencionados.

En la longitud del frente húmedo utilizándola ecuación:

$$(25) \quad F(t) = L\Delta\theta$$

Donde

$F(t)$ , infiltración acumulada.

$L$ , profundidad del suelo.

$\Delta\theta$ , cambio de contenido de humedad.

Despejando la ecuación (16):



$$L = \frac{F(t)}{\Delta\theta}$$

El criterio para detener la iteración, que fue los tres primeros números decimales del valor resultante no cambió con respecto al resultado inmediato. Se modifica el intervalo de tiempo para realizar cálculo, repitiendo la iteración sucesivamente hasta encontrar la lámina de infiltración acumulada.

El cálculo se completa cuando el frente húmedo  $L$ , llega a la longitud final del perfil del suelo, Elaborando la gráfica entre la infiltración acumulada y la capacidad de campo, para conocer el comportamiento de cada suelo.

Dicho método fue utilizado en cada una de las estaciones climatológicas, considerando la profundidad por medio de la interpolación de las profundidades y la textura por medio de la cercanía con los puntos de verificación de INEGI.

#### **4.1.2. Método de Thornthwaite**

Para realizar el balance en un sitio determinado, deben conocerse los volúmenes de agua que se precipita, escurre hacia las salidas, se pierde por evaporación, es absorbido por las plantas y queda retenida en el suelo. Como no es posible medir todos los valores, se lleva a cabo un método indirecto, atribuido a Thornthwaite (Remenieras, 1974). Donde se explica a continuación:

El método consiste en calcular primero para cada mes una evapotranspiración potencial que puede asimilarse al poder evaporante de la atmósfera en la cuenca (Remenieras, 1974). El balance se efectúa de forma mensual en cada estación climatológica, utilizando los siguientes valores iniciales: lámina de precipitación, lámina de evapotranspiración potencial y la capacidad de campo. Los valores de precipitación se obtienen mediante los registros del SMN; los de evapotranspiración potencial se calculan por el método Thornthwaite. La capacidad de campo (la variación de la reserva de agua), por el método de Green-Ampt.

El procedimiento es el siguiente:

Se elabora una tabla de datos (Tabla 22): en la que, dentro de la primera columna, se incluyen, la evapotranspiración potencia, precipitación, variación de reserva de agua, reserva útil, evapotranspiración efectiva, déficit, excedente, diferencia de las precipitaciones y la evapotranspiración potencial, así como el coeficiente mensual de humedad.



**Tabla 22. Tabla tipo del balance hídrico. Fuente: Elaboración propia.**

Capacidad de campo													
ESTACIÓN													
clave CNA													
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	total
1	Evapotranspiración potencial												
2	Precipitaciones												
3	Variación de reserva de agua												
4	Reserva de agua útil												
5	Evapotranspiración efectiva												
6	Déficit												
7	Excedente												
9	Diferencia entre las precipitación y la evapotranspiración potencial												
10	Coefficiente mensual de humedad												

Los valores de la fila 2(precipitaciones) son los valores reportados en cada una de las estaciones climatológicas.

Con los valores de la fila 1, fila 2 y la capacidad de campo de cada estación se obtienen los valores para iniciar el balance hídrico.

El valor de la fila 2 se resta al de la fila 1, el resultado se coloca en la fila 9(Diferencia entre las precipitaciones y la evapotranspiración potencial).

Para determinar el coeficiente mensual de humedad (fila 10), se evalúa como sigue: el valor absoluto de la fila 9 se divide entre el valor de la fila 1, este coeficiente solo funciona para tener un registro de humedad mensual.

El valor de la reserva de agua útil (fila 4), está dado por la infiltración del suelo. Si el valor de la fila 9 es mayor al de la fila 4, la diferencia obtenida se colocará en la fila 7. Si el valor de la fila 9 es menor al de la fila 4, el valor de la fila 7 será cero.

Cuando se tiene el valor de la infiltración (fila 4), este valor no cambiará hasta que la fila 9 sea negativa. Al llegar a este punto, se le restará el valor de la fila 9 a la fila 4. Si los valores negativos persisten en los siguientes meses, se realizará el mismo cálculo hasta que la fila 4 llegue a cero. Si los valores de la fila 9 son positivos se sumarán a los de la fila 4, hasta volver a tener el valor de la reserva de agua igual a la infiltración.

Si el resultado de la resta entre la fila 9 y la fila 4 es positivo, el valor se coloca en la fila 7. Si el resultado es negativo el valor de la fila 7 será cero.

Para conocer el valor de la fila 5(evapotranspiración efectiva) se lleva a cabo lo siguiente:

1. cuando existe un valor diferente a cero en la fila 4, entonces el valor de la fila 5, es igual al valor de la fila 1.
2. si el valor de la fila 4, es igual a cero, el valor de la fila 5 será el de la fila 2, siempre y cuando el valor anterior de la fila 4, sea también cero.

El déficit (fila 6), se obtiene restando la fila 9 de la fila 5. Si existen valores de cero en los siguientes meses, el valor será igual al de la fila 9.



Para comprobar que el balance, se tiene que sumar los totales de la fila 7 más los totales de la fila 5 y el último valor calculado de la fila 4, la suma tendrá que ser igual al total de la suma de la fila 2.

### Volúmenes resultantes

Utilizando las láminas resultantes del balance superficial de los parámetros de precipitación, evapotranspiración y excedente (recarga directa), generados en cada estación climatológica, se calcula de la siguiente manera:

Con los datos de las estaciones climatológicas, se lleva a cabo una configuración de las curvas equipotenciales, de las láminas de precipitación, evapotranspiración efectiva y recarga directa de la zona de estudio, como se indica continuación:

$$(26) \quad \text{volumen}(m^3) = \text{area}(m^2) * \text{lamina}(m)$$

Donde:

área= Área de la zona de estudio en m<sup>2</sup>.

lamina, Lamina de cada parámetro en metros.

Para realizar el cálculo se utilizó el programa de cómputo SURFER©; dicho programa genera las curvas equipotenciales necesaria para determinar el volumen mensual y posteriormente los valores anuales, utilizando el método geoestadístico de Kriging.

## 4.2. Balance subterráneo

El balance subterráneo igual que el balance superficial se basó en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad.

La estimación del balance de aguas subterráneas se llevó a cabo por medio de la ecuación de continuidad:

$$(27) \quad FS_E + R - FS_S - ET - B = \pm \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Donde:

$FS_E$ , Flujo de agua subterránea que entra al acuífero m<sup>3</sup>/año.

$FS_S$ , Flujo de agua subterránea que sale del acuífero m<sup>3</sup>/año.

$R$ , La recarga vertical, m<sup>3</sup>/año.

$ET$  La evapotranspiración, m<sup>3</sup>/año.

$B$  Extracción por bombeo, m<sup>3</sup>/año.

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ , El cambio de almacenamiento en un intervalo de tiempo definido.



#### 4.2.1. Delimitación de los aprovechamientos subterráneos

Parte fundamental del balance subterráneo fue tener información de registros históricos de niveles de agua subterránea. La información que fue utilizada se enlista a continuación:

- Ubicación de los aprovechamientos.
- Profundidad de nivel de agua.
- Nivel del brocal.

Los registros fueron obtenidos de la base de datos de monitoreo de Conagua. Para conocer el comportamiento histórico de los niveles de agua, se realizaron hidrógrafos de Elevación del nivel estativo contra profundidad del nivel estático.

#### 4.2.2. Cálculo del flujo lateral

Mediante la dirección de flujo, se determinaron las celdas de entrada y salida del área de estudio. Para estimar el flujo lateral, se realizó a través de la ecuación de Darcy. Para tal efecto se elaboraron las redes de flujo de igual elevación del nivel estático para los años 2006, 2007, 2008 y 2009.

$$(28) \quad FS = TL \frac{dh}{dl}$$

Donde

$FS$ , es el gasto, expresado en  $m^3/s$ .

$T$ , es la transmisibilidad, expresada en  $m^2/s$ .

$L$ , el ancho representativo de la celda en cuestión, expresado en metros.

$\frac{dh}{dl}$ , es el gradiente hidráulico.

$dh$ , la diferencia entre los valores de las curvas de igual elevación del nivel estático que conforman cada celda, unidades.

$dl$ , la longitud representativa de las líneas de corriente que limitan lateralmente a cada una de las celdas, expresada en metros.

El procedimiento seguido para determinar flujo lateral fue el siguiente:

Con base a la información piezométrica, se realizó la configuración de elevación del nivel estático en la zona de estudio. Utilizando las cargas hidráulicas, se generaron curvas equipotenciales, con las cuales se determinaron las direcciones de flujo del agua subterránea.

La transmisibilidad ( $T$ ), se calculó con la siguiente ecuación:

$$(29) \quad T = kb$$

Donde:

$T$ , transmisibilidad del medio,  $m^2/seg$ .

$K$ , conductividad hidráulica,  $m/seg$ .

$b$ , espesor del acuífero, metros.

Los valores de  $k$  y  $b$ , se tomaron de las referencias bibliográficas analizadas. El valor de  $k$  (conductividad hidráulica) se tomó de las tablas de recopilación de información (Gondwe, 2012). El espesor del acuífero se tomó como referencia el valor de 19 metros de acuerdo con el estudio Estudio Hidrológico del Estado de Quintana Roo, (INEGI, 2002).

#### 4.2.3. Evapotranspiración subterránea

Para obtener el valor de la ETS, se utilizó la siguiente metodología: se identificaron los aprovechamientos con profundidad de nivel del agua menor a 10 metros. Utilizando los valores de la evapotranspiración superficial calculada en el balance superficial, se elaboró una configuración de líneas equipotenciales. Con base en el valor de evapotranspiración que cruza sobre cada aprovechamiento se realiza la relación ETS vs profundidad (Conagua, 2002).

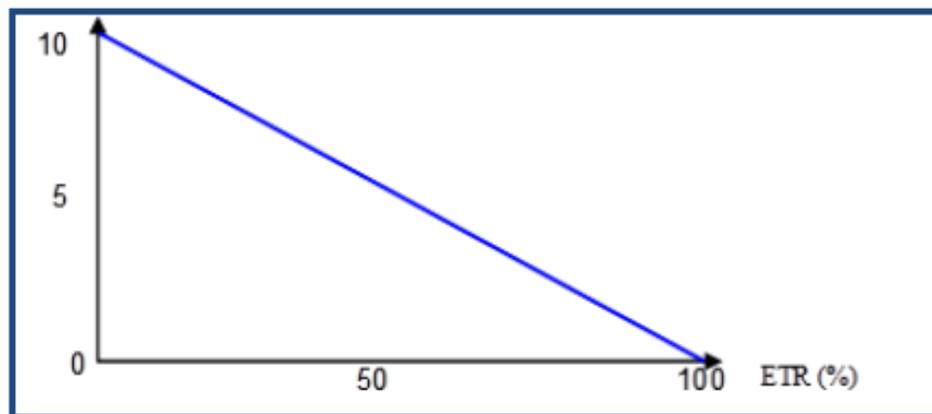


Figura 21. Relación ETS vs profundidad del agua. Fuente: Conagua, 2002.

#### 4.2.4. Extracción

Debido a la falta de información de las extracciones en la zona de estudio, para tomar determinar el valor de  $B$  (extracción por bombeo), se consideró el volumen de extracción reportado para Conagua por parte del REPDA (Registro Público de Derechos de Agua). Utilizando la ubicación de los aprovechamientos registrados en el REPDA, se toman solamente los que se encuentran dentro del área del acuífero de estudio.



#### 4.2.5. Cambio de almacenamiento

El cambio de almacenamiento se relaciona con el coeficiente de almacenamiento,  $S$ , de la siguiente manera.

$$(30) \quad S = \frac{\Delta V}{A\Delta h}$$

Donde

$A$ , Es la superficie del área afectada.

$\Delta h$ , El cambio del nivel estático.

$S$ , Coeficiente de almacenamiento.

Cambio de almacenamiento  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$

El cambio de almacenamiento  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ , se estima través de las curvas de igual evolución del nivel estático para los diferentes periodos considerados; midiendo las áreas asociadas a las curvas con valores positivos y negativos, los cuales corresponden a los volúmenes de descarga o recarga.

El método para realizarlo fue el siguiente: utilizando los valores de profundidad del nivel estático en dos periodos, se realizó una resta entre sus valores finales menos los iniciales, el valor resultante, ya sea positivo o negativo se configura para calcular el volumen positivo y negativo en el área de estudio.

El valore del Coeficiente de almacenamiento se tomará de la literatura donde se menciona un coeficiente 0.06 (Lesser, 1992).

#### 4.2.6. Recarga

El valor de la recarga ( $m^3/año$ ), se realizó mediante la relación de la ecuación del balance subterráneo la relación ya mencionada del coeficiente de almacenamiento.

Obteniendo la relación que se muestra a continuación derivado de la ecuación (26):

$$FS_E + R - FS_S - ET = \pm \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Donde

$$(31) \quad S = \frac{\Delta V}{A\Delta h}$$

Por lo tanto, la ecuación quedo de la siguiente manera:

$$(32) \quad (FS_E + R + (-FS_S - ET - B))\Delta t = \pm SA\Delta h$$



### **4.3. Calibración de la recarga**

Con los resultados del balance superficial y el balance subterráneo se realizó la calibración de la recarga de la forma siguiente:

Considerando que los volúmenes de la recarga superficial y el de la recarga subterránea deben de ser lo más similares entre sí, se comparan dichos volúmenes donde se tiene como variable la capacidad de campo del balance superficial.

En el caso de tener una variación significativa, en cuanto al volumen, se procedió a ajustar el valor de la capacidad de campo de cada estación climatológica y recalcular el balance superficial, esto se realizó a modo de prueba y error, hasta tener un volumen lo más cercano al requerido en el balance subterráneo.

Una vez calibrada la recarga, se obtuvo el valor de la capacidad de campo de cada estación climatológica y se recalcularon las láminas para posteriormente, calcular los volúmenes de precipitación, evapotranspiración y excedente (recarga) en el balance superficial.

### **4.4. Escenarios de cambio climático**

Una vez que se logró calibrar el balance superficial, la siguiente etapa fue determinar la recarga tomando en cuenta los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, considerando los horizontes (2015-2039), (2045-2069) (2075-2099), donde se obtuvieron las proyecciones climáticas temperatura, precipitación, porcentaje de cambio de precipitación. Dichas proyecciones se tomaron del modelo de circulación general (MGC) CNRMCM5 y el ensamble REA.

#### **4.4.1. Obtención de la información de los escenarios**

Con el fin de generar información puntual en cada una de las estaciones climatológicas y así poder generar el balance hídrico, se realizó la descarga de bases de datos geoespaciales de las proyecciones climáticas de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 mediante la página de la UNAM, del atlas climático digital de México, mediante el siguiente enlace <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/> (Figura 22).

Figura 22. Atlas Climático. Fuente: <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>.

Dentro de la página se buscó en la pestaña de Escenarios de Cambio climático regionales CMIP5, para descargar la base de datos de los escenarios planteados (Figura 23).

Figura 23. Pestaña del cambio climático. Fuente: UNAM.

Se descargó la información de los modelos CNRMCM5 y el ensamble REA, en los forzamientos radiativos RCP 4.5 y RCP 8.5, para los siguientes horizontes: CNRMCM5, 2015-2039, 2045-2059 y 2075-2099; REA para los horizontes 2015-2039 y 2075-2099. En este trabajo se utilizó una resolución espacial de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , con el fin de eficientar los tiempos de descarga (Figura 24), en la Figura 25, se muestra las pestañas de descarga.

para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación.  
Bases de datos

► Escenarios con resolución espacial de 30" x 30"

▼ Escenarios con resolución espacial 0.5° x 0.5°

Modelos de circulación global: BCC\_CSM1

Forzamiento radiativo: RCP 4.5

Horizonte: Futuro cercano: 2015-2039

Consulta

► Climatologías de referencia

Si utiliza los datos o materiales gráficos de la presente obra, le sugerimos los refera de la siguiente forma:  
"Nombre del mapa o de los datos respectivos", en:

Fernández Eguarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A. C. y Trejo Vázquez, R.I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR en trámite. Obtenido de: <http://datosclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>

**Figura 24. Descarga de datos climatológicos. Fuente: UNAM.**

Los datos descargados fueron:

- Temperatura máxima (°C).
- Temperatura promedio (°C).
- Temperatura mínima (°C).
- Precipitación (mm).
- Porcentaje de cambio de precipitación (% de cambio).

Univ

Modelo: CNRMCM5 RCP: 4.5 Futuro cercano: 2015-2039

Temperatura máxima (°C)	<a href="#">bases de datos</a>	<a href="#">metadato</a>
Temperatura promedio (°C)	<a href="#">bases de datos</a>	<a href="#">metadato</a>
Temperatura mínima (°C)	<a href="#">bases de datos</a>	<a href="#">metadato</a>
Precipitación (mm)	<a href="#">bases de datos</a>	<a href="#">metadato</a>
Porcentaje de cambio de precipitación (% de cambio)	<a href="#">bases de datos</a>	<a href="#">metadato</a>

Cerrar

Horizonte: Futuro cercano: 2015-2039

Consulta

► Climatologías de referencia

Si utiliza los datos o materiales gráficos de la presente obra, le sugerimos los refera de la siguiente forma:  
"Nombre del mapa o de los datos respectivos", en:

**Figura 25. Descarga de la base de datos. Fuente: UNAM.**

Una vez descargados los datos, se realizó una georreferenciación de los datos mediante el programa Global Mapper®. Para el presente estudio se utilizó una proyección a coordenadas UTM, con un DATUM WGS84, y la zona 16 N. dichos datos fueron transformados y exportados para el programa SUFER®, en donde se pudieron visualizar y generar los cálculos necesarios.

Con estos datos se generó una configuración de isovalores mediante el método geoestadístico de Kriging, para lo cual se utilizó el programa de SUFER® (Figura 26), con el fin de generar una digitalización de los valores de Temperatura y Precipitación de cada una de las estaciones climatológicas que se utilizan en el balance.

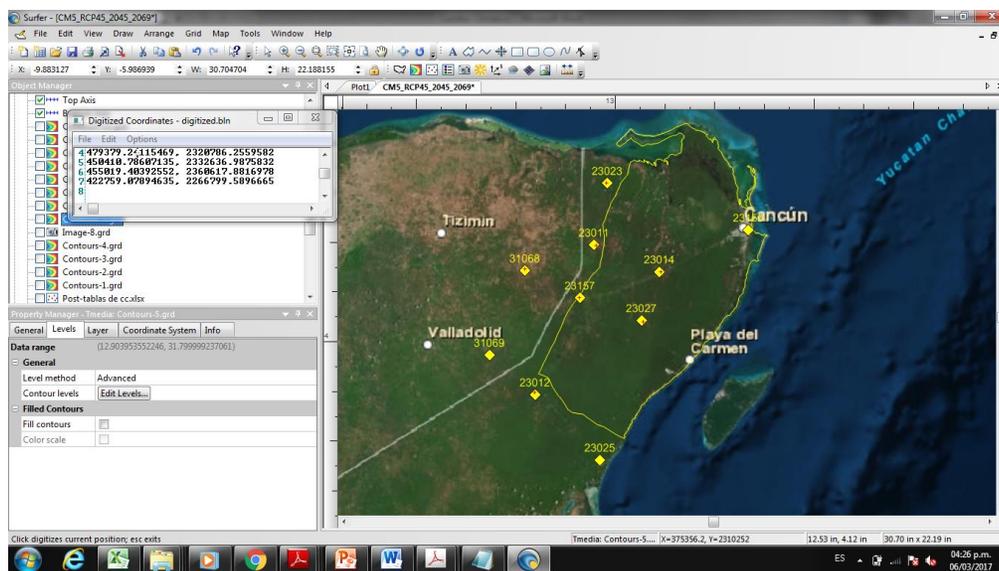


Figura 26. Digitalización de los valores dentro del programa de computo.

#### 4.4.2. Estimación de la recarga con base en los escenarios

Para calcular la recarga con base en los horizontes de los dos escenarios de cambio climático seleccionados RCP 4.5 y RCP 8.5, fue necesario realizar el balance hídrico con las láminas de precipitación, temperatura que fueron generadas con los mapas de las proyecciones climáticas.

El balance se realizó de manera similar al realizado en el balance superficial, con el fin de obtener los valores de Precipitación, Evapotranspiración e Infiltración de manera puntual en cada estación climatológica y posteriormente se generaron configuraciones de isovalores para obtener los volúmenes considerados.



Se realizaron los siguientes balances teniendo las siguientes consideraciones:

- Balance hídrico considerando la precipitación y temperatura proyectadas en los distintos horizontes, teniendo la misma capacidad de campo en el suelo.
- Balance hídrico, considerando el porcentaje de cambio de la precipitación mensual promedio del periodo analizado (1990-2009); el valor de la temperatura proyectada y conservando la misma capacidad de campo.

#### **4.5. Variación de la recarga bajo distintos escenarios**

Mediante los resultados generados en el balance hídrico en cada uno de los horizontes de los dos escenarios de cambio climático, se realizara una comparativa entre el valor de la recarga calculado con los registros históricos y los volúmenes de recarga de los diferentes horizontes con el fin de determinar el porcentaje de variación entre los valores calculados en el rango de los tiempos analizados (1990-2009), con los tres horizontes analizados bajo dos escenarios determinados (RCP 4.5 y RCP 8.5).



"ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL BALANCE  
HIDROGEOLÓGICO EN EL NORTE DEL ESTADO DE QUINTANA ROO"





## 5. RESULTADOS

Utilizando la metodología mencionada en el capítulo 4, se generaron los resultados del balance hídrico del Acuífero Norte de Quintana Roo. Donde se determinaron volúmenes de recarga bajo los diferentes horizontes.

### 5.1. Balance superficial

Mediante los métodos descritos en el capítulo METODOLOGÍA, se obtuvieron las láminas mensuales y anuales en cada estación climatológica de precipitación, evapotranspiración potencial y efectiva, el excedente de agua. Con dichas laminas y con el área de estudio se determinaron los volúmenes de precipitación, evapotranspiración y el excedente en el balance superficial, como se ha mencionado el excedente será considerado como la recarga directa.

#### 5.1.1. Delimitación de las estaciones climatológicas

El análisis climatológico en la zona de estudio se consideraron 17 estaciones: tres en el Estado de Yucatán y 14 en Quintana Roo. Obteniendo los valores de temperatura promedio, precipitación acumulada mensual. En la Tabla 23, se muestra la ubicación de las estaciones climatológicas.

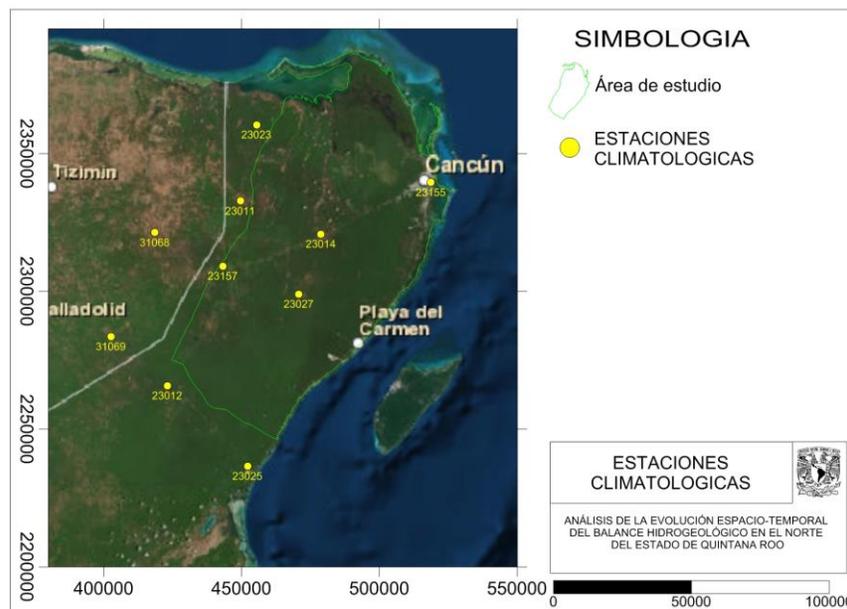
**Tabla 23. Estaciones climatológicas, coordenadas UTM 16Q. Fuente: SMN.**

CLAVE	NOMBRE	LONGITUD (Grados)	LATITUD (Grados)	ALTURA (metros)	X (metros)	Y (metros)
23003	Felipe Carrillo Puerto	-88.0450°	19.5760°	22.0	390388.00	2164924.55
23011	Kantunilkin, Lazaro Cardenas	-87.4860°	21.0960°	33.0	449520.00	2332879.06
23012	Coba, Solidaridad	-87.7380°	20.4890°	23.0	423037.74	2265797.68
23013	La Presumida, Jose Ma. Morelos	-88.7540°	19.8020°	46.0	316264.32	2190551.24
23014	Leona Vicario, Benito Juarez	-87.2040°	20.9880°	22.0	478795.92	2320862.61
23022	Sr., Felipe C. Puerto	-88.1380°	19.8470°	37.0	380833.70	2194979.79
23023	Solferino, Lazaro Cardenas	-87.4300°	21.3460°	23.0	455412.26	2360532.26
23024	Tihosuco, Felipe C. Puerto	-88.3660°	20.1930°	63.0	357267.99	2233454.42
23025	Tulum, Solidaridad	-87.4580°	20.2260°	25.0	452157.19	2236585.06
23027	Victoria, Lazaro Cardenas	-87.2810°	20.7910°	32.0	470754.25	2299071.94
23031	X-Pichil, Felipe C. Puerto	-88.3764°	19.6944°	S/D	355728.84	2178275.49
23041	Dziuche, Jose Ma. Morelos	-88.8120°	19.9010°	55.0	310304.87	2201574.91
23155	Cancun, Benito Juarez	-86.8200°	21.1570°	1.0	518688.34	2339563.84
23157	Ideal, Lazaro Cardenas	-87.5460°	20.8820°	33.0	443207.40	2309214.13
31008	Chan-Chichimila	-88.4760°	20.3910°	26.0	345968.17	2255470.17

CLAVE	NOMBRE	LONGITUD (Grados)	LATITUD (Grados)	ALTURA (metros)	X (metros)	Y (metros)
31068	Chancenote, Tizimin	-87.7840°	20.9910°	30.0	418509.66	2321380.84
31069	Chemax, Chemax	-87.9350°	20.6490°	26.0	402593.92	2283611.51

S/D, Sin datos

La distribución espacial de las estaciones climatológica se muestra en la Figura 27, donde las estaciones, más son al norte es la estación 23023 y al sur la estación 23003.



**Figura 27. Ubicación de las estaciones. La nomenclatura y características se muestran en la Tabla 23 (nombre y coordenadas de cada estación). Coordenadas UTM (16Q). Fuente: SMN.**

### 5.1.2. Análisis de la precipitación

Con base en los registros del SMN, se determinaron las láminas de precipitación acumuladas mensual y anual. Se realizó un promedio aritmético de la lámina de precipitación anual, con el fin de conocer el comportamiento de la precipitación en cada estación climatológica.

Los resultados se obtuvieron mediante los métodos descritos en capítulo 4.1.2. El análisis de la precipitación permitió conocer el comportamiento en el periodo comprendido entre los años 1990 a 2010, utilizando los volúmenes de precipitación mensual y anual. En la Tabla, se muestra la lámina de precipitación acumulada del 1990 a 1997.



**Tabla 24. Lámina de precipitación acumulada anual (1990-1997), (valores expresados en milímetros).  
Fuente: SMN.**

ESTACIÓN	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
23003	1374.7	1006.2	1569.8	1699.9	1016.6	1313.7	1392.2	1551
23011	1185.3	1040.3	1227.5	1571	1369.3	1231.99	1300	1438.79
23012	1223.22	1031.5	1425.7	1065.6	1223.5	964.5	1436.1	1452.4
23013	1088.33	1243.8	1186.82	1539.8	1300.9	1900	1267.7	1599.6
23014	1226.7	1116.26	1483.94	849.59	501.9	969.5	668.9	1559.73
23022	1027.7	999.1	1407.13	1140.64	795.23	951.9	1496	1544.7
23023	1181.5	1007	1179.1	1201	1031.5	1532.5	1006	1507.5
23024	1616.46	1001.4	1024.52	1482.21	884.7	1232.1	1079.5	1512.6
23025	1527.98	1152.7	720.2	495.41	374.2	815.89	1404.21	874.5
23027	1339.5	1170	1356.5	1886	1079.7	1663.2	1537.3	1583.5
23031	1090.1	875.8	992.8	1014.3	814.1	927.2	874.1	1438.9
23041	1068.5	1360.5	1004.5	666.3	502.56	1492.7	1143.5	1543.21
23155	1263.41	1181.8	1325.5	1486.3	1103.8	1646.2	1032	1328.2
23157	1164.89	1431.6	1341.9	1788.8	1319.2	1646.2	1072.5	1772
31008	1224.9	1068.36	1102.5	1579.2	845	1258.9	1185.5	1623.5
31068	926.6	1535.44	1014.9	1529	1019	1279	1059	1475
31069	393.64	1424.04	1111	1177.3	998.8	1876.5	1115.5	1273

En la Tabla 25 se muestra la precipitación acumulada para el periodo 1998-2005.

**Tabla 25. Lámina de precipitación acumulada anual (1998-2005), (valores expresados en milímetros).  
Fuente: SMN.**

ESTACIÓN	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
23003	1626.2	1611.8	1323.4	1156.4	1314.7	1083.46	1212.8	1341.5
23011	1341	1370	1271.5	1158.6	1161.1	1061.75	1200	1487.46
23012	1420.1	1121.5	1170.1	834.8	1657.6	1047.5	1134.97	1357.25
23013	1087.1	1057.63	1110.9	1038.3	1593.2	922.2	1277.1	1199.9
23014	1488.4	1424.8	1016	1024.9	1301.7	1010.2	1323.97	1122.3
23022	1782.5	1492.3	1308	1232.2	1549.9	919.5	925.4	1212.9
23023	1189.5	1367.6	1203.6	1150.8	1622.8	1202.3	995.00	1663.8
23024	1207.1	1063.1	1088.2	927.1	1817.5	794.08	1250.73	1690.25
23025	1383.71	1593.47	1183.4	966.97	1640.49	860.8	1192.12	1690.15
23027	1461	1739.3	1086.2	1302.1	1381.4	1401.4	1391.36	1577.8
23031	965.5	1447.9	1013.7	1112.2	1537.1	1055.3	982.70	1361.3
23041	1223.11	1572.6	1059.2	1578.5	1529.81	917.5	904.10	1421.7



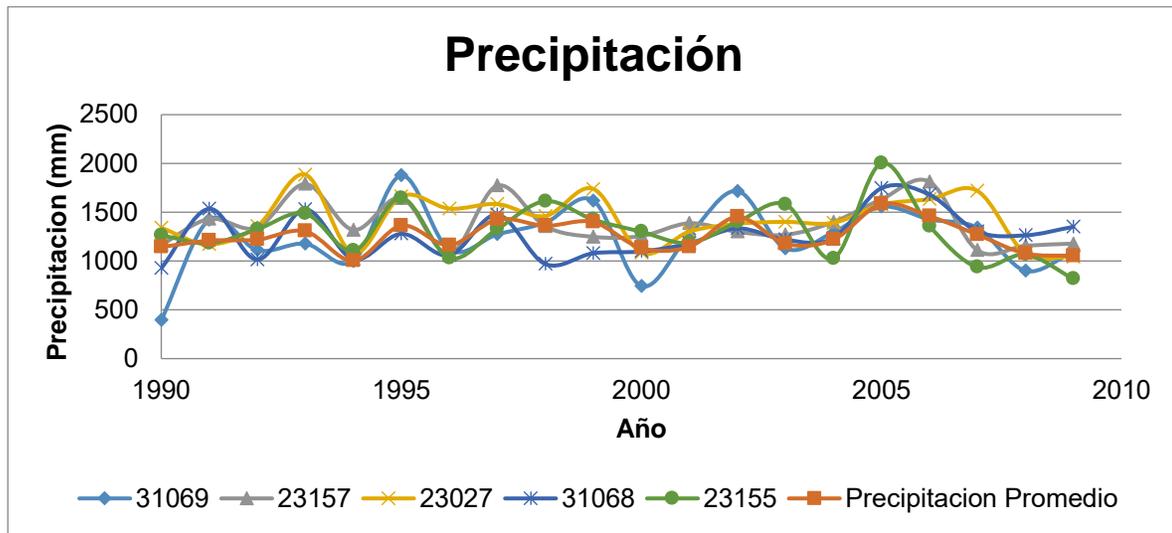
ESTACIÓN	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
23155	1613.7	1424.3	1300.5	1184.7	1399.41	1581.4	1026.3	2001.5
23157	1356.5	1248.00	1255.8	1387.3	1299.51	1268.7	1399.6	1632.4
31008	1384.2	1645.00	1423	867	1739.4	869.5	1065	1383.82
31068	969.00	1080	1098.3	1180.8	1334.7	1217.8	1234.00	1746.1
31069	1392.6	1619.3	743.9	1268.7	1717.6	1129.16	1293.2	1556

En la Tabla 26, se muestra la precipitación acumulada anual para el periodo 2006-2009, en las estaciones climatológicas.

**Tabla 26. Lámina de precipitación acumulada anual (2006-2009), (valores expresados en milímetros).  
Fuente: SMN.**

ESTACION	2006	2007	2008	2009
23003	1141.10	1394.00	1073.00	820.60
23011	1969.97	1577.00	1414.50	1596.50
23012	929.90	747.80	816.10	1001.34
23013	1601.96	1544.40	1235.10	887.20
23014	1518.01	1686.00	1035.77	808.50
23022	913.57	1307.30	1122.10	1071.60
23023	1259.20	1060.50	923.40	839.60
23024	1131.25	1546.06	964.20	905.34
23025	1068.00	1227.29	1127.00	801.75
23027	1633.51	1718.56	1078.68	1042.44
23031	1167.68	1176.65	1167.49	1018.10
23041	1775.88	1085.30	1126.50	1179.70
23155	1358.70	938.20	1066.10	817.50
23157	1812.29	1109.90	1157.00	1178.30
31008	1361.50	419.25	1085.84	866.30
31068	1681.78	1302.70	1263.28	1350.91
31069	1427.33	1339.79	899.94	1093.50

Con el fin de obtener una visualización del comportamiento de la precipitación en la serie de tiempo se realizaron graficas de precipitación contra tiempo. En la Figura 28, se muestra el comportamiento de la precipitación.



**Figura 28. Lámina de precipitación anual de las estaciones climatológicas. Fuente: Elaboración propia.**

Con base en los registros anuales señalados en la Tabla 26, se obtuvieron los valores anuales estadísticos básicos (valores promedio, máximo y mínimo). En la Tabla 27, se muestra los valores estadísticos en los registros utilizados en el balance.

**Tabla 27. Valores promedio de precipitación. (Valores expresados en milímetros).**

Año	Promedio	Máximo	Mínimo
1990	1,206.82	1,733.90	393.64
1991	1,133.11	1,535.44	628.9
1992	1,254.54	1,655.20	720.2
1993	1,427.86	2,397.30	495.41
1994	987.46	1,369.30	374.2
1995	1,403.90	1,900.00	815.89
1996	1,196.77	1,679.60	668.9
1997	1,398.01	2,015.60	874.5
1998	1,408.04	1,917.60	920.2
1999	1,417.64	1,806.90	935.6
2000	1,216.15	1,758.00	743.9
2001	1,211.78	1,924.90	482
2002	1,282.37	1,817.50	272
2003	967.36	1,581.40	365.47
2004	1,063.98	1,399.60	220
2005	1,325.37	2,001.50	349
2006	1,271.77	1,969.97	423.48

Año	Promedio	Máximo	Mínimo
2007	1,169.13	1,718.56	389.4
2008	1,168.17	1,725.20	727.3
2009	974.32	1,596.50	439.3

La distribución espacial de la lámina de precipitación anual acumulada en la zona de estudio se mostró que las máximas precipitaciones se registraron en la estación 23011, ubicada en el municipio de Lázaro Cárdenas. Dichas láminas se reducen en dirección de la zona de costera del acuífero. En la Figura 29, se muestra la lámina de precipitación acumulada.

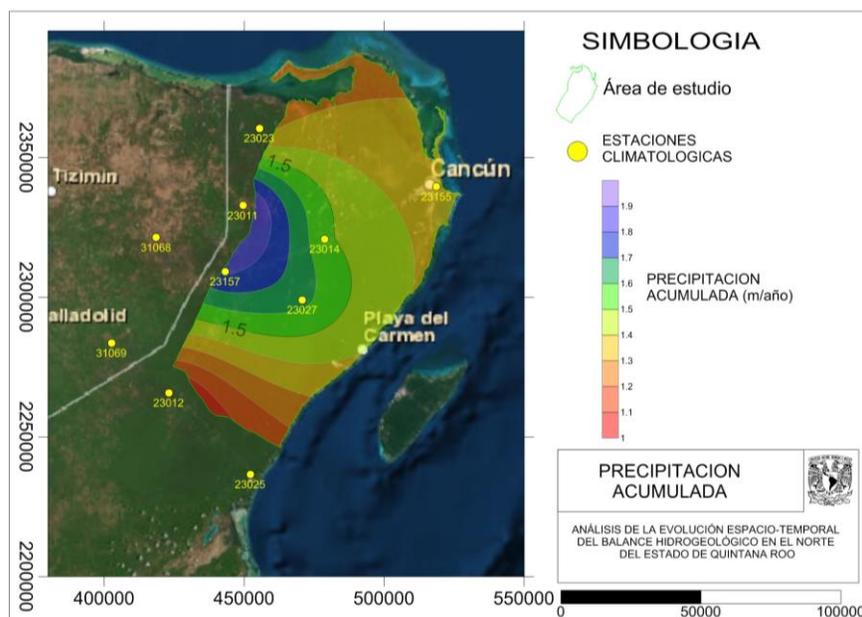
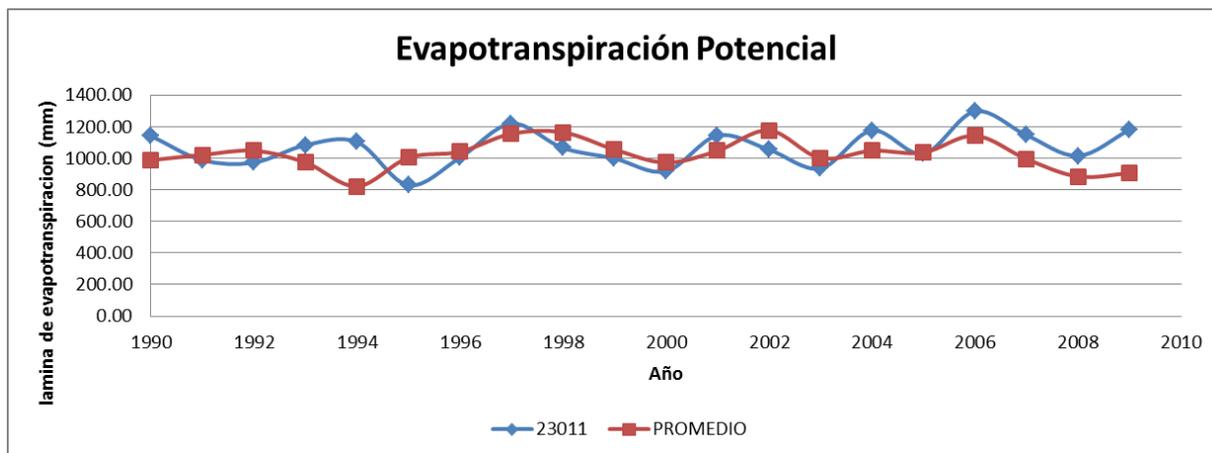


Figura 29. Lámina de precipitación acumulada para el año 2006. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.3. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial fue calculada a partir de las ecuaciones que se mencionan en el capítulo 4.1.3 Cálculo de evapotranspiración potencial). Obteniendo la lámina de evapotranspiración potencial en cada una de las estaciones climatológicas. La Figura 30, muestra la evapotranspiración potencial calculada, comparándola con la evapotranspiración promedio.



**Figura 30. Comportamiento de la evapotranspiración potencial, estación 23011. Fuente: Elaboración Propia.**

En la Tabla 28, se muestran los valores de las láminas de evapotranspiración potencial calculadas para cada estación climatológica.

**Tabla 28. Láminas de evapotranspiración potencial anual (valores expresados en milímetros).**

ESTACIÓN	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
23011	1144.06	989.93	974.25	1085.01	1105.15	830.94	1005.07	1221.28	1067.32	1000.67
23012	1033.25	975.26	932.53	770.38	775.01	892.22	1056.16	947.64	1218.12	874.75
23014	1056.90	886.78	1253.46	654.38	501.90	740.85	668.90	1098.41	1271.02	1006.83
23023	1087.25	999.56	1152.73	1100.85	995.80	1124.10	998.08	1361.63	1179.46	1054.67
23025	1011.25	870.23	789.51	397.96	374.20	603.63	1135.99	846.82	1189.14	1222.86
23027	1140.26	920.16	1175.40	1197.26	881.50	1146.98	1349.26	974.18	1077.58	1002.22
23041	987.51	1232.76	1112.30	666.30	502.56	1117.73	1154.05	1176.98	1155.04	1046.83
23155	1100.04	1104.08	1042.28	1165.79	1009.27	1143.30	974.07	1065.49	1232.83	1189.07
23157	1074.76	1112.44	1058.13	1215.74	981.16	1120.62	978.55	1338.52	1151.15	992.58
31068	860.95	1112.33	952.69	1419.09	1019.00	1058.47	1059.00	1428.60	969.00	1080.00
31069	393.64	1053.96	1104.75	1057.67	915.25	1286.39	1090.87	1273.00	1322.76	1164.32

ESTACIÓN	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
23011	919.54	1145.87	1056.47	937.78	1177.49	1030.71	1299.34	1149.02	1017.03	1182.50
23012	906.84	772.50	1131.31	984.67	941.55	906.30	920.33	403.75	746.63	960.59
23014	933.04	921.75	1214.32	895.34	1107.03	1010.35	1173.54	1285.29	880.60	698.97
23023	1011.59	975.12	1083.96	952.55	1010.24	978.96	1060.23	940.46	887.27	702.09
23025	1136.73	1004.61	1242.66	909.38	1082.41	1194.99	1083.40	1068.65	813.77	801.75
23027	911.47	1015.28	1094.88	979.45	867.49	1014.22	1282.73	1055.67	812.22	876.52
23041	1074.74	1277.49	1323.94	944.33	904.10	1022.45	990.45	918.47	856.92	830.15



ESTACIÓN	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
23155	919.92	911.34	1218.52	1251.34	1022.96	884.03	951.22	881.51	747.88	642.69
23157	1047.90	1136.11	1105.28	1198.47	1204.55	1103.52	1310.09	1063.69	1044.34	1052.45
31068	1078.03	1153.62	1151.75	1140.39	1157.05	1207.23	1334.75	1160.86	1059.68	1176.42
31069	779.76	1225.33	1345.01	834.69	1070.86	1067.24	1194.01	1042.29	881.30	1055.35

#### 5.1.4. Capacidad de campo

Utilizando el método de Green-Ampt se obtuvieron los siguientes parámetros de acuerdo con las texturas del suelo halladas alrededor de las estaciones climatológicas en la zona de estudio. De acuerdo con cada una de las texturas el comportamiento es el siguiente:

##### Suelo tipo Arcilloso

En la Tabla 29, se muestran los resultados del cálculo realizado para determinar la capacidad de campo del suelo de textura Arcillosa.

**Tabla 29. Capacidad de campo, suelo Arcilloso.**

Dt(h)	F(t) cm	f(t)	L cm
	Infiltración Acumulada	Tasa de Infiltración	Longitud del frente húmedo
0.5	0.35	1.38	2.85
1	0.5	0.97	4.08
1.5	0.62	0.79	5.04
2	0.72	0.68	5.86
2.5	0.82	0.61	6.6
3	0.9	0.56	7.27
3.5	0.98	0.52	7.9
4	1.05	0.48	8.49
4.5	1.12	0.45	9.05
5	1.19	0.43	9.58
5.5	1.25	0.41	10.09
6	1.31	0.39	10.59
6.5	1.32	0.39	10.71

Dt, intervalo de tiempo de 0.5 horas.

F (t), infiltración acumulada expresada en centímetros.

f(t) la tasa de infiltración expresada en cm/h.

L, la longitud del frente húmedo expresado en centímetros.

En la Figura 31, se muestra el comportamiento de la infiltración acumulada y la tasa de infiltración de suelo de textura tipo arcilla.

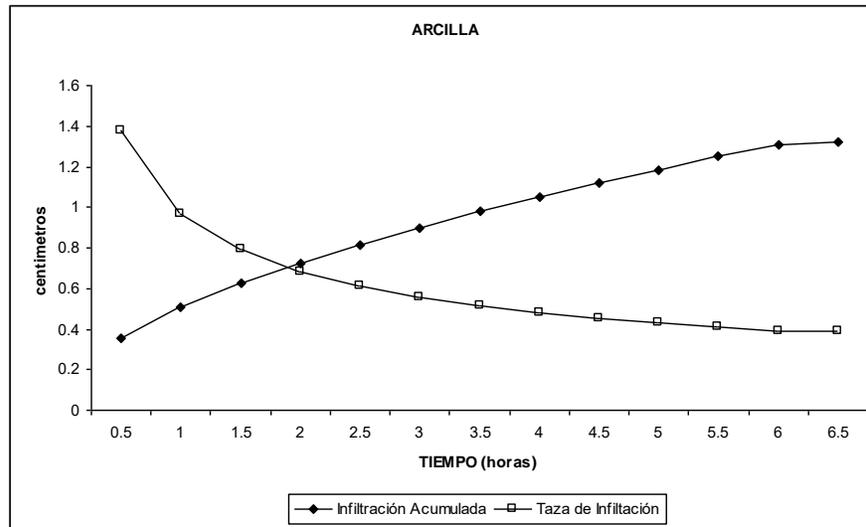


Figura 31. Comportamiento de la arcilla. Fuente: Elaboración Propia.

### Suelo tipo Franco Arcilloso

En la Tabla 30, se muestran los resultados del cálculo realizado para determinar la capacidad de campo del suelo de textura Franco arcilloso.

Tabla 30. Capacidad de campo, suelo Franco Arcilloso.

Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
0.5	0.1	10.6	1.03
0.5	0.99	1.86	3.91
1	1.48	1.36	5.81
1.5	1.88	1.15	7.38
2	2.23	1.02	8.78
2.5	2.56	0.93	10.08
3	2.87	0.87	11.31
3.5	3.17	0.82	12.48
4	3.46	0.78	13.6
4.5	3.73	0.74	14.69
5	4	0.72	15.75
5.5	4.27	0.69	16.78
6	4.52	0.67	17.8



Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
6.5	4.78	0.66	18.79
7	4.95	0.65	19.46

Dt, intervalo de tiempo de 0.5 horas.

F(t), infiltración acumulada expresada en centímetros.

f(t) la tasa de infiltración expresada en cm/h.

L, la longitud del frente húmedo expresado en centímetros.

En la Figura 32, se muestra el comportamiento de la infiltración acumulada y la tasa de infiltración de suelo de textura tipo Franco Arcilloso.

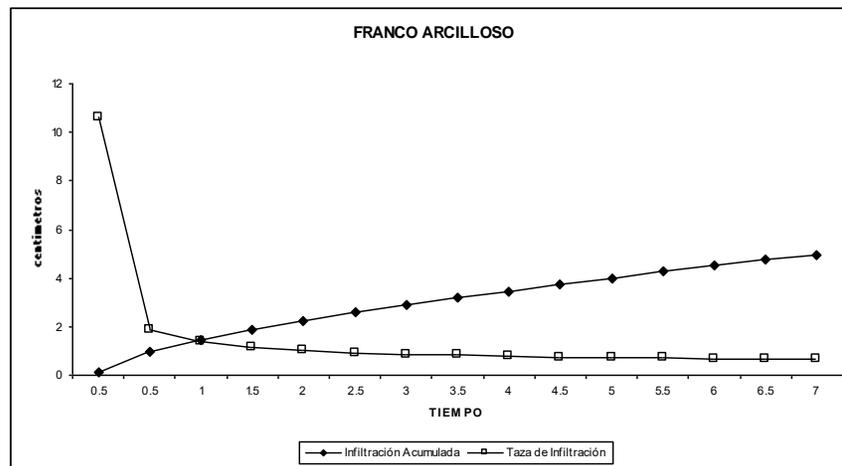


Figura 32. Comportamiento del franco arcilloso. Fuente: Elaboración Propia.

### Suelo tipo Franco Arenoso

En la Tabla 31, se muestran los resultados del cálculo realizado para determinar la capacidad de campo del suelo de textura Franco Arenoso.

Tabla 31. Capacidad de campo, suelo Franco Arenoso.

Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
0.5	0.3	11.29	1.1
0.5	0.99	1.86	3.91



Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
1	1.48	1.36	5.81
1.5	1.88	1.15	7.38
2	2.23	1.02	8.78
2.5	2.56	0.93	10.08
3	2.87	0.87	11.31
3.5	3.17	0.82	12.48
4	3.46	0.78	13.6
4.5	3.73	0.74	14.69
5	4	0.72	15.75
5.5	4.27	0.69	16.78
6	4.52	0.67	17.8
6.5	4.78	0.66	18.79
7	5.03	0.64	19.77

Dt, intervalo de tiempo de 0.5 horas.

F (t), infiltración acumulada expresada en centímetros.

f (t) la tasa de infiltración expresada en cm/h.

L, la longitud del frente húmedo expresado en centímetros.

En la Figura 33, se muestran el comportamiento de la infiltración acumulada y la tasa de infiltración de suelo de textura tipo Arenoso.

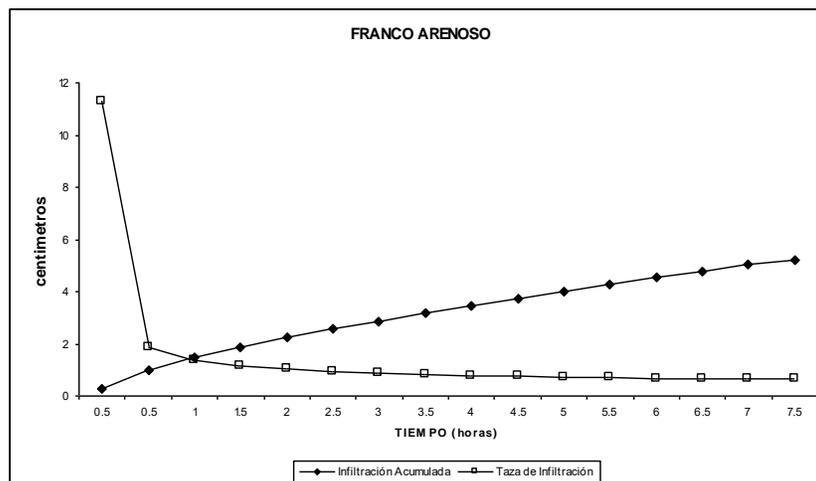


Figura 33. Comportamiento del Franco Arenoso. Fuente: Elaboración Propia.



## Suelo tipo Franco

En la Tabla 32, se muestran los resultados del cálculo realizado para determinar la capacidad de campo del suelo de textura Franca.

**Tabla 32. Capacidad de campo, suelos Francos.**

Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
0.5	0.33	4.87	1.31
0.5	0.99	1.86	3.91
1	1.48	1.36	5.81
1.5	1.88	1.15	7.38
2	2.23	1.02	8.78
2.5	2.56	0.93	10.08
3	2.87	0.87	11.31
3.5	3.17	0.82	12.48
4	3.46	0.78	13.6
4.5	3.73	0.74	14.69
5	4	0.72	15.75
5.5	4.27	0.69	16.78
6	4.52	0.67	17.8
6.5	4.69	0.66	18.46

Dt, intervalo de tiempo de 0.5 horas.

F (t), infiltración acumulada expresada en centímetros.

f (t) la tasa de infiltración expresada en cm/h.

L, la longitud del frente húmedo expresado en centímetros.

En la Figura 34, se muestran el comportamiento de la infiltración acumulada y la tasa de infiltración de suelo de textura tipo Franco.

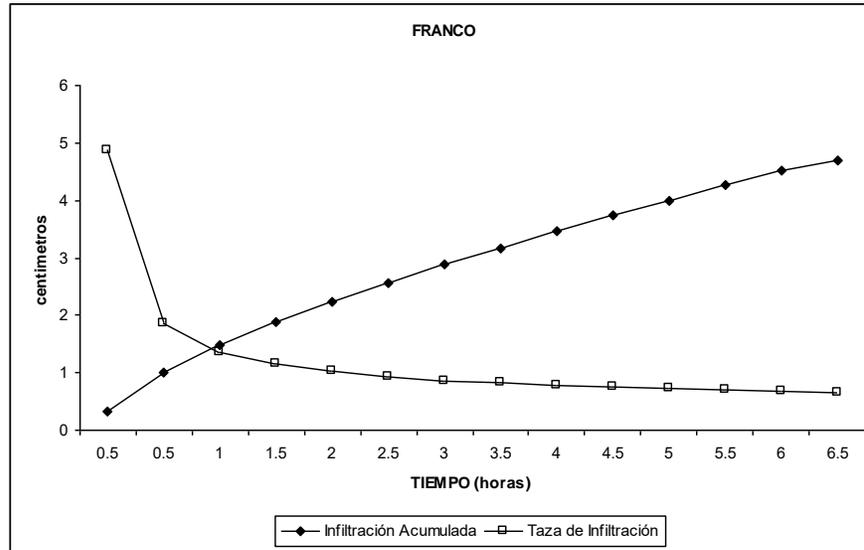


Figura 34. Comportamiento del Franco. Fuente: Elaboración Propia.

### Suelo tipo Arcillo Arenoso

En la Tabla 33, se muestran los resultados del cálculo realizado para determinar la capacidad de campo del suelo de textura Arcillo Arenoso.

Tabla 33. Capacidad de campo, suelos Arcillo arenoso.

Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
0.5	0.83	2.11	4.45
1	1.21	1.5	6.46
1.5	1.51	1.23	8.06
2	1.77	1.07	9.46
2.5	2.01	0.96	10.73
3	2.23	0.88	11.9
3.5	2.44	0.82	13
4	2.63	0.77	14.05
4.5	2.82	0.73	15.05
5	3	0.7	16.01
5.5	3.18	0.67	16.94
6	3.35	0.64	17.84
6.5	3.51	0.62	18.72



Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
7	3.67	0.6	19.58
7.5	3.83	0.58	20.42
8	3.9	0.57	20.82

Dt, intervalo de tiempo de 0.5 horas.

F (t), infiltración acumulada expresada en centímetros.

f (t) la tasa de infiltración expresada en cm/h.

L, la longitud del frente húmedo expresado en centímetros.

En la Figura 35, se muestran el comportamiento de la infiltración acumulada y la tasa de infiltración de suelo de textura tipo arcillo Arenoso.

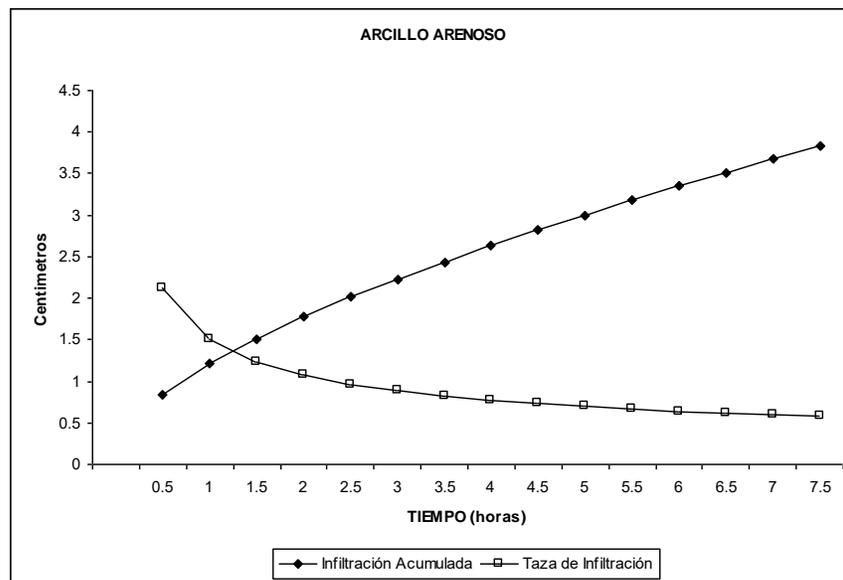


Figura 35. Comportamiento del arcillo arenoso. Fuente: Elaboración Propia.

### Suelo tipo Arenoso

En la Tabla 34, se muestran los resultados del cálculo realizado para determinar la capacidad de campo del suelo Arenosos.

Tabla 34. Capacidad de campo, suelos Arenosos.

Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
0.5	8.55	15.19	31.94



Dt(h)	F(t) cm Infiltración Acumulada	f(t) Tasa de Infiltración	L cm Longitud del frente húmedo
1	15.12	13.71	56.46
1.5	21.44	13.14	80.07
2	27.65	12.83	103.26
2.5	33.79	12.64	126.21

Dt, intervalo de tiempo de 0.5 horas.

F (t), infiltración acumulada expresada en centímetros.

f(t) la tasa de infiltración expresada en cm/h.

L, la longitud del frente húmedo expresado en centímetros.

### 5.1.5. Resultados del balance superficial

Mediante la metodología mencionada en el capítulo (4.1.2), del balance hídrico de Thornthwaite, se obtuvieron láminas mensuales de precipitación, evapotranspiración efectiva y el Excedente (Recarga directa). Con dichas láminas se lograron generar los volúmenes del balance superficial.

Como se mencionado en la metodología, se realizó el balance hídrico de forma mensual con base en los registros históricos (1990-2009). La Tabla 35, muestra el balance ejecutado en el año 1990 para la estación climatológica Tulum, Solidaridad (23025).

**Tabla 35. Balance hídrico de Thornthwaite. Valores expresados en milímetros. Fuente: Elaboración Propia.**

ESTACION	CC	Longitud	Latitud											
TULUM,SOLIDARIDAD	25.66	-87.46	20.23											
CLAVE	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00		
23025	ENE 90	FEB 90	MAR 90	ABR 90	MAY 90	JUN 90	JUL 90	AGO 90	SEP 90	OCT 90	NOV 90	DIC 90		
evapotranspiración potencial	69.87	71.92	84.63	100.64	156.37	107.30	105.71	128.94	85.03	78.73	60.43	55.89		
precipitación	45.98	44.95	54.01	46.44	118.21	182.35	151.50	202.58	217.61	175.72	78.25	42.74		
reserva de agua util	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.52	20.52	20.52	20.52	20.52	20.52	7.38		
evapotranspiración efectiva	53.37	44.95	54.01	46.44	118.21	107.30	105.71	128.94	85.03	78.73	60.43	55.89		
excedente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	54.53	25.26	73.64	132.58	96.99	17.81	0.00		
diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración	-23.89	-26.97	-30.62	-54.20	-38.16	75.06	45.79	73.64	132.58	96.99	17.81	-13.14		

Por medio del balance hídrico se determinó la evapotranspiración efectiva, dicha evapotranspiración fue un ajuste de la relación de la lámina de evapotranspiración potencial, la precipitación y la reserva de agua útil estimada en cada estación climatológica.

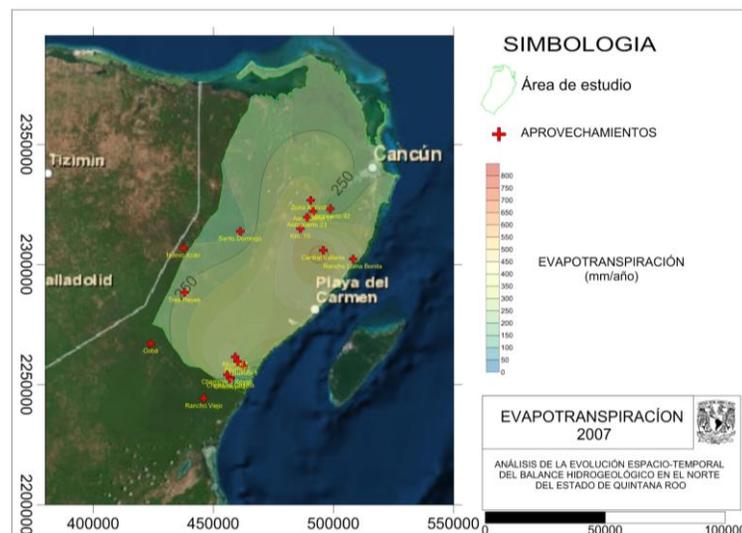
En la Tabla 36, se muestran los resultados de las láminas anuales de evapotranspiración efectiva, en el anexo del documento se muestran las gráficas del comportamiento de la evapotranspiración efectiva.

**Tabla 36. Valores de evapotranspiración efectiva, (Valores expresados en milímetros).**

CLAVE	NOMBRE	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	1144.06	989.93	974.25	1085.01	1105.15	830.94	1005.07	1221.28	1067.32	1000.67
23012	COBA, SOLIDARIDAD	1033.25	975.26	932.53	770.38	775.01	892.22	1056.16	947.64	1218.12	874.75
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	1056.90	886.78	1253.46	654.38	501.90	740.85	668.90	1098.41	1271.02	1006.83
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1087.25	999.56	1152.73	1100.85	995.80	1124.10	998.08	1361.63	1179.46	1054.67
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	1011.25	870.23	789.51	397.96	374.20	603.63	1135.99	846.82	1189.14	1222.86
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	1140.26	920.16	1175.40	1197.26	881.50	1146.98	1349.26	974.18	1077.58	1002.22
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	1100.04	1104.08	1042.28	1165.79	1009.27	1143.30	974.07	1065.49	1232.83	1189.07
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	1074.76	1112.44	1058.13	1215.74	981.16	1120.62	978.55	1338.52	1151.15	992.58
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	860.95	1112.33	952.69	1419.09	1019.00	1058.47	1059.00	1428.60	969.00	1080.00
31069	CHEMAX, CHEMAX	393.64	1053.96	1104.75	1057.67	915.25	1286.39	1090.87	1273.00	1322.76	1164.32

NOMBRE	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	919.54	1145.87	1056.47	937.78	1177.49	1028.27	1232.12	1142.51	1012.17	1181.28
COBA, SOLIDARIDAD	906.84	772.50	1131.31	984.67	941.55	903.77	917.80	399.95	742.83	956.80
LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	933.04	921.75	1214.32	895.34	1107.03	1005.82	1172.18	1283.93	880.14	698.52
SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1011.59	975.12	1083.96	952.55	1010.24	973.57	1053.86	932.38	884.57	699.40
TULUM, SOLIDARIDAD	1136.73	1004.61	1242.66	909.38	1082.41	1189.86	1078.27	1063.52	808.64	801.75
VICTORIA, LAZARO CARDENAS	911.47	1015.28	1094.88	979.45	867.49	1014.22	1279.31	1052.25	807.09	873.10
CANCUN, BENITO JUAREZ	919.92	911.34	1218.52	1251.34	1022.96	881.97	941.49	879.45	745.82	640.63
IDEAL, LAZARO CARDENAS	1047.90	1136.11	1105.28	1198.47	1204.55	1101.24	1308.95	1059.13	1039.78	1050.17
CHANCENOTE, TIZIMIN	1078.03	1153.62	1151.75	1140.39	1157.05	1203.21	1330.73	1158.85	1053.66	1170.40
CHEMAX, CHEMAX	779.76	1225.33	1345.01	834.69	1070.86	1065.09	1187.56	1037.98	877.00	1048.90

En la siguiente figura se observa el comportamiento espacial de la evapotranspiración distribuida en el área de estudio.



**Figura 36. Configuración de evapotranspiración año 2007. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia.**



Con los resultados del balance superficial se determinaron las láminas del excedente de agua en las estaciones climatológicas, como se comentó en la metodología, este excedente se considera como la recarga directa al acuífero. En la Tabla 37, se muestran las láminas anuales acumuladas como resultado.

**Tabla 37. Excedente (Recarga directa) de agua. Calculado en el balance superficial, (Valores expresados en milímetros).**

CLAVE	NOMBRE	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	41.24	50.37	253.25	485.99	264.15	360.48	302.44	250.57	271.48	330.96
23012	COBA, SOLIDARIDAD	189.97	56.24	493.17	295.22	439.76	81.01	364.87	519.83	190.80	257.93
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	154.69	229.48	245.60	195.21	0.00	228.65	0.00	450.33	228.37	402.86
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	64.97	15.41	47.68	100.15	35.70	385.69	30.63	121.12	34.79	268.04
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	431.20	282.47	16.22	97.45	0.00	212.26	233.77	62.13	119.34	369.78
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	170.77	249.84	209.57	688.74	198.20	487.75	216.51	588.67	389.58	723.12
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	146.15	77.73	300.44	320.51	79.78	517.66	57.93	245.49	398.09	235.23
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	87.65	321.64	283.77	573.06	338.04	506.57	112.96	429.11	209.73	236.41
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	65.65	423.10	62.21	109.91	0.00	220.53	0.00	46.40	0.00	0.00
31069	CHEMAX, CHEMAX	0.00	339.78	36.55	119.63	83.55	590.11	24.63	0.00	69.84	419.12

CLAVE	NOMBRE	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	392.52	12.73	104.63	112.52	33.97	459.18	675.50	434.49	402.33	405.48
23012	COBA, SOLIDARIDAD	248.19	62.30	541.36	62.83	193.41	450.22	15.35	373.97	73.27	44.55
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	82.96	118.26	72.26	129.97	216.93	116.48	345.83	402.07	155.62	109.98
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	231.12	181.46	493.95	249.75	29.65	679.46	216.12	128.12	38.83	140.20
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	37.21	0.00	397.12	0.00	88.91	518.81	0.00	163.77	318.36	0.00
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	203.20	272.20	301.14	421.95	523.87	587.20	360.96	666.38	271.59	169.34
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	363.36	273.36	180.88	330.06	20.56	1119.53	413.08	62.89	320.28	176.87
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	226.91	251.19	194.22	70.23	195.05	531.16	502.94	51.17	117.22	128.13
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	20.27	27.18	182.95	77.21	77.15	534.86	351.05	159.45	209.62	180.51
31069	CHEMAX, CHEMAX	0.00	43.69	372.59	294.47	222.34	483.62	239.77	310.41	22.94	44.60

A continuación, en la Tabla 38, se muestra el resultado del balance superficial generado en el área de estudio. Lo valores se describen año con año, con base en los registros históricos (1990-2009), se presentan los volúmenes anuales y su porcentaje considerando la precipitación como el 100% del volumen de agua.

**Tabla 38. Resultados del balance superficial del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.**

Año	Precipitación		Evapotranspiración		Excedente	
	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje
1990	9,594,540,659.60	100.00%	8,211,373,900.86	85.58%	1,208,083,168.00	12.59%
1991	8,571,259,169.33	100.00%	7,354,109,505.70	85.80%	1,227,486,597.90	14.32%
1992	9,807,654,791.95	100.00%	8,242,218,881.61	84.04%	1,730,182,562.67	17.64%
1993	10,020,245,302.23	100.00%	7,338,921,051.54	73.24%	2,681,324,250.73	26.76%



Año	Precipitación		Evapotranspiración		Excedente	
	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje
1994	7,147,083,911.60	100.00%	6,145,927,658.15	85.99%	972,069,928.08	13.60%
1995	10,365,361,319.35	100.00%	7,438,045,588.75	71.76%	2,866,864,254.88	27.66%
1996	8,501,333,162.47	100.00%	7,615,363,196.67	89.58%	938,433,089.96	11.04%
1997	10,968,170,780.80	100.00%	8,164,863,043.95	74.44%	2,736,730,728.57	24.95%
1998	10,890,885,328.60	100.00%	8,903,012,813.94	81.75%	2,018,547,441.86	18.53%
1999	10,987,087,689.98	100.00%	7,940,460,480.38	72.27%	2,944,348,739.31	26.80%
2000	8,789,466,089.40	100.00%	7,188,137,974.34	81.78%	1,662,751,401.72	18.92%
2001	8,624,897,330.99	100.00%	7,236,380,713.57	83.90%	1,414,933,109.82	16.41%
2002	10,672,311,639.31	100.00%	8,675,804,358.31	81.29%	1,962,320,084.50	18.39%
2003	9,422,562,348.13	100.00%	7,735,602,125.37	82.10%	1,734,191,890.81	18.40%
2004	9,085,433,491.20	100.00%	7,680,194,425.06	84.53%	1,468,073,147.47	16.16%
2005	11,920,389,736.28	100.00%	7,449,143,125.20	62.49%	4,493,829,384.38	37.70%
2006	10,815,732,629.80	100.00%	8,430,474,538.79	77.95%	2,414,333,292.44	22.32%
2007	9,807,959,540.49	100.00%	7,573,655,213.02	77.22%	2,257,642,988.58	23.02%
2008	7,905,166,181.38	100.00%	6,304,101,888.39	79.75%	1,601,064,295.85	20.25%
2009	6,968,052,576.89	100.00%	5,921,944,941.81	84.99%	1,042,575,766.41	14.96%

Dividiendo el volumen calculado por el balance anual entre el área de estudio se determina, la lamina de cada uno de los tres parámetros analizados, tanto para la precipitación, evapotranspiración y la recarga. En la siguiente tabla se muestra las laminas obtenidas en el balance superficial.

**Tabla 39. Resultados del balance superficial del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia.**

Año	Precipitación Lamina (m)	Evapotranspiración Volumen (m)	Excedente Volumen (m)
1990	1.28	1.10	0.16
1991	1.15	0.98	0.16
1992	1.31	1.10	0.23
1993	1.34	0.98	0.36
1994	0.96	0.82	0.13
1995	1.39	0.99	0.38
1996	1.14	1.02	0.13
1997	1.47	1.09	0.37
1998	1.46	1.19	0.27
1999	1.47	1.06	0.39
2000	1.18	0.96	0.22



Año	Precipitación Lamina (m)	Evapotranspiración Volumen (m)	Excedente Volumen (m)
2001	1.15	0.97	0.19
2002	1.43	1.16	0.26
2003	1.26	1.03	0.23
2004	1.22	1.03	0.20
2005	1.59	1.00	0.60
2006	1.45	1.13	0.32
2007	1.31	1.01	0.30
2008	1.06	0.84	0.21
2009	0.93	0.79	0.14

## 5.2. Balance subterráneo

A continuación, se describen los resultados del balance subterráneo del Acuífero Norte de Quintana Roo. Mediante los métodos descritos en el capítulo 4.2, se obtuvieron los volúmenes del comportamiento del agua subterránea.

### 5.2.1. Ubicación de aprovechamientos subterráneos

Mediante la información otorgada por Conagua, se ubicaron los aprovechamientos hídricos, dentro del acuífero del Norte de Quintana Roo. La información corresponde a la red de monitoreo denominada como Zona Cancún-Tulum (Tabla 40):

- Ubicación geográfica de los pozos.
- Elevación del brocal (msnm).
- Profundidad del nivel estático (metros).

**Tabla 40. Información piezométrica, zona Cancún-Tulum. Coordenadas corresponden a la zona UTM 16Q. Fuente: Conagua 2014.**

X (metros)	Y (metros)	Elevación del Brocal m.s.n.m.	Prof. del N.E. en Marzo 2006 ( m)	Prof. del N.E. en Nov 2007 (m)	Prof. del N.E. en Nov 2008 (m)	Prof. del N.E. en Nov 2009(m)
490504.71	2326792.43	7.862	6.23	6.15	6.37	6.2
461209.17	2313861.55	0.636	0.75	8.2	8.82	8.82
437526.74	2306954.67	20.49	1.38	7.59	18	8.3
437920.49	2288353.46	3.021	1.92	2.05	20.28	20.54

X (metros)	Y (metros)	Elevación del Brocal m.s.n.m.	Prof. del N.E. en Marzo 2006 ( m)	Prof. del N.E. en Nov 2007 (m)	Prof. del N.E. en Nov 2008 (m)	Prof. del N.E. en Nov 2009(m)
423968.31	2267166.81	0.862	0.24	0.64	0.92	0.05
446054.99	2244272.45	13.566	10.84	0.77	10.78	10.94
457184.45	2252787.16	12.669	10.81	10.75	10.73	10.59
456893.33	2252295.97	11.517	9.65	9.63	9.55	9.6
455738.75	2254235.59	7.011	5.05	4.98	4.96	5.03
462558.53	2257908.34	13.895	11.94	11.89	11.88	11.97
459147.65	2261574.27	6.887	5.01	4.88	4.97	5.03
460099.05	2259543.15	12.776	10.91	10.87	10.87	10.93
495694.31	2305916.29	6.277	5.68	5.6	5.57	
495694.31	2305916.29	5.575	4.29	4.2	4.29	4.23
486223.42	2314898.1	6.915	5.45	5.4	5.6	5.46
491512.51	2322211.34	8.425	6.84	6.76	6.95	6.6
488970	2319691	8.916	7.36	7.26	7.46	7.14
498729.84	2323254.41	9.277	7.73	7.63	7.8	7.46

Elevación del Brocal m.s.n.m. cota de elevación del brocal del aprovechamiento.  
Prof. del N.E. medición de la profundidad del nivel del agua, a partir de un punto definido (brocal).

En la Figura 37, se muestra la ubicación de los aprovechamientos subterráneos utilizados en el balance subterráneo.

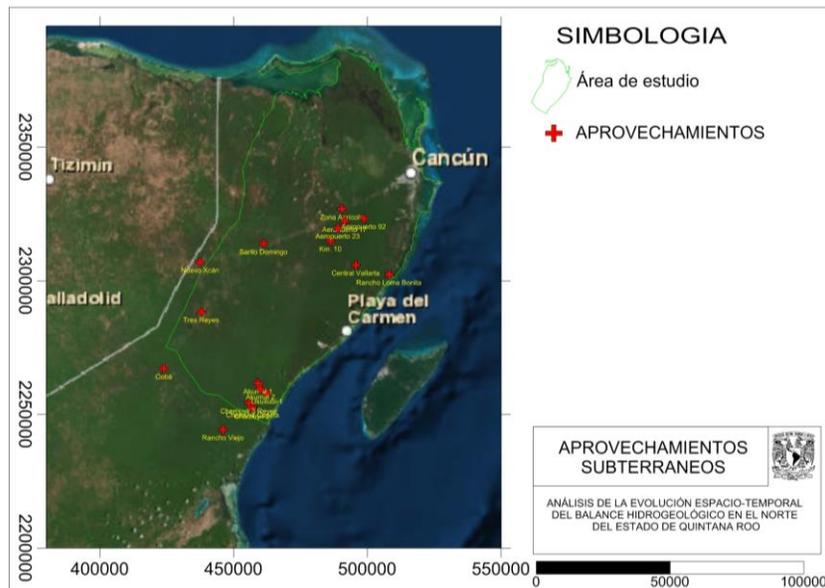


Figura 37. Ubicación de los aprovechamientos medidos. (La característica de cada estación se muestra en la Tabla 40). Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración Propia.



Con base a la información piezométrica otorgada por la Conagua, se realizaron las configuraciones de elevación de nivel estático en diferentes periodos de tiempo. La configuración de elevación del nivel estático se realizó en los años con datos de profundidad de nivel estático, restando la profundidad del nivel del agua a la elevación del brocal, en los años 2006, 2007, 2008 y 2009. En la Tabla 41, se muestran los resultados del cálculo de la elevación del nivel estático.

**Tabla 41. Elevación del nivel estático, (Valores expresados en metros).**

x (metros)	y (metros)	Elevación del Brocal m.s.n.m.	Prof. del N.E. marzo 2006 ( m)	Prof. del N.E. Nov 2007 (m)	Prof. del N.E. Nov 2008 (m)	Prof. del N.E. Nov 2009 (m)	ENE_Marzo06	ENE_No v07	ENE_No v08	ENE_No v09
490504.71	2326792.43	7.862	6.23	6.15	6.37	6.2	1.632	1.712	1.492	1.662
461209.17	2313861.55	10.636	7.75	8.2	8.82	8.82	2.886	2.436	1.816	1.816
437526.74	2306954.67	20.49	16.38	17.59	18	18.3	4.11	2.9	2.49	2.19
437920.49	2288353.46	23.021	18.92	20.05	20.28	20.54	4.101	2.971	2.741	2.481
423968.31	2267166.81	7.862	4.24	4.64	4.92	5.05	3.622	3.222	2.942	2.812
446054.99	2244272.45	13.566	10.84	10.77	10.78	10.94	2.726	2.796	2.786	2.626
457184.45	2252787.16	12.669	10.81	10.75	10.73	10.59	1.859	1.919	1.939	2.079
456893.33	2252295.97	11.517	9.65	9.63	9.55	9.6	1.867	1.887	1.967	1.917
455738.75	2254235.59	7.011	5.05	4.98	4.96	5.03	1.1	2.031	2.051	1.981
462558.53	2257908.34	13.895	11.94	11.89	11.88	11.97	1.955	2.005	2.015	1.925
459147.65	2261574.27	6.887	5.01	4.88	4.97	5.03	1.877	2.007	1.917	1.857
460099.05	2259543.15	12.776	10.91	10.87	10.87	10.93	1.866	1.906	1.906	1.846
495694.31	2305916.29	6.277	5.68	5.6	5.57		0.597	0.677	0.707	
495694.31	2305916.29	5.575	4.29	4.2	4.29	4.23	1.285	1.375	1.285	1.345
486223.42	2314898.1	6.915	5.45	5.4	5.6	5.46	1.465	1.515	1.315	1.455
491512.51	2322211.34	8.425	6.84	6.76	6.95	6.6	1.585	1.665	1.475	1.825
488970	2319691	8.916	7.36	7.26	7.46	7.14	1.556	1.656	1.456	1.776
498729.84	2323254.41	9.277	7.73	7.3	7.8	7.46	1.547	1.647	1.477	1.817

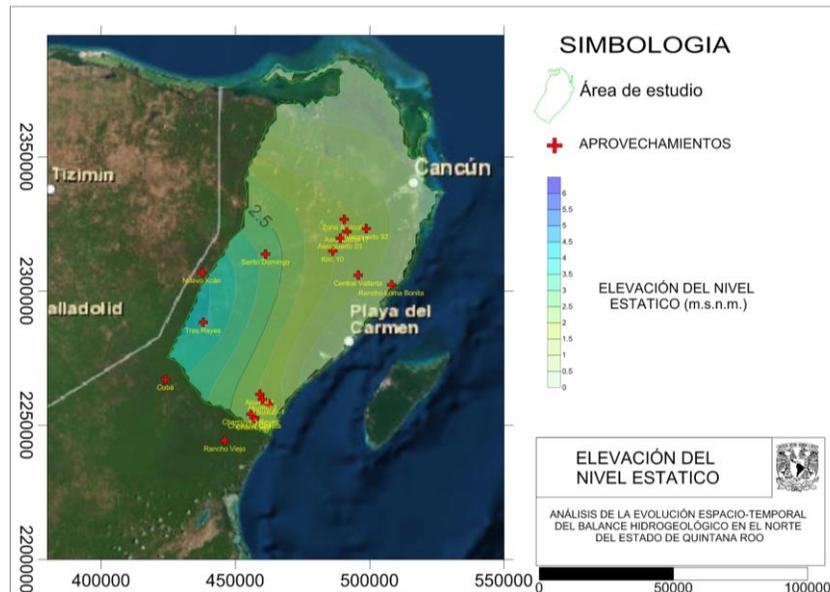
X (metros), Y (metros), ubicación del aprovechamiento en coordenadas UTM

Elevación del Brocal m.s.n.m. cota de elevación del brocal del aprovechamiento

Prof. del N.E. medición de la profundidad del nivel del agua, a partir de un punto definido (brocal)

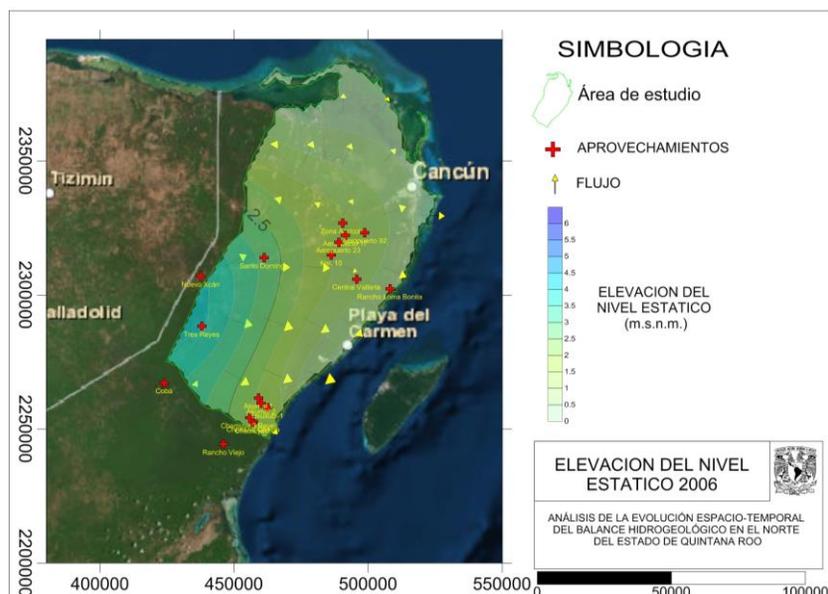
ENE. Elevación del nivel estático (m.s.n.m.).

En la Tabla 41, se describe el comportamiento de la configuración de elevación del nivel estático del año 2006. De acuerdo con los resultados se observa que los niveles más altos se presentan en la zona suroeste del acuífero. En la Figura 38, se muestra la configuración de niveles.



**Figura 38. Configuración de elevación del nivel estático en marzo 2006. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: elaboración propia.**

A partir de las curvas equipotenciales, se determinó la dirección de flujo, con lo que se determinaron las celdas de entrada y salida del área de estudio. En la Figura 39, se muestra la dirección del flujo de agua subterránea. Dicha dirección, en la zona suroeste, es hacia la costa en dirección del este y norte.



**Figura 39. Dirección del flujo de agua subterránea. Las líneas equipotenciales se tomaron de la figura anterior. Coordenadas UTM (16Q).**



## 5.2.2. Hidrógrafos

Utilizando la información piezométrica de los monitoreos Realizados por Conagua, se realizaron hidrógrafos en cada uno de los aprovechamientos subterráneos. Con el fin de comparar el comportamiento de los niveles de agua en el rango de datos históricos. En la Tabla 42, se muestra la relación entre la profundidad y la elevación del agua e cada pozo analizado.

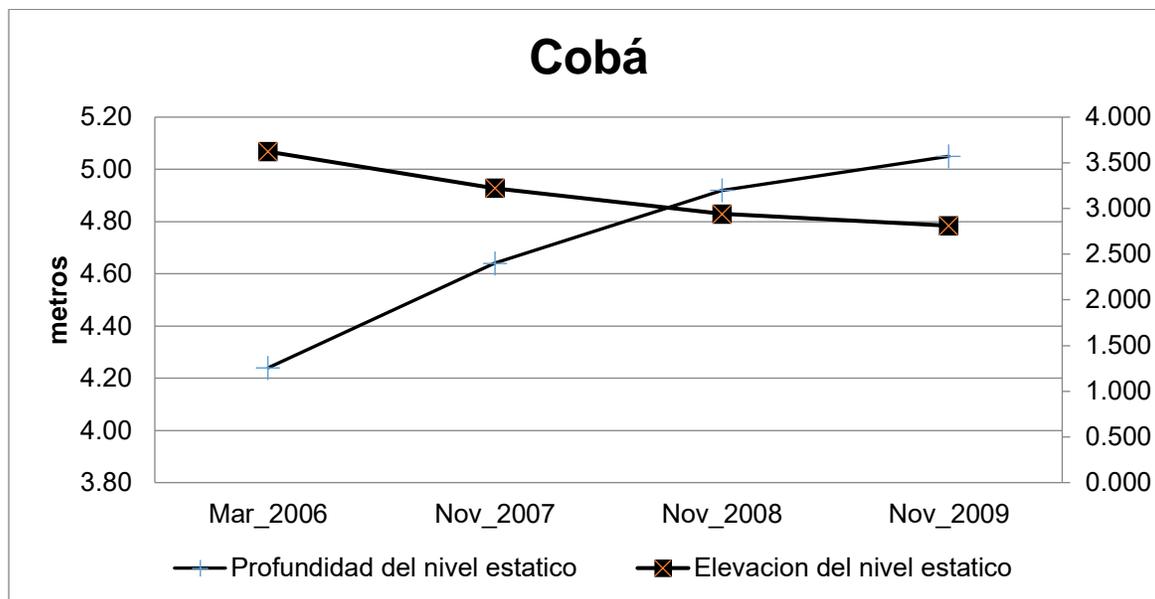
**Tabla 42. Comparativa de la profundidad del nivel estático y la elevación del nivel estático. Valores expresados en metros.**

Nº	Nombre del Pozo	Prof. del N.E.(2006), en m. (Marzo)	Prof. del N.E.(2007), en m. (Nov)	Prof. del N.E.(2008), en m. (Nov)	Prof. del N.E.(2009), en m. (Nov)	ENE_Mar06	ENE_Nov07	ENE_Nov08	ENE_Nov09
1	Zona Agrícola	6.23	6.15	6.37	6.20	1.632	1.712	1.492	1.662
2	Santo Domingo	7.75	8.20	8.82	8.82	2.886	2.436	1.816	1.816
3	Nuevo Xcán	16.38	17.59	18.00	18.30	4.110	2.900	2.490	2.190
4	Tres Reyes	18.92	20.05	20.28	20.54	4.101	2.971	2.741	2.481
5	Cobá	4.24	4.64	4.92	5.05	3.622	3.222	2.942	2.812
6	Rancho Viejo	10.84	10.77	10.78	10.94	2.726	2.796	2.786	2.626
7	Chemuyil Caseta	10.81	10.75	10.73	0.00	1.859	1.919	1.939	
8	Chemuyil-2	9.65	9.63	9.55	9.60	1.867	1.887	1.967	1.917
9	Chemuyil 3 Reyes	5.05	4.98	4.96	5.03	1.961	2.031	2.051	1.981
10	Uxuxubi-1	11.94	11.89	11.88	11.97	1.955	2.005	2.015	1.925
11	Akumal 1	5.01	4.88	4.97	5.03	1.877	2.007	1.917	1.857
12	Akumal 2	10.91	10.87	10.87	10.93	1.866	1.906	1.906	1.846
13	Rancho Loma Bonita	5.68	5.60	5.57		0.597	0.677	0.707	
14	Central Vallarta	4.29	4.20	4.29	4.23	1.285	1.375	1.285	1.345
15	Km. 10	5.45	5.40	5.60	5.46	1.465	1.515	1.315	1.455
16	Aeropuerto 17	6.84	6.76	6.95		1.585	1.665	1.475	
17	Aeropuerto 23	7.36	7.26	7.46	7.14	1.556	1.656	1.456	1.776
18	Aeropuerto 92	7.73	7.63	7.80	7.46	1.547	1.647	1.477	1.817

N.E. Nivel estático del pozo (metros).

ENE. Elevación del nivel estático (m.s.n.m.).

En la Figura 40, se muestra el comportamiento de nivel estático y el de la elevación del nivel estático del pozo nombrado como Cobá.



**Figura 40. Hidrógrafo de profundidad de nivel estático vs elevación del nivel estático. Elaboración propia**

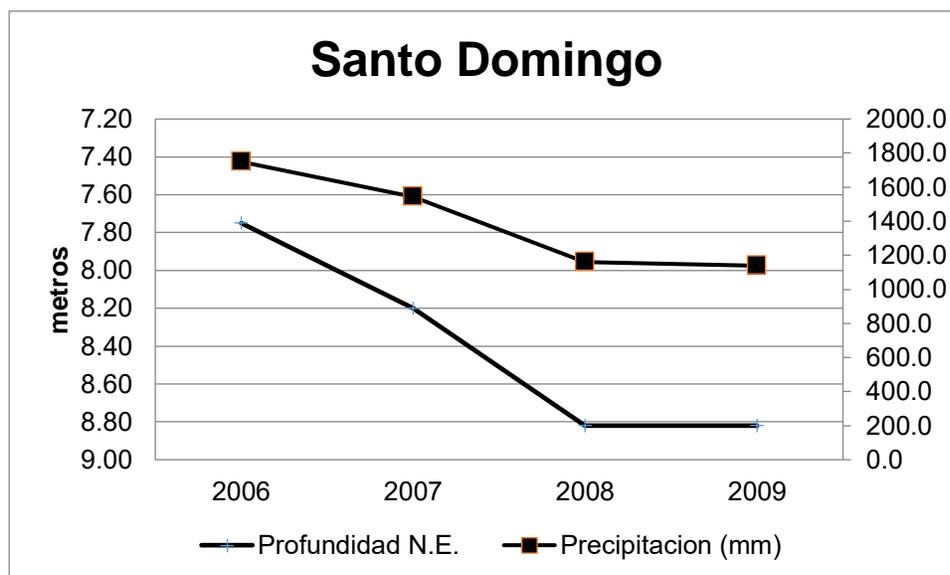
De manera de similar a los hidrógrafos de niveles de agua, se realizaron hidrógrafos de la relación entre la profundidad del nivel del agua y de las láminas de precipitación que ocurren en cada uno de los aprovechamientos. En la Tabla 43, se muestran los valores que fueron utilizados en los hidrógrafos mencionados.



**Tabla 43. Comparativa de elevaciones del nivel estático (metros) vs valores de precipitación (milímetros).**

Nº	Nombre del Pozo	N.E.(2007)	N.E.(2008)	N.E.(2009)	Precipitación (2006)	Precipitación (2007)	Precipitación (2008)	Precipitación (2009)
1	Zona Agrícola	6.15	6.37	6.20	1456.5	1465.9	1038.8	809.3
2	Santo Domingo	8.20	8.82	8.82	1748.7	1543.9	1161.6	1138.9
3	Nuevo Xcán	17.59	18.00	18.30	1739.7	1133.5	1149.8	1201.7
4	Tres Reyes	20.05	20.28	20.54	1455.3	1111.6	1017.6	1086.8
5	Cobá	4.64	4.92	5.05	965.2	772.6	827.7	1004.6
6	Rancho Viejo	10.77	10.78	10.94	1055.3	1137.0	1055.4	854.4
7	Chemuyil Caseta	10.75	10.73	10.59	1155.1	1216.3	1066.7	870.5
8	Chemuyil-2	9.63	9.55	9.60	1147.6	1213.8	1069.0	865.9
9	Chemuyil 3 Reyes	4.98	4.96	5.03	1153.3	1200.6	1056.9	879.2
10	Uxuxubi-1	11.89	11.88	11.97	1215.6	1268.0	1068.1	882.8
11	Akumal 1	4.88	4.97	5.03	1226.5	1241.9	1050.7	906.1
12	Akumal 2	10.87	10.87	10.93	1214.6	1246.5	1057.8	896.0
13	Rancho Loma Bonita	5.60	5.57		1407.4	1399.9	1061.4	812.9
14	Central Vallarta	4.20	4.29	4.23	1459.6	1526.8	1052.2	833.7
15	Km. 10	5.40	5.60	5.46	1501.0	1618.6	1040.8	825.8
16	Aeropuerto 17	6.76	6.95	6.60	1459.2	1498.1	1038.2	803.6
17	Aeropuerto 23	7.26	7.46	7.14	1474.0	1558.6	1037.3	806.3
18	Aeropuerto 92	7.63	7.80	7.46	1431.8	1388.0	1043.6	801.9

En la Figura 41, se muestra la relación entre la precipitación anual y los niveles de agua subterránea en el pozo denominado Santo Domingo.



**Figura 41. Hidrógrafos precipitación (milímetros) vs pozo zona agrícola (metros).**

### 5.2.3. Flujo lateral

Para estimar el flujo lateral, se realizó a través de la ecuación de Darcy. Para tal efecto se definieron las redes de flujo en los mapas de igual elevación del nivel estático para los años considerados, Figura 42, construyendo las celdas de entrada y salida de la forma siguiente:

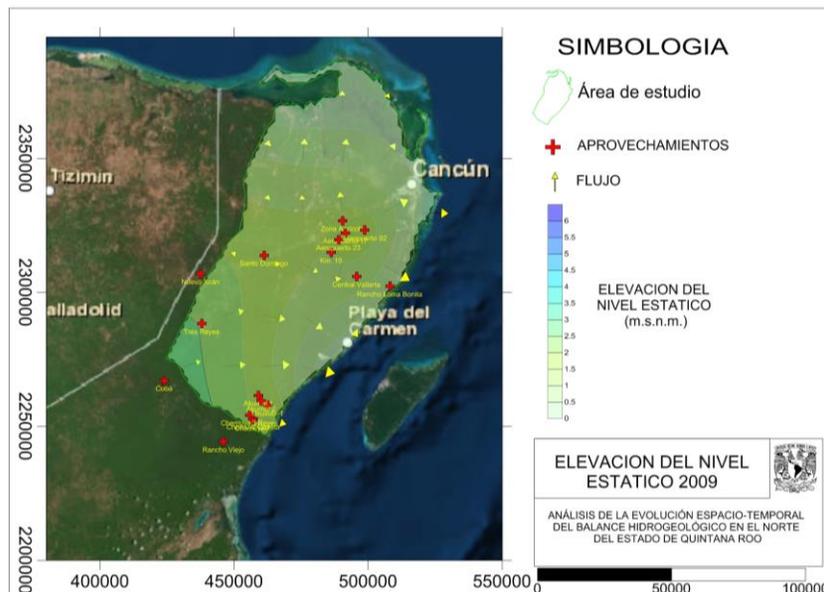


Figura 42. Configuración de elevación del nivel estático, en noviembre 2009. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia.

Mediante las curvas de igual altura de elevación, se genero la configuración de la dirección de flujo de agua subterránea (Figura 43).

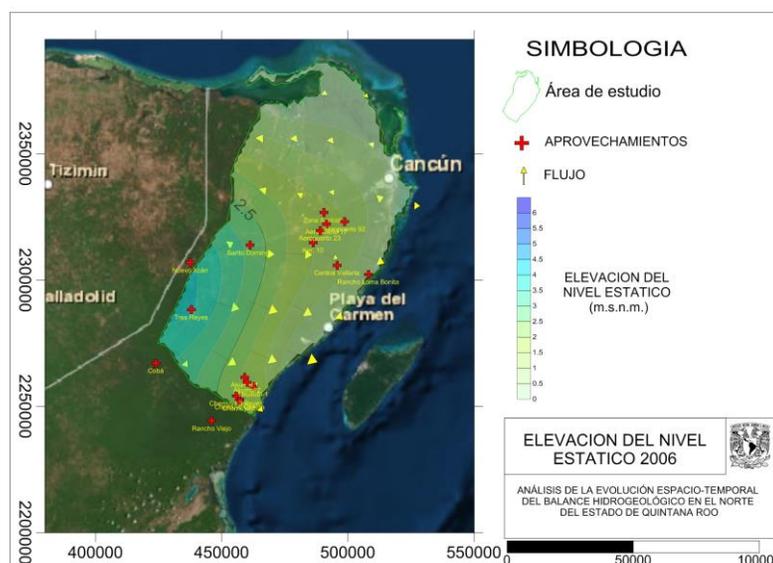


Figura 43. Dirección del flujo subterráneo. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración propia



Utilizando la dirección de flujo y la configuración de niveles estáticos, se construyeron las celdas de entrada y salida del acuífero.

### La determinación de T (transmisibilidad).

Los valores de k y b, se tomaron de las referencias bibliográficas analizadas. El valor de k (conductividad hidráulica) se tomó de las tablas de recopilación de información (Gondwe, 2012). El espesor del acuífero se tomará como referencia el valor de 19 metros de acuerdo al estudio Estudio Hidrológico del Estado de Quintana Roo, (INEGI, 2002), en la Tabla 44 y la Tabla 45, muestran la estimación de los gastos y volúmenes de entrada y salida del acuífero.

**Tabla 44. Estimación de gastos y volúmenes de entrada y salida del flujo para marzo 2006.**

CELDA	k	b	T (m <sup>2</sup> /seg)	L (metros)	dl, (metros)	dh, m	Q, m <sup>3</sup> /s	ΣQ, m <sup>3</sup> /s	Qanual, m <sup>3</sup> /año	ΣQanual, m <sup>3</sup> /año
E1	0.064	19	1.216	28324.55	6355.74	0.4	2.17		68,359,215	
E2	0.064	19	1.216	13976.93	8048.71	0.4	0.84		26,637,022	
E3	0.064	19	1.216	15692.75	10445.93	0.4	0.73	3.74	23,043,694	118,039,933
S1	0.012	19	0.2204	26424.19	8956.72	0.4	0.26		8,202,209	
S2	0.012	19	0.2204	32268.23	12662.52	0.4	0.22		7,084,891	
S3	0.19	19	3.61	46502.01	7566.8	0.4	8.87		279,855,128	
S4	0.19	19	3.61	38148.67	6101.48	0.4	9.03	18.39	284,720,022	579,862,252

CELDA, el número de celda y tipo de celda, E1 (celda de entrada de agua), S1 (celda de salida de agua) .

T (m<sup>2</sup>/seg), Transmisibilidad expresada en m<sup>2</sup>/seg.

L m, Ancho de la celda, expresada en metros.

dl, m, longitud de representativa de la celda, expresada en metros.

dh, m, el valor de la carga hidráulica, expresada en metros.

Q, m<sup>3</sup>/seg, gasto que pasa por la celda, expresada en m<sup>3</sup>/seg.

Qanual, m<sup>3</sup>/año, gasto anual que cruza por la celda, expresada en m<sup>3</sup>/año.

**Tabla 45. Estimación de gastos y volúmenes de entrada y salida del flujo para Nov 2007.**

CELDA	k	b	T (m <sup>2</sup> /seg)	L (metros)	dl, (metros)	dh, m	Q, m <sup>3</sup> /s	ΣQ, m <sup>3</sup> /s	Qanual, m <sup>3</sup> /año	ΣQanual, m <sup>3</sup> /año
E1	0.064	19	1.216	12,878.46	11,214.98	0.4	0.56		17,614,309	
E2	0.064	19	1.216	37,859.52	13,053.28	0.4	1.41		44,489,305	
E3	0.064	19	1.216	6,094.43	10,552.57	0.4	0.28	2.25	8,858,803	70,962,416
S1	0.012	19	0.2204	49,979.85	15,515.64	0.4	0.28		8,955,781	
S2	0.012	19	0.2204	51,123.74	8,023.83	0.4	0.56		17,714,100	
S3	0.012	19	0.2204	28,040.25	6,720.72	0.4	0.37		11,599,634	
S4	0.19	19	3.61	13,624.00	6,170.91	0.4	3.19	4.40	100,537,764	138,807,278

CELDA, el número de celda y tipo de celda, E1 (celda de entrada de agua), S1 (celda de salida de agua) .

T (m<sup>2</sup>/seg), Transmisibilidad expresada en m<sup>2</sup>/seg.

L m, Ancho de la celda, expresada en metros.

dl, m, longitud de representativa de la celda, expresada en metros.



dh, m, el valor de la carga hidráulica, expresada en metros.  
Q, m<sup>3</sup>/s, gasto que pasa por la celda, expresada en m<sup>3</sup>/seg.  
Qanual, m<sup>3</sup>/año, gasto anual que cruza por la celda, expresada en m<sup>3</sup>/año.

#### 5.2.4. Evapotranspiración subterránea (ETS)

Utilizando la metodología mencionada en el capítulo 4.2.3, se determinó la evapotranspiración subterránea en la zona de estudio.

Utilizando los valores de niveles estáticos se determinaron los valores de evapotranspiración subterránea (ETS) (Figura 44), en los aprovechamientos subterráneos. En la Tabla 46, se muestra los valores calculados de evapotranspiración en aprovechamientos con niveles de agua menores a 10 metros.

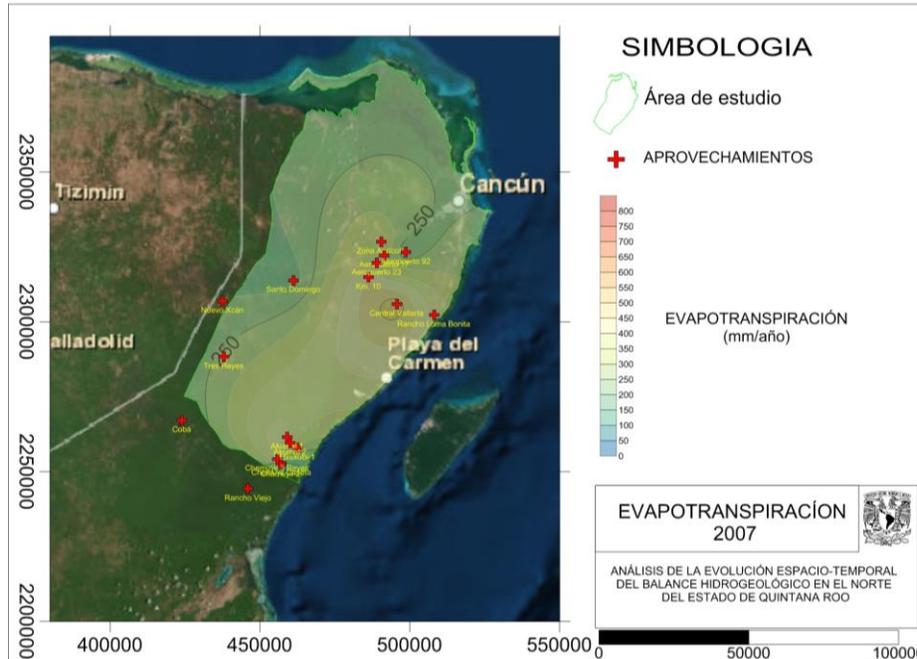
**Tabla 46. Valores de evapotranspiración superficial y evapotranspiración subterránea. Valores expresados en milímetros.**

Nº	Nombre del Pozo	ET 06	ET 07	ET 08	ET 09	ETS_06	ETS_07	ETS_08	ETS_09
1	Zona Agrícola	1119.97	1190.54	850.9	693.17	337.78	366.69	247.10	210.72
2	Santo Domingo	1302.29	1193.74	981.71	971.39	234.41	171.90	92.67	91.70
3	Nuevo Xcán	1316.77	1083.81	1076.7	1106.72				
4	Tres Reyes	1206.41	894.84	937.09	1035.74				
5	Cobá	953.53	453.14	781.85	991.76	439.39	194.31	317.74	392.74
6	Rancho Viejo	1095.19	991.4	852.58	847.16				
7	Chemuyil Caseta	1133.305	1006.18	848.67	849.67				
8	Chemuyil-2	1131.84	1006.76	849.13	848.2	31.69	29.80	30.57	27.14
9	Chemuyil 3 Reyes	1128.55	983.94	847.13	858.36	446.91	395.15	341.56	341.28
10	Uxuxubi-1	1152.47	1009.32	847.21	853.75				
11	Akumal 1	1149.56	967.01	846.66	873.37	458.90	396.09	340.70	347.25
12	Akumal 2	1148.64	984.76	846.99	864.25				
13	Rancho Loma Bonita	1117.5	1085.65	846.71	721.18	386.21	382.15	300.07	
14	Central Vallarta	1165.01	1140.48	804	737.16	532.18	529.18	367.27	340.27
15	Km. 10	1182.65	1225.6	824.9	724.93	430.48	451.02	290.36	263.29
16	Aeropuerto 17	1133.43	1193.11	857.17	644.91	286.53	309.25	209.15	
17	Aeropuerto 23	1154.1	1217.82	845.99	701.93	243.75	266.95	171.91	160.60
18	Aeropuerto 92	1093.94	1129.32	825.47	687.61	198.66	214.12	145.28	139.72

ET, valor de evapotranspiración superficial, expresada en milímetros.

ETS, valor de la evapotranspiración subterránea, expresada en milímetros.

Mediante las láminas de ETS se calcularon los volúmenes anuales en el acuífero, dichos cálculos fueron realizados en forma anual. En la Figura 44, se muestra la configuración de valores.



**Figura 44. Configuración de valores de ETS. Valores expresados en milímetros. Coordenadas UTM (16Q). Fuente: Elaboración Propia.**

Con los resultados de las láminas resultantes, se calcula los volúmenes de evapotranspiración subterránea en el área de estudio. En la Tabla 47, se muestran los resultados del cálculo del balance subterráneo.

**Tabla 47. Volumen de evapotranspiración subterránea anual. Valores expresados en metros cúbicos.**

Año	m <sup>3</sup> /año
2006	2,490,559,458.56
2007	2,214,516,506.22
2008	1,667,536,825.33
2009	1,625,741,165.61

### 5.2.5. Extracción

Debido a la falta de información de las extracciones en la zona de estudio, para determinar el valor de B (extracción por bombeo), se tomaron los volúmenes de extracción reportado para Conagua por parte de REPDA (Registro Público de Derechos de Agua). Utilizando la ubicación de los



aprovechamientos registrados en el REPDA, se tomaron los volúmenes de extracción concesionados. El valor calculado fue de 51,371,717.33 m<sup>3</sup>/año.

### 5.2.6. Cambio de almacenamiento

Mediante el cálculo mencionado en el capítulo 4.2.5, se estimaron los volúmenes de variación del cambio de almacenamiento.

Generando primero las curvas de evolución mediante la diferencia de niveles de agua en diferentes periodos de tiempo. En la Tabla 48, se muestran los valores resultantes de la evolución de niveles agua.

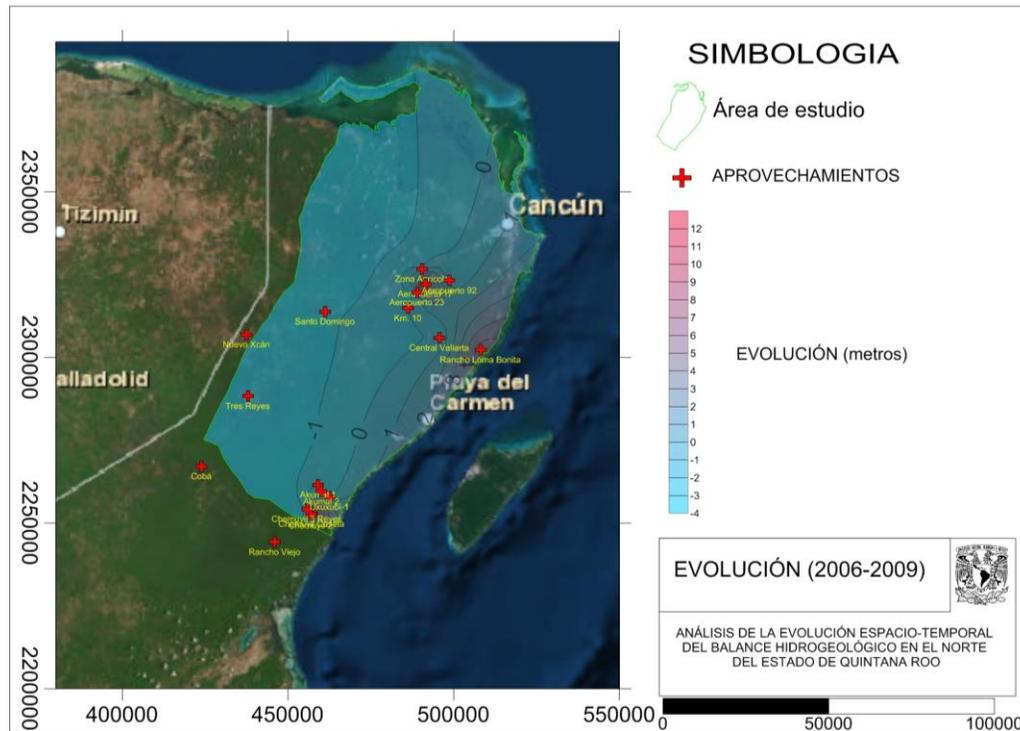
**Tabla 48. Evolución de niveles de agua. Valores expresados en metros.**

Nº	Nombre del Pozo	EVO 07-06	EVO 08-07	EVO 09-08	EVO 09-06
1	Zona Agrícola	0.08	-0.22	0.17	0.03
2	Santo Domingo	-0.45	-0.62	0.00	-1.07
3	Nuevo Xcán	-1.21	-0.41	-0.30	-1.92
4	Tres Reyes	-1.13	-0.23	-0.26	-1.62
5	Cobá	-0.40	-0.28	-0.13	-0.81
6	Rancho Viejo	0.07	-0.01	-0.16	-0.10
7	Chemuyil Caseta	0.06	0.02	10.73	10.81
8	Chemuyil-2	0.02	0.08	-0.05	0.05
9	Chemuyil 3 Reyes	0.07	0.02	-0.07	0.02
10	Uxuxubi-1	0.05	0.01	-0.09	-0.03
11	Akumal 1	0.13	-0.09	-0.06	-0.02
12	Akumal 2	0.04	0.00	-0.06	-0.02
13	Rancho Loma Bonita	0.08	0.03		
14	Central Vallarta	0.09	-0.09	0.06	0.06
15	Km. 10	0.05	-0.20	0.14	-0.01
16	Aeropuerto 17	0.08	-0.19	6.95	6.84
17	Aeropuerto 23	0.10	-0.20	0.32	0.22
18	Aeropuerto 92	0.10	-0.17	0.34	0.27

ENE, elevación del nivel de agua, expresado en metros.

EVO, evolución del nivel del agua en un periodo de tiempo, expresado en metros.

Considerando los valores de la evolución de niveles, se calcularon los volúmenes de evolución en cada periodo de tiempo. En Figura 45, se muestra el comportamiento espacial de la evolución del nivel estático del periodo 2006-2009.



**Figura 45. Configuración de niveles de evolución, 2006-2009. Coordenadas UTM (16Q). Valores expresados en metros.**

En la Tabla 49, se muestran los resultados del cálculo de la evolución en diferentes periodos.

**Tabla 49. Cambio de almacenamiento anual. Valores expresados en m<sup>3</sup>/año.**

Periodo	Volumen de recarga	Volumen de descarga	Cambio de almacenamiento
2007-2006	133,320,610	1,482,980,725	-1,349,660,114
2008-2007	4,847,320	1,440,324,546	-1,435,477,226
2009-2008	735,840,226	2,116,133,519	-1,380,293,293
2009-2006	874,008,156	5,039,438,791	-4,165,430,635

### 5.2.7. Resultado del balance subterráneo

Considerando la metodología mencionada en el capítulo 4 (Metodología), se realiza el balance subterráneo para determinar el valor de la recarga en el periodo de 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009. En la Tabla 50, se muestran los volúmenes resultantes del balance subterráneo.



**Tabla 50. Balance de agua subterránea. Valores expresados en metros cúbicos.**

1	2	3	4	5	6
año	FSE (m <sup>3</sup> /año)	ESS (m <sup>3</sup> /año)	ETS	DV/DT	B (repda)
2006	118,039,933.22	579,862,252.38	2,490,559,458.56		55,336,875.88
	<b>94,501,174.83</b>	<b>359,334,765.17</b>	<b>2,352,537,982.39</b>	<b>-1,649,779,034.11</b>	<b>55,336,875.88</b>
2007	70,962,416.44	138,807,277.97	2,214,516,506.22		55,336,875.88
	<b>72,454,984.28</b>	<b>189,387,017.55</b>	<b>1,941,026,665.78</b>	<b>-1,435,477,226.72</b>	<b>55,336,875.88</b>
2008	73,947,552.12	239,966,757.13	1,667,536,825.33		55,336,875.88
	<b>66,157,239.11</b>	<b>227,092,726.40</b>	<b>1,646,638,995.47</b>	<b>-1,380,293,293.58</b>	<b>55,336,875.88</b>
2009	58,366,926.10	214,218,695.66	1,625,741,165.61		55,336,875.88

1	7	8	9	10	11	12
año	B (Lineal)	B (exponencial)	(Fse-Fss-ET-B)/Dt	S*A*Dh/Dt	S	R (subterránea)
2006	55,336,875.88	55,336,875.88				
	<b>58,103,719.67</b>	<b>60,870,563.47</b>	<b>-2,672,708,448.62</b>	<b>-1,349,660,114.75</b>	<b>0.060</b>	<b>2,591,728,841.73</b>
2007	60,870,563.47	66,404,251.06				
	<b>63,914,091.64</b>	<b>74,704,782.44</b>	<b>-2,113,295,574.92</b>	<b>-1,435,477,226.72</b>	<b>0.060</b>	<b>2,027,166,941.32</b>
2008	66,957,619.81	83,005,313.82				
	<b>70,305,500.81</b>	<b>88,539,001.41</b>	<b>-1,862,911,358.63</b>	<b>-1,380,293,293.58</b>	<b>0.060</b>	<b>1,780,093,761.02</b>
2009	73,653,381.80	94,072,689.00				

Donde.

- 1, año, año del monitoreo de los niveles de agua.
- 2, FSe, (m<sup>3</sup>/año), Volumen del flujo de entrada del Acuífero.
- 3, Fss (m<sup>3</sup>/año), Volumen del flujo de salida del Acuífero.
- 4, ETS, Volumen de evapotranspiración subterránea.
- 5, B (Repda), año del monitoreo de los niveles de agua .
- 6, (Fse - Fss - ET - B)/Dt, sumatoria de (Flujo de entrada - flujo de salida- evapotranspiración- bombeo, entre un intervalo de tiempo).
- 7, S\*A\*Dh/Dt, volumen del cambio de almacenamiento multiplicado por el área y el coeficiente de almacenamiento.
- 8, S, coeficiente de almacenamiento.
- 11, R (subterránea), Recarga de agua subterránea.

### 5.3. Recarga directa

Una vez calculada la recarga subterránea, se realizó la comparativa con la recarga superficial para realizar la calibración de ambas recargas.

#### 5.3.1. Calibración de la recarga

Al realizar la comparación entre la recarga subterránea y recarga superficial, se realizó el ajuste de la recarga del balance superficial, es este caso realizando un ajuste del 10% menor en la



capacidad de campo en el suelo, y recalculando el balance superficial se obtuvieron los siguientes valores que se presentan en la Tabla 51.

**Tabla 51. Comparativa de los valores de recarga. Valores expresados en m<sup>3</sup>.**

año	R (subterránea)		R(SUPERFICIAL)
2006			2,441,920,811.29
	<b>2,591,728,841.73</b>	<b>-9.77%</b>	<b>2,361,130,211.28</b>
2007			2,280,339,611.27
	<b>2,027,166,941.32</b>	<b>-3.84%</b>	<b>1,952,252,220.64</b>
2008			1,624,164,830.02

#### 5.4. Proyecciones climáticas

A continuación, se presentan los resultados de las proyecciones climáticas en las estaciones climatológicas. Como se mencionó en la metodología se utilizaron el modelo de circulación CNRMCM5 y el ensamble REA, mediante los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, en los horizontes (2015-2039), (2045-2069) y (2075-2099).

En este capítulo se muestran los resultados del modelo de circulación general CNRMCM5, Los resultados del ensamble REA se presentan en los anexos del documento.

##### 5.4.1. Escenario RCP 4.5

Utilizando la base de datos se realizó el mapa del modelo de circulación global CNRMCM5, en el horizonte 2015-2039, para sintetizar el horizonte se definirá como (CNRMCM5\_RCP45\_2015\_2039). Se obtuvo la siguiente información que se muestra a continuación. En la Tabla 52, se muestra el porcentaje de cambio de precipitación en cada estación climatológica.

**Tabla 52. Porcentaje del cambio de precipitación.**

CLAVE	NOMBRE	Pcambio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	5.60	4.60	-3.19	-13.89	6.63	6.13	0.60	4.40	-6.72	-0.94	-2.34	9.16
23012	COBA, SOLIDARIDAD	4.59	4.11	2.47	-10.80	4.60	7.14	1.40	3.07	-5.99	-0.59	-0.56	11.40
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	5.19	1.97	-3.81	-11.82	7.28	5.44	0.41	4.91	-6.51	-0.91	-1.04	8.40
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	6.97	6.26	-6.38	-15.69	8.01	6.03	0.12	5.00	-7.51	-1.18	-3.71	9.95
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	4.27	1.79	3.07	-9.10	4.54	6.90	1.55	3.34	-5.84	-0.48	-0.03	9.62
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	4.45	1.00	-1.68	-11.33	6.27	5.97	0.94	4.69	-6.32	-0.98	-0.66	8.17
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	6.17	3.50	-7.69	-10.88	9.38	4.42	-0.61	5.00	-6.20	-0.22	-0.99	9.72
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	5.08	3.89	-1.26	-12.93	5.90	6.49	0.95	4.01	-6.43	-0.86	-1.68	9.69
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	5.60	6.41	-0.77	-14.93	5.41	7.13	1.06	3.56	-6.58	-0.80	-2.85	10.94
31069	CHEMAX, CHEMAX	5.26	7.65	2.43	-12.28	4.50	7.52	1.22	2.73	-6.10	-0.46	-1.57	12.73



Mediante el mapa CNRMCM5\_RCP45\_2015\_2039, se definieron de manera espacial los valores mensuales de precipitación en cada estación climatológica. En la Tabla 53, se muestra los resultados mensuales de la precipitación.

**Tabla 53. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	Precipitación											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	51.36	44.37	22.83	32.79	108.66	176.91	123.26	152.54	205.59	161.62	57.63	53.06
23012	COBA, SOLIDARIDAD	51.50	41.31	23.14	39.07	117.15	181.94	128.55	163.68	205.43	166.53	68.35	51.98
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	60.62	46.46	24.52	37.27	114.97	179.94	120.02	155.21	214.61	180.35	69.14	65.16
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	47.33	42.65	20.73	29.60	101.71	163.47	118.63	144.02	192.97	146.47	50.84	46.77
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	58.39	41.63	24.93	42.53	121.73	186.36	123.52	159.39	205.48	180.59	81.53	61.99
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	62.75	45.85	25.56	39.24	117.90	183.29	119.61	156.25	217.32	187.11	75.19	68.04
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	64.18	49.00	23.29	38.55	115.78	177.85	122.23	156.70	216.63	181.57	68.89	67.95
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	52.71	43.53	23.28	35.26	112.29	179.27	124.49	155.94	207.38	166.66	62.97	54.89
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	43.46	41.52	21.51	30.54	105.62	175.71	128.18	153.13	198.40	147.40	50.98	42.73
31069	CHEMAX, CHEMAX	44.35	39.81	21.72	35.81	111.18	178.19	133.07	163.66	200.18	151.70	57.23	43.33

Utilizando la base de datos del modelo CNRMCM5\_RCP45\_2015\_2039, se determinaron los valores de temperatura promedio mensual en cada estación climatológica. En la Tabla 54, se muestran los resultados mensuales de la temperatura en el acuífero.

**Tabla 54. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.**

CLAVE	NOMBRE	Tmedia											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	23.05	23.54	25.23	26.85	27.71	28.13	28.21	28.19	27.93	26.59	24.87	23.62
23012	COBA, SOLIDARIDAD	23.37	24.05	25.72	27.27	28.14	28.21	28.20	28.22	28.10	26.76	25.16	23.90
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	23.28	23.65	25.25	26.81	27.65	28.19	28.30	28.30	28.02	26.77	25.10	23.84
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	22.81	23.32	25.03	26.72	27.77	28.36	28.49	28.47	28.21	26.78	24.86	23.53
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	23.60	24.24	25.81	27.29	28.10	28.25	28.28	28.31	28.19	26.90	25.38	24.10
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	23.44	23.84	25.42	26.96	27.75	28.19	28.31	28.31	28.04	26.82	25.20	23.95
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	23.33	23.66	25.27	26.74	27.69	28.30	28.45	28.53	28.17	27.00	25.25	23.96
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	23.21	23.74	25.41	27.01	27.86	28.16	28.23	28.21	28.00	26.68	24.99	23.75
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	23.00	23.65	25.40	27.06	27.95	28.14	28.18	28.14	27.96	26.54	24.78	23.56
31069	CHEMAX, CHEMAX	23.23	23.97	25.74	27.36	28.22	28.23	28.17	28.18	28.07	26.68	25.02	23.75

Se generaron los mapas para el horizonte 2045-2069, para sintetizar el horizonte se definió como CNRMCM5\_RCP45\_2045\_2069. En la Tabla 55, se muestra el porcentaje de cambio de precipitación en las estaciones climatológicas.



**Tabla 55. Porcentaje del cambio de precipitación.**

CLAVE	NOMBRE	Pcambio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	-1.48	-6.78	18.99	30.60	2.65	-7.02	-0.44	-2.50	-3.84	7.47	-1.44	-8.77
23012	COBA, SOLIDARIDAD	-3.85	-3.43	15.27	16.62	1.56	-6.43	-0.47	-2.82	-3.56	7.82	0.42	-2.11
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	-2.62	-7.25	21.05	29.45	2.79	-5.89	-0.53	-1.92	-3.44	7.17	0.24	-7.10
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	0.09	-8.67	21.76	38.49	3.45	-8.59	-0.60	-2.51	-4.37	7.68	-3.10	-15.27
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	-4.26	-4.20	15.46	15.42	1.51	-5.55	-0.60	-2.45	-3.39	7.27	1.68	-1.11
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	-3.50	-6.27	19.66	25.43	2.07	-5.25	-0.30	-2.06	-3.11	7.08	0.51	-5.11
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	-2.55	-8.30	22.01	31.77	5.28	-6.00	-0.18	-1.24	-3.19	7.63	1.66	-8.13
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	-2.50	-5.65	17.79	25.75	2.21	-6.52	-0.32	-2.59	-3.60	7.59	-0.70	-6.48
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	-1.48	-5.44	15.96	27.32	2.37	-7.55	-0.16	-3.10	-3.95	8.06	-2.14	-8.27
31069	CHEMAX, CHEMAX	-2.81	-2.99	13.32	17.11	1.52	-7.43	-0.50	-3.13	-3.88	8.19	-1.27	-3.09

Utilizando la base de datos se generaron los mapas de precipitación mensual en cada estación climatológica del horizonte CNRMCM5\_RCP45\_2045\_2069. En la Tabla 56, se muestra los resultados de la precipitación mensual.

**Tabla 56. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	Precipitacion											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	47.51	39.20	28.34	50.09	104.50	154.11	120.56	141.27	212.06	177.06	58.18	44.28
23012	COBA, SOLIDARIDAD	47.13	37.88	26.20	51.00	113.09	157.32	124.97	152.75	211.28	181.84	69.10	45.61
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	55.86	41.90	30.74	55.47	110.33	159.19	117.83	143.99	221.86	197.15	70.32	55.90
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	43.90	36.39	27.14	49.00	97.64	140.67	116.79	132.14	198.96	160.85	51.34	37.06
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	53.52	38.96	28.06	53.88	117.83	162.95	119.36	148.71	211.22	195.73	83.44	56.09
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	57.55	42.24	31.05	55.77	113.11	162.22	116.51	144.76	224.89	204.73	76.42	59.55
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	58.43	43.40	30.83	58.13	111.38	158.47	122.37	145.55	222.94	197.04	71.32	56.62
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	48.37	39.22	28.07	50.66	107.94	156.07	121.37	144.81	213.88	182.69	63.55	46.60
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	40.22	36.31	25.63	45.48	102.27	150.61	124.85	142.09	203.57	162.45	51.89	35.39
31069	CHEMAX, CHEMAX	40.72	35.48	24.44	47.99	107.74	152.11	129.43	152.69	205.81	166.58	57.77	37.63

Utilizando la base de datos del modelo CNRMCM5\_RCP45\_2045\_2069, se determinaron los valores de temperatura promedio mensual en cada estación climatológica. En la Tabla 57, se muestran los resultados mensuales de la temperatura en el acuífero.



**Tabla 57. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.**

CLAVE	NOMBRE	Tmedia											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	23.42	23.94	25.69	27.30	28.32	28.71	28.76	28.74	28.45	27.10	25.08	23.92
23012	COBA, SOLIDARIDAD	23.79	24.45	26.17	27.77	28.75	29.04	28.84	28.85	28.66	27.31	25.42	24.13
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	23.62	24.04	25.74	27.24	28.25	28.70	28.80	28.80	28.52	27.27	25.32	24.14
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	23.16	23.72	25.50	27.15	28.37	28.91	29.01	29.00	28.73	27.25	25.07	23.83
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	24.03	24.64	26.28	27.78	28.74	29.02	28.92	28.93	28.74	27.47	25.63	24.36
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	23.82	24.21	25.90	27.40	28.35	28.73	28.81	28.82	28.54	27.34	25.42	24.25
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	23.64	24.06	25.78	27.21	28.29	28.80	28.95	29.02	28.67	27.43	25.45	24.26
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	23.59	24.13	25.86	27.48	28.46	28.81	28.79	28.78	28.52	27.19	25.22	24.03
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	23.40	24.04	25.83	27.56	28.54	28.85	28.79	28.76	28.49	27.05	25.01	23.83
31069	CHEMAX, CHEMAX	23.66	24.38	26.19	27.88	28.84	29.11	28.83	28.85	28.66	27.24	25.25	23.98

Tomando el modelo CNRMCM5, con el escenario RCP 4.5 para el horizonte 2075-2099, para sintetizar el horizonte se definirá como (CNRMCM5\_RCP45\_2075\_2099). Donde se obtuvo la siguiente información (Tabla 58).

**Tabla 58. Porcentaje del cambio de precipitación.**

CLAVE	NOMBRE	Pcambio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	8.96	-3.56	-10.17	1.17	7.13	12.01	4.78	4.87	-4.77	7.39	17.62	-1.48
23012	COBA, SOLIDARIDAD	6.74	1.83	-1.84	6.58	3.55	11.88	6.99	4.19	-3.95	4.29	10.23	1.11
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	7.03	-2.73	-7.81	0.95	6.59	12.00	5.23	4.99	-4.61	5.51	14.40	-1.62
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	12.02	-7.02	-16.16	-1.63	9.40	12.84	3.82	5.06	-5.55	10.45	22.31	-3.72
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	5.13	3.20	0.65	7.41	2.50	11.64	7.72	4.60	-3.95	3.16	7.93	1.08
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	5.71	-0.82	-4.61	2.55	5.47	12.21	6.49	4.97	-4.31	4.33	12.25	-0.99
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	7.92	-5.36	-11.79	-1.07	7.75	10.74	2.83	4.48	-4.96	6.74	14.50	-2.87
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	7.82	-1.65	-7.08	3.08	5.87	12.04	5.73	4.69	-4.44	6.15	14.88	-0.72
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	9.79	-2.52	-9.78	3.31	6.46	11.95	5.03	4.55	-4.63	8.08	18.17	-0.76
31069	CHEMAX, CHEMAX	8.94	0.79	-4.51	6.37	4.25	11.54	6.09	3.92	-4.05	5.92	13.14	1.82

Mediante el mapa CNRMCM5\_RCP45\_2075\_2099, se definieron de manera espacial los valores mensuales de precipitación en cada estación climatológica. En la Tabla 59, se muestra los resultados mensuales de la precipitación.



**Tabla 59. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	Precipitación											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	53.18	40.37	21.01	38.48	108.86	186.79	128.16	153.02	209.45	177.26	69.59	47.75
23012	COBA, SOLIDARIDAD	52.83	40.43	22.20	46.95	115.25	189.48	135.11	165.53	209.64	175.69	76.13	47.29
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	61.94	43.74	23.13	42.94	114.07	191.32	125.90	155.35	218.34	194.36	80.81	58.85
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	49.23	36.84	18.28	34.71	102.60	173.61	123.34	143.74	195.39	164.39	64.89	41.04
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	59.37	42.37	24.22	50.22	118.93	195.02	130.51	161.03	209.67	188.44	88.63	57.25
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	63.48	44.80	24.52	45.50	116.43	194.36	125.84	156.46	221.35	198.83	85.80	62.31
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	65.03	43.83	22.23	43.02	114.07	188.29	127.54	156.09	218.45	195.97	80.94	59.38
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	54.13	41.04	21.90	41.61	111.44	188.55	130.16	156.93	211.47	179.05	73.54	49.36
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	45.35	37.34	19.74	37.18	106.05	183.28	133.13	154.39	201.76	161.14	61.88	37.99
31069	CHEMAX, CHEMAX	46.00	37.39	20.35	43.91	110.51	184.40	139.15	165.69	204.89	162.70	65.60	39.36

Utilizando la base de datos del modelo CNRMCM5\_RCP45\_2075\_2099, se determinaron los valores de temperatura promedio mensual en cada estación climatológica. En la Tabla 60, se muestran los resultados mensuales de la temperatura en el acuífero.

**Tabla 60. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.**

CLAVE	NOMBRE	Tmedia											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	23.88	24.09	26.22	27.76	28.78	28.95	29.01	29.03	28.74	27.51	25.53	24.14
23012	COBA, SOLIDARIDAD	24.27	24.56	26.72	28.18	29.24	29.11	29.04	29.10	28.90	27.72	25.85	24.41
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	24.12	24.24	26.22	27.70	28.71	29.00	29.10	29.11	28.82	27.71	25.75	24.38
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	23.65	23.89	26.03	27.63	28.84	29.18	29.29	29.31	29.02	27.68	25.49	24.04
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	24.51	24.76	26.77	28.19	29.19	29.14	29.11	29.16	29.00	27.89	26.08	24.64
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	24.32	24.40	26.40	27.86	28.78	29.02	29.11	29.11	28.84	27.79	25.87	24.52
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	24.14	24.26	26.19	27.63	28.71	29.10	29.25	29.32	28.98	27.90	25.87	24.48
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	24.06	24.28	26.41	27.91	28.92	29.01	29.04	29.07	28.80	27.61	25.67	24.28
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	23.85	24.14	26.41	27.97	29.00	28.99	28.99	29.04	28.76	27.45	25.49	24.07
31069	CHEMAX, CHEMAX	24.13	24.47	26.76	28.27	29.34	29.15	29.00	29.08	28.89	27.63	25.69	24.25

#### 5.4.2. Escenario RCP 8.5

Utilizando la base de datos se realizó el mapa del modelo de circulación global CNRMCM5, en el horizonte 2015-2039, para sintetizar el horizonte se definirá como (CNRMCM5\_RCP85\_2015\_2039). Se obtuvo la siguiente información que se muestra a continuación. En la Tabla 61, se muestra el porcentaje de cambio de precipitación en cada estación climatológica.



**Tabla 61. Porcentaje del cambio de precipitación dentro del escenario RCP 8.5.**

CLAVE	NOMBRE	Pcambio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	0.73	-1.18	0.36	1.87	2.00	7.35	2.02	1.69	0.08	0.51	9.86	1.54
23012	COBA, SOLIDARIDAD	0.00	0.60	3.96	2.55	2.00	8.47	2.11	0.96	0.57	1.45	7.84	1.97
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	0.66	-1.58	0.89	2.70	2.04	7.48	2.01	1.68	0.00	0.13	8.64	0.93
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1.72	-2.54	-1.51	1.22	2.01	7.38	1.80	2.15	0.03	0.26	11.22	2.01
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	0.16	0.51	5.08	3.21	2.04	8.89	2.39	1.01	0.69	1.61	6.50	1.39
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	0.32	-0.99	2.06	3.05	2.00	7.93	2.21	1.29	0.03	0.29	7.76	1.09
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	1.61	-2.72	-1.21	2.54	2.13	6.54	1.24	2.70	0.00	0.13	8.45	0.23
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	0.44	-0.57	1.49	2.25	2.00	7.74	2.08	1.39	0.18	0.76	9.03	1.67
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	0.58	-0.28	0.56	1.46	2.00	7.58	2.01	1.49	0.24	1.16	10.26	2.21
31069	CHEMAX, CHEMAX	0.12	1.28	3.08	1.83	2.02	8.12	2.01	0.94	0.86	1.70	8.96	2.70

Mediante el mapa CNRMCM5\_RCP85\_2015\_2039, se definieron de manera espacial los valores mensuales de precipitación en cada estación climatológica. En la Tabla 62, se muestran los resultados mensuales de la precipitación.

**Tabla 62. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	Precipitacion											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	49.56	41.09	23.73	39.15	103.46	179.46	124.74	148.67	222.20	165.99	65.43	48.83
23012	COBA, SOLIDARIDAD	49.31	39.81	23.74	45.06	113.63	184.22	129.42	160.22	222.33	170.60	74.26	47.79
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	58.49	43.90	25.51	44.25	109.04	183.79	121.89	150.96	229.68	184.35	76.60	60.58
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	45.27	38.57	21.98	36.05	95.54	166.51	120.70	140.04	208.40	148.73	58.72	42.99
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	55.99	41.06	25.47	48.36	118.59	190.03	124.26	155.50	221.59	185.70	87.14	57.53
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	60.75	44.18	26.52	46.03	112.82	187.20	120.81	151.65	232.85	191.55	82.53	63.19
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	61.36	45.37	24.95	45.05	108.38	181.55	125.01	153.43	229.78	184.41	76.87	61.01
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	50.67	41.30	24.09	41.71	107.69	181.84	125.51	152.17	223.71	171.24	69.74	50.77
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	41.71	38.43	22.18	36.17	102.00	177.28	129.42	149.89	214.98	150.96	58.00	39.28
31069	CHEMAX, CHEMAX	42.34	37.42	22.15	41.82	108.52	179.58	133.90	160.65	217.87	156.00	63.34	39.59

Utilizando la base de datos del modelo CNRMCM5\_RCP85\_2015\_2039, se determinaron los valores de temperatura promedio mensual en cada estación climatológica. En la Tabla 63, se muestran los resultados mensuales de la temperatura en el acuífero.



**Tabla 63. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.**

CLAVE	NOMBRE	Tmedia											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	23.11	23.60	25.31	27.05	27.98	28.25	28.21	28.30	28.00	26.58	24.88	23.42
23012	COBA, SOLIDARIDAD	23.47	24.07	25.82	27.47	28.36	28.45	28.20	28.37	28.11	26.71	25.11	23.62
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	23.32	23.75	25.35	27.01	27.95	28.30	28.30	28.41	28.11	26.79	25.11	23.65
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	22.86	23.40	25.13	26.92	28.05	28.47	28.49	28.58	28.31	26.77	24.86	23.32
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	23.70	24.27	25.91	27.49	28.36	28.49	28.28	28.43	28.22	26.89	25.31	23.87
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	23.51	23.91	25.52	27.16	28.05	28.32	28.31	28.41	28.14	26.84	25.20	23.77
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	23.33	23.76	25.37	26.93	27.91	28.39	28.45	28.63	28.28	26.99	25.24	23.78
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	23.29	23.77	25.52	27.21	28.10	28.31	28.23	28.34	28.05	26.65	24.99	23.53
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	23.10	23.64	25.51	27.27	28.16	28.30	28.18	28.28	27.96	26.50	24.77	23.33
31069	CHEMAX, CHEMAX	23.33	23.98	25.84	27.58	28.45	28.47	28.17	28.35	28.07	26.61	24.95	23.46

Utilizando la base de datos se realizó el mapa del modelo de circulación global CNRMCM5, en el horizonte 2045-2069, para sintetizar el horizonte se definirá como (CNRMCM5\_RCP85\_2045\_2069). Se obtuvo la siguiente información que se muestra a continuación. En la Tabla 64, se muestra el porcentaje de cambio de precipitación en cada estación climatológica.

**Tabla 64. Porcentaje del cambio de precipitación.**

CLAVE	NOMBRE	Pcambio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	-10.05	-13.63	-4.82	-4.79	11.27	1.15	-0.58	-0.02	-2.39	11.04	6.02	8.55
23012	COBA, SOLIDARIDAD	-11.13	-10.30	-1.02	-4.88	9.89	0.96	-0.11	-0.04	-1.43	8.95	6.44	6.13
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	-9.01	-13.68	-4.34	-3.97	11.69	1.49	-0.97	-0.09	-2.58	9.58	5.98	6.55
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	-10.20	-16.54	-7.34	-5.19	11.93	1.20	-0.69	0.00	-3.22	13.72	5.68	12.14
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	-10.02	-9.94	-0.49	-4.44	9.74	0.88	-0.26	-0.10	-0.99	7.85	6.34	4.08
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	-9.13	-12.43	-2.75	-3.86	11.45	1.66	-0.94	-0.21	-2.27	8.62	5.81	5.64
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	-8.11	-15.12	-6.58	-4.76	11.45	1.94	-0.86	0.00	-2.82	10.22	6.26	6.64
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	-10.32	-12.43	-3.35	-4.77	10.88	1.24	-0.46	-0.08	-2.07	10.10	6.07	7.58
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	-11.34	-12.54	-4.07	-5.69	10.47	0.98	-0.04	0.00	-1.88	11.63	6.18	9.54
31069	CHEMAX, CHEMAX	-12.29	-10.68	-1.60	-5.49	9.44	0.72	0.00	0.00	-1.36	10.25	6.76	7.92

Mediante el mapa CNRMCM5\_RCP85\_2045\_2069, se definieron de manera espacial los valores mensuales de precipitación en cada estación climatológica. En la Tabla 65, se muestra los resultados mensuales de la precipitación.



**Tabla 65. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	Precipitación											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	43.55	36.24	22.31	36.37	113.00	169.57	120.78	144.38	214.61	183.81	62.32	52.80
23012	COBA, SOLIDARIDAD	43.33	35.29	22.59	41.54	122.52	171.49	125.37	156.83	215.82	183.80	73.64	50.03
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	52.07	38.95	24.14	40.81	119.74	174.15	117.63	146.30	222.78	202.09	74.64	63.75
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	39.86	33.11	20.35	33.48	105.80	157.48	116.90	135.24	200.46	169.45	56.50	47.06
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	50.12	36.81	24.03	44.41	127.60	176.08	119.96	152.45	215.71	197.23	86.67	59.22
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	54.18	39.39	25.08	42.51	123.47	176.35	116.54	147.38	226.27	208.01	80.78	66.16
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	54.56	39.73	23.26	41.75	117.91	173.47	121.76	148.52	224.04	202.48	74.97	66.00
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	44.65	36.35	22.80	38.35	117.13	170.94	121.73	148.15	216.62	186.26	68.19	53.50
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	36.39	33.55	20.79	33.78	110.19	166.09	125.55	146.35	207.82	167.25	55.79	42.30
31069	CHEMAX, CHEMAX	36.59	32.80	21.11	38.71	116.28	166.92	130.15	157.29	211.32	169.48	62.51	42.02

Utilizando la base de datos del modelo CNRMCM5\_RCP85\_2045\_2069, se determinaron los valores de temperatura promedio mensual en cada estación climatológica. En la Tabla 66, se muestran los resultados mensuales de la temperatura en el acuífero.

**Tabla 66. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.**

CLAVE	NOMBRE	Tmedia											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	23.80	24.42	26.22	27.90	28.78	29.16	29.23	29.33	29.04	27.59	25.73	24.32
23012	COBA, SOLIDARIDAD	24.18	24.96	26.72	28.40	29.20	29.40	29.34	29.41	29.20	27.76	26.06	24.60
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	23.99	24.54	26.24	27.81	28.75	29.20	29.30	29.41	29.12	27.76	25.94	24.54
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	23.56	24.21	26.03	27.75	28.82	29.36	29.50	29.60	29.32	27.74	25.69	24.23
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	24.42	25.14	26.81	28.40	29.23	29.41	29.40	29.49	29.30	27.90	26.28	24.80
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	24.17	24.71	26.40	27.97	28.85	29.22	29.31	29.41	29.14	27.82	26.08	24.65
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	24.03	24.49	26.27	27.75	28.71	29.23	29.45	29.63	29.21	27.93	26.05	24.66
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	23.97	24.61	26.40	28.08	28.92	29.24	29.27	29.37	29.10	27.67	25.88	24.45
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	23.81	24.49	26.41	28.18	28.96	29.24	29.24	29.34	29.06	27.53	25.69	24.27
31069	CHEMAX, CHEMAX	24.06	24.89	26.77	28.53	29.28	29.44	29.33	29.41	29.19	27.68	25.92	24.44

Utilizando la base de datos se realizó el mapa del modelo de circulación global CNRMCM5, en el horizonte 2075-2099, para sintetizar el horizonte se definirá como (CNRMCM5\_RCP85\_2075\_2099). Se obtuvo la siguiente información que se muestra a continuación. En la Tabla 67, se muestra el porcentaje de cambio de precipitación en cada estación climatológica.



**Tabla 67. Porcentaje del cambio de precipitación.**

CLAVE	NOMBRE	Pcambio											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	-12.44	-14.07	-13.71	-13.55	7.56	-2.14	-0.69	-1.16	-2.73	12.70	15.03	-6.22
23012	COBA, SOLIDARIDAD	-11.09	-14.30	-4.34	-9.01	7.01	-2.45	0.00	-1.10	-1.95	11.93	11.10	-2.06
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	-11.60	-14.27	-12.89	-11.56	8.07	-2.49	-0.59	-1.35	-2.50	10.76	12.55	-5.73
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	-14.08	-15.23	-19.59	-16.38	8.31	-2.17	-1.06	-1.41	-3.18	14.71	17.67	-10.15
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	-10.15	-14.68	-2.12	-7.14	7.05	-2.76	-0.08	-1.21	-1.89	10.31	9.25	-1.64
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	-11.14	-14.22	-9.68	-10.02	7.94	-2.67	-0.30	-1.65	-2.30	9.91	11.06	-4.44
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	-11.83	-14.64	-17.69	-12.15	8.26	-2.94	-0.84	-0.92	-2.06	11.48	12.73	-7.32
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	-11.96	-14.13	-10.56	-11.80	7.44	-2.33	-0.41	-1.27	-2.43	12.19	13.46	-4.78
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	-12.99	-14.11	-11.88	-13.81	7.00	-2.05	-0.51	-1.02	-2.57	14.32	16.03	-5.46
31069	CHEMAX, CHEMAX	-11.53	-14.19	-5.81	-10.87	6.69	-2.23	-0.09	-1.01	-1.96	13.94	13.57	-2.15

Mediante el mapa CNRMCM5\_RCP85\_2075\_2099, se definieron de manera espacial los valores mensuales de precipitación en cada estación climatológica. En la Tabla 68, se muestra los resultados mensuales de la precipitación.

**Tabla 68. Proyecciones de precipitación mensual. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	Precipitacion											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	42.39	35.82	19.97	32.94	109.59	162.11	120.77	142.84	215.12	185.68	68.05	45.58
23012	COBA, SOLIDARIDAD	43.32	33.45	21.57	39.47	119.53	164.27	125.20	154.79	214.81	188.47	76.93	46.24
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	50.51	38.38	21.68	37.67	116.00	165.30	118.23	144.96	224.14	203.99	79.55	56.29
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	37.93	33.41	17.72	29.43	102.18	149.98	116.42	133.61	201.22	170.78	62.28	38.65
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	49.94	34.48	23.71	42.91	124.32	168.27	119.87	150.32	214.35	201.45	89.74	55.79
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	52.87	38.37	22.98	39.79	119.72	167.39	117.17	145.61	226.65	210.84	84.57	59.92
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	52.70	40.22	20.43	38.08	114.44	163.61	121.21	147.32	226.45	204.71	79.00	56.74
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	44.06	35.44	20.87	35.50	113.84	163.33	121.83	146.22	216.67	189.23	72.67	47.48
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	35.69	32.84	18.96	30.61	107.13	159.73	125.05	144.00	207.19	169.88	61.20	36.44
31069	CHEMAX, CHEMAX	36.87	31.35	19.95	36.48	113.73	160.71	129.75	155.50	209.68	174.15	65.90	38.17

Utilizando la base de datos del modelo CNRMCM5\_RCP85\_2075\_2099, se determinaron los valores de temperatura promedio mensual en cada estación climatológica. En la Tabla 69, se muestran los resultados mensuales de la temperatura en el acuífero.



**Tabla 69. Temperatura media en las estaciones climatológicas. Valores expresados en °C.**

CLAVE	NOMBRE	Tmedia											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	24.82	25.42	27.32	29.01	29.88	30.31	30.49	30.65	30.28	28.85	26.79	25.44
23012	COBA, SOLIDARIDAD	25.27	26.01	27.87	29.59	30.39	30.63	30.65	30.81	30.59	29.12	27.15	25.76
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	25.01	25.54	27.33	28.91	29.79	30.30	30.54	30.69	30.36	29.02	27.02	25.64
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	24.57	25.18	27.10	28.86	29.90	30.50	30.73	30.88	30.54	29.01	26.75	25.30
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	25.48	26.21	27.97	29.58	30.38	30.62	30.73	30.87	30.68	29.28	27.37	25.98
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	25.22	25.73	27.50	29.07	29.92	30.33	30.59	30.72	30.41	29.11	27.13	25.78
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	25.03	25.49	27.30	28.84	29.80	30.40	30.66	30.85	30.49	29.21	27.15	25.70
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	25.02	25.63	27.52	29.20	30.06	30.40	30.56	30.70	30.39	28.97	26.93	25.58
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	24.84	25.51	27.53	29.33	30.17	30.45	30.54	30.68	30.35	28.85	26.74	25.39
31069	CHEMAX, CHEMAX	25.14	25.93	27.92	29.72	30.51	30.69	30.65	30.82	30.58	29.06	27.01	25.61

### 5.5. Balance hídrico considerando los escenarios de cambio climático

Con las láminas de precipitación y temperatura calculadas en los horizontes de los dos modelos de cambio climático en las estaciones climatológicas, se realizó el balance hídrico de cada horizonte analizado.

Utilizando la temperatura proyectada en cada horizonte se determinaron las láminas de evapotranspiración potencial. Mediante la evapotranspiración potencial calculada y la precipitación proyectada, se realiza el balance hídrico en cada estación climatológica mediante la metodología mencionada en el capítulo 4.1.1.1.

Se calcularon los balances hídricos en los diez horizontes considerados en los dos escenarios de cambio climático, se consideró realizaron los balances considerando la precipitación proyectada y el porcentaje de cambio de la precipitación con base a la precipitación promedio de cada estación climatológica. En la Tabla 70, se muestra el balance hídrico de la estación 23011, utilizando del horizonte CNRMCM5\_RCP45\_2015\_2039.

**Tabla 70. Balance hídrico de la estación 23011. Valores expresados en milímetros**

ESTACION	CC	PE	N	Longitud	Latitud							
KANTUNILKIN, LAZARO CARDE	40.57			-87.49	21.10							
CLAVE	CM5 RCP45 2015 2039											
23011	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
evapotranspiración potencial	71.43	80.57	92.93	122.17	162.31	146.54	181.52	171.32	149.01	125.60	84.84	55.11
precipitación	46.57	46.19	50.73	43.99	120.57	181.04	150.08	204.65	215.57	174.92	76.44	45.97
reserva de agua util	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.50	3.07	36.40	40.57	40.57	32.16	23.03
evapotranspiración efectiva	69.60	46.19	50.73	43.99	120.57	146.54	181.52	171.32	149.01	125.60	84.84	55.11
excedente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.40	49.32	0.00	0.00
diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración	-24.86	-34.38	-42.20	-78.18	-41.75	34.50	-31.43	33.33	66.56	49.32	-8.40	-9.14



### Precipitación proyectada

Con base a los resultados del balance hídrico en los 10 horizontes considerados se determinaron las láminas resultantes de cada estación climatológica. En la Tabla 71, se presentan las láminas de precipitación proyectadas en los distintos horizontes.

**Tabla 71. Lámina de precipitación proyectada acumulada. Valores expresados en milímetros**

CLAVE	NOMBRE	CMS						REA			
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
		2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2075_2099	2015_2039	2075_2099
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	1190.61	1177.16	1233.90	1212.31	1199.75	1180.85	1054.38	1134.74	1059.22	1028.20
23012	COBA, SOLIDARIDAD	1238.61	1218.18	1276.52	1260.38	1242.23	1228.06	1069.94	1158.62	1092.20	1060.42
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	1268.27	1260.55	1310.77	1289.03	1277.06	1256.70	1120.32	1209.99	1131.04	1103.61
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1105.17	1091.89	1148.05	1123.51	1115.70	1093.62	974.40	1052.95	982.10	944.89
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	1288.08	1269.74	1325.67	1311.24	1290.29	1275.14	1106.98	1198.75	1136.50	1102.96
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	1298.09	1288.81	1339.69	1320.08	1306.11	1285.87	1142.07	1232.36	1155.30	1129.65
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	1282.61	1276.48	1314.83	1297.16	1288.46	1264.90	1132.48	1225.26	1146.90	1114.93
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	1218.68	1203.23	1259.20	1240.44	1224.68	1207.16	1069.85	1153.07	1079.58	1050.25
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	1139.17	1120.75	1179.23	1160.30	1145.84	1128.72	1002.22	1075.99	1005.79	972.61
31069	CHEMAX, CHEMAX	1180.22	1158.39	1219.92	1203.17	1185.19	1172.24	1023.06	1104.37	1040.17	1003.00

La Tabla 72, muestra los resultados de las láminas de excedentes resultantes en cada estación climatológica utilizando el balance hídrico.

**Tabla 72. Lámina de excedente (recarga directa) de cada estación climatológica. Valores expresados en milímetros**

CLAVE	NOMBRE	CMS						REA			
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
		2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2075_2099	2015_2039	2075_2099
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	52.03	108.98	90.80	108.57	93.67	123.91	229.39	165.43	100.69	113.84
23012	COBA, SOLIDARIDAD	203.00	134.57	276.92	196.41	253.10	212.04	223.32	141.65	98.77	194.46
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	119.49	146.55	138.42	164.01	139.64	289.92	134.01	142.98	76.11	136.78
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	50.24	68.73	70.06	52.63	71.45	39.44	37.05	0.00	0.00	37.27
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	291.32	234.02	471.84	304.19	143.08	406.41	14.72	0.00	58.08	15.65
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	121.82	167.86	181.55	134.48	53.31	164.80	65.29	267.66	137.86	334.69
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	126.17	81.88	78.55	74.73	82.86	88.50	54.78	45.70	7.65	57.90
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	77.72	105.09	141.50	101.25	101.41	106.55	86.82	108.67	59.65	98.22
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	3.69	17.50	0.00	9.78	1.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31069	CHEMAX, CHEMAX	62.57	58.45	52.69	34.47	48.66	52.27	21.52	0.00	0.00	21.34

En la Tabla 73, se muestran los resultados de la evapotranspiración efectiva calculada en el balance hídrico en cada estación climatológica.

**Tabla 73. Lámina de evapotranspiración de cada estación climatológica. Valores expresados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	CMS						REA			
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
		2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2075_2099	2015_2039	2075_2099
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	1138.58	1068.18	1143.10	1103.74	1106.08	1056.94	824.99	969.31	958.53	914.36
23012	COBA, SOLIDARIDAD	1020.54	1083.61	986.87	1063.97	989.14	1016.02	846.62	1003.11	993.43	865.97
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	1148.78	1114.01	1172.34	1125.02	1137.42	966.78	986.31	1067.01	1054.93	966.83
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1054.93	1023.17	1078.00	1070.88	1044.24	1054.18	937.35	1052.95	982.10	907.62
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	996.75	1035.73	796.07	962.10	1147.21	868.73	1092.26	1198.75	1078.42	1087.31
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	1176.27	1120.95	1158.14	1185.60	1252.80	1121.07	1076.78	964.70	1017.44	794.95
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	1156.45	1194.60	1236.28	1222.43	1205.60	1176.40	1077.70	1179.55	1139.25	1057.02
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	1140.96	1098.14	1117.70	1139.18	1123.27	1100.61	983.02	1044.40	1019.92	952.02
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	1135.48	1103.25	1179.23	1150.52	1144.43	1128.72	1002.22	1075.99	1005.79	972.61
31069	CHEMAX, CHEMAX	1117.65	1099.95	1167.23	1168.70	1136.54	1119.98	1001.54	1104.37	1040.17	981.66



## Porcentaje de cambio de Precipitación

Con base al porcentaje de cambio de la precipitación promedio se realizó el balance hídrico en cada estación climatológica. En la Tabla 74, se muestra las láminas de precipitación en cada uno de los horizontes.

**Tabla 74. Lámina de precipitación acumulada. Valores expresados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	CMS						REA			
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
		2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2075_2099	2015_2039	2075_2099
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	1356.72	1355.54	1406.76	1380.21	1369.33	1349.75	1305.24	1294.92	1285.84	1171.14
23012	COBA, SOLIDARIDAD	1363.26	1351.53	1404.70	1384.93	1368.90	1356.55	1296.43	1275.31	1283.96	1163.02
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	1357.62	1360.85	1402.14	1378.85	1366.90	1346.59	1303.15	1291.66	1286.61	1174.36
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1354.31	1354.00	1411.23	1380.07	1371.22	1346.64	1297.87	1292.40	1285.45	1160.25
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	1363.76	1353.31	1402.82	1386.40	1367.53	1354.09	1290.83	1265.74	1283.07	1159.42
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	1358.87	1360.11	1403.00	1379.76	1366.60	1347.00	1300.92	1286.03	1285.77	1172.75
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	1359.00	1368.67	1393.74	1376.49	1366.73	1345.19	1303.54	1297.31	1291.13	1177.78
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	1358.80	1355.17	1406.09	1381.35	1369.00	1351.39	1302.51	1288.55	1285.42	1169.36
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	1358.54	1351.36	1410.03	1382.53	1371.55	1354.69	1304.68	1292.37	1285.19	1166.55
31069	CHEMAX, CHEMAX	1363.68	1347.21	1407.27	1385.96	1370.37	1360.18	1298.86	1279.35	1284.99	1159.76

En la Tabla 75, se muestran los resultados de la evapotranspiración efectiva calculada en el balance hídrico en cada estación climatológica.

**Tabla 75. Lámina de evapotranspiración de cada estación climatológica. Valores expresados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	CMS						REA			
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
		2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2075_2099	2015_2039	2075_2099
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	1245.01	1175.89	1201.05	1170.31	1170.32	1155.08	961.61	1029.73	1133.15	960.34
23012	COBA, SOLIDARIDAD	1053.78	1176.04	1027.24	1100.65	1024.25	1078.63	1001.79	1069.89	1133.91	920.80
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	1205.56	1196.15	1247.32	1180.33	1209.84	1006.94	1141.73	1155.30	1215.82	1036.05
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	1195.69	1190.03	1202.24	1229.78	1209.99	1211.26	1173.52	1267.29	1237.87	1043.14
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	1007.40	1055.10	796.07	972.73	1149.90	876.08	1234.49	1227.10	1198.10	1112.60
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	1190.99	1179.26	1249.92	1201.47	1329.93	1214.40	1234.73	1052.04	1125.83	824.95
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	1196.47	1292.99	1321.49	1301.66	1291.19	1264.65	1256.69	1259.59	1289.03	1126.75
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	1233.02	1210.97	1192.88	1245.79	1230.50	1206.42	1163.81	1161.23	1206.96	1038.47
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	1293.87	1261.64	1382.86	1336.27	1321.37	1340.68	1281.60	1273.47	1285.19	1166.55
31069	CHEMAX, CHEMAX	1222.50	1243.17	1298.67	1287.87	1279.89	1253.12	1206.51	1260.69	1284.99	1079.19

La Tabla 76, muestra los resultados de las láminas de excedentes resultantes en cada estación climatológica utilizando el balance hídrico.



**Tabla 76. Lámina de excedente (recarga directa) de cada estación climatológica. Valores reportados en milímetros.**

CLAVE	NOMBRE	CMS						REA			
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
		2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2045_2069	2075_2099	2015_2039	2075_2099	2015_2039	2075_2099
23011	KANTUNILKIN, LAZARO CARDENAS	111.71	179.66	198.80	209.90	199.02	194.67	343.62	265.19	152.69	210.80
23012	COBA, SOLIDARIDAD	309.49	175.50	362.89	283.61	344.65	269.38	294.64	205.42	150.05	242.22
23014	LEONA VICARIO, BENITO JUAREZ	152.06	164.71	154.81	198.53	157.06	339.65	161.42	136.36	70.79	138.32
23023	SOLFERINO, LAZARO CARDENAS	152.59	163.97	179.07	148.69	161.24	135.39	124.35	25.11	47.57	117.11
23025	TULUM, SOLIDARIDAD	281.30	298.21	536.02	371.94	217.63	478.01	56.34	38.64	84.97	46.81
23027	VICTORIA, LAZARO CARDENAS	167.88	180.86	153.08	178.29	36.67	132.59	66.19	233.99	159.94	347.09
23155	CANCUN, BENITO JUAREZ	162.54	75.68	72.26	74.82	75.53	80.54	46.85	37.72	2.10	51.02
23157	IDEAL, LAZARO CARDENAS	125.78	144.19	213.21	135.56	138.50	144.97	138.70	127.32	78.46	130.89
31068	CHANCENOTE, TIZIMIN	64.68	89.72	27.17	46.26	50.18	14.01	23.08	18.90	0.00	0.00
31069	CHEMAX, CHEMAX	141.18	104.04	108.60	98.10	90.48	107.07	92.36	18.66	0.00	80.57

### Volúmenes resultantes

Utilizando las láminas resultantes de balance hídrico en cada una estación climatológica se realizó el cálculo de los volúmenes de agua en cada horizonte proyectado. En la Tabla 77, se muestran los volúmenes resultantes de cada horizonte. Se considera la precipitación como el 100% del agua que ingresa al acuífero de forma superficial.

**Tabla 77. Volúmenes resultantes del balance hídrico.**

Proyecciones			Periodo	Precipitación		Evapotranspiración		Infiltración	
				Volumen (m3)	Porcentaje	Volumen (m3)	Porcentaje	Volumen (m3)	Porcentaje
Precipitación proyectada	CMS	RCP 4.5	2015_2039	9,398,796,573.78	100.00%	8,435,990,923.35	89.76%	955,559,871.23	10.17%
			2045_2069	9,318,632,770.68	100.00%	8,342,690,012.08	89.53%	976,361,309.36	10.48%
			2075_2099	9,693,757,823.19	100.00%	8,445,782,107.15	87.13%	1,208,184,075.75	12.46%
		RCP 8.5	2015_2039	9,546,510,924.42	100.00%	8,528,126,637.44	89.33%	992,312,433.20	10.39%
			2045_2069	9,452,657,209.23	100.00%	8,663,923,317.20	91.66%	788,875,244.63	8.35%
			2075_2099	9,300,597,957.67	100.00%	7,989,818,734.73	85.91%	788,875,244.63	8.48%
	REA	RCP 4.5	2015_2039	8,260,680,969.65	100.00%	7,598,180,350.60	91.98%	662,506,601.36	8.02%
			2075_2099	8,925,478,978.90	100.00%	8,025,651,967.61	89.92%	893,171,007.81	10.01%
			RCP 8.5	2015_2039	8,363,138,657.21	100.00%	7,873,099,787.50	94.14%	490,172,927.66
2075_2099	8,136,244,395.05	100.00%		7,077,836,467.73	86.99%	1,058,532,759.89	13.01%		
Porcentaje de cambio de precipitación, de los valores iniciales	CMS	RCP 4.5		2015_2039	10,199,592,195.31	100.00%	8,832,746,142.14	86.60%	1,317,830,684.37
			2045_2069	10,209,248,988.40	100.00%	9,013,482,775.14	88.29%	1,195,766,213.12	11.71%
			2075_2099	10,526,418,024.80	100.00%	9,020,051,410.79	85.69%	1,427,891,716.91	13.56%
		RCP 8.5	2015_2039	10,358,599,429.13	100.00%	9,003,437,587.82	86.92%	1,328,982,752.23	12.83%
			2045_2069	10,267,676,235.62	100.00%	9,272,406,415.56	90.31%	995,269,820.33	9.69%
			2075_2099	10,119,253,232.26	100.00%	8,595,733,717.28	84.94%	1,519,332,820.72	15.01%
	REA	RCP 4.5	2015_2039	9,765,000,592.96	100.00%	8,873,828,237.79	90.87%	891,172,356.42	9.13%
			2075_2099	9,674,503,510.28	100.00%	8,742,722,407.69	90.37%	931,781,101.49	9.63%
			RCP 8.5	2015_2039	9,659,929,970.50	100.00%	9,040,149,605.19	93.58%	619,780,363.92
2075_2099	8,789,239,030.69	100.00%		7,557,803,588.47	85.99%	1,230,308,023.25	14.00%		

De manera de referencia en la Tabla 78, se presentan los volúmenes del balance superficial con los registros históricos iniciales, del periodo de 1990-2009.



**Tabla 78. Valores calculados en el balance superficial. Valores expresados en m<sup>3</sup>.**

Año	Precipitación		Evapotranspiración		Excedente	
	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje
1990	9,594,540,659.60	100.00%	8,211,373,900.86	85.58%	1,208,083,168.00	12.59%
1991	8,571,259,169.33	100.00%	7,354,109,505.70	85.80%	1,227,486,597.90	14.32%
1992	9,807,654,791.95	100.00%	8,242,218,881.61	84.04%	1,730,182,562.67	17.64%
1993	10,020,245,302.23	100.00%	7,338,921,051.54	73.24%	2,681,324,250.73	26.76%
1994	7,147,083,911.60	100.00%	6,145,927,658.15	85.99%	972,069,928.08	13.60%
1995	10,365,361,319.35	100.00%	7,438,045,588.75	71.76%	2,866,864,254.88	27.66%
1996	8,501,333,162.47	100.00%	7,615,363,196.67	89.58%	938,433,089.96	11.04%
1997	10,968,170,780.80	100.00%	8,164,863,043.95	74.44%	2,736,730,728.57	24.95%
1998	10,890,885,328.60	100.00%	8,903,012,813.94	81.75%	2,018,547,441.86	18.53%
1999	10,987,087,689.98	100.00%	7,940,460,480.38	72.27%	2,944,348,739.31	26.80%
2000	8,789,466,089.40	100.00%	7,188,137,974.34	81.78%	1,662,751,401.72	18.92%
2001	8,624,897,330.99	100.00%	7,236,380,713.57	83.90%	1,414,933,109.82	16.41%
2002	10,672,311,639.31	100.00%	8,675,804,358.31	81.29%	1,962,320,084.50	18.39%
2003	9,422,562,348.13	100.00%	7,735,602,125.37	82.10%	1,734,191,890.81	18.40%
2004	9,085,433,491.20	100.00%	7,680,194,425.06	84.53%	1,468,073,147.47	16.16%
2005	11,920,389,736.28	100.00%	7,449,143,125.20	62.49%	4,493,829,384.38	37.70%
2006	10,815,732,629.80	100.00%	8,430,474,538.79	77.95%	2,414,333,292.44	22.32%
2007	9,807,959,540.49	100.00%	7,573,655,213.02	77.22%	2,257,642,988.58	23.02%
2008	7,905,166,181.38	100.00%	6,304,101,888.39	79.75%	1,601,064,295.85	20.25%
2009	6,968,052,576.89	100.00%	5,921,944,941.81	84.99%	1,042,575,766.41	14.96%

### Analisis de laminas resultantes

Considerando como el registro historico el periodo analizado en el balance hidrico que comprende el periodo de 1990 a 2009, se presenta a acontinuacion un comparativo de los valores promedio contra los escenarios. En la siguiente tabla se presentan las laminas calculadas en los diferentes escenarios estimados en el estudio

**Tabla 79. Valores calculados en el balance superficial de cada escenario. Valores expresados en metros.**

Proyecciones			Año	Precipitacion	Evapotranspiración	Excedente
				Lamina (m)	Lamina (m)	Lamina (m)
Precipitacion	CM5	RCP 4.5	2015_2039	1.26	1.13	0.13
			2045_2069	1.25	1.12	0.13
			2075_2099	1.30	1.13	0.16



Proyecciones			Año	Precipitación	Evapotranspiración	Excedente
				Lamina (m)	Lamina (m)	Lamina (m)
Precipitación Proyectada	REA	RCP 8.5	2015_2039	1.28	1.14	0.13
			2045_2069	1.26	1.16	0.11
			2075_2099	1.24	1.07	0.11
		RCP 4.5	2015_2039	1.10	1.02	0.09
			2075_2099	1.19	1.07	0.12
			RCP 8.5	2015_2039	1.12	1.05
	2075_2099	1.09		0.95	0.14	
	CM5	RCP 4.5		2015_2039	1.36	1.18
			2045_2069	1.37	1.21	0.16
			2075_2099	1.41	1.21	0.19
		RCP 8.5	2015_2039	1.39	1.20	0.18
			2045_2069	1.37	1.24	0.13
2075_2099			1.35	1.15	0.20	
REA	RCP 4.5	2015_2039	1.31	1.19	0.12	
		2075_2099	1.29	1.17	0.12	
	RCP 8.5	2015_2039	1.29	1.21	0.08	
		2075_2099	1.18	1.01	0.16	
Balance Superficial		Maximo	1.59	1.19	0.60	
		Minimo	0.93	0.79	0.13	
		Promedio	1.28	1.01	0.26	

Realizando un comparativo con los valores promedio de precipitación promedio del periodo de 1990-2009, contra los resultados de los escenarios en sus diferentes horizontes, se observa que en ningún horizonte se estima que se tenga la precipitación mínima histórica, mientras que en nueve escenarios se tienen valores por arriba del promedio; en ningún escenario se presenta una lamina mayor a la histórica. En la siguiente gráfica se presenta las laminas de precipitación acumulada en los diferentes escenarios

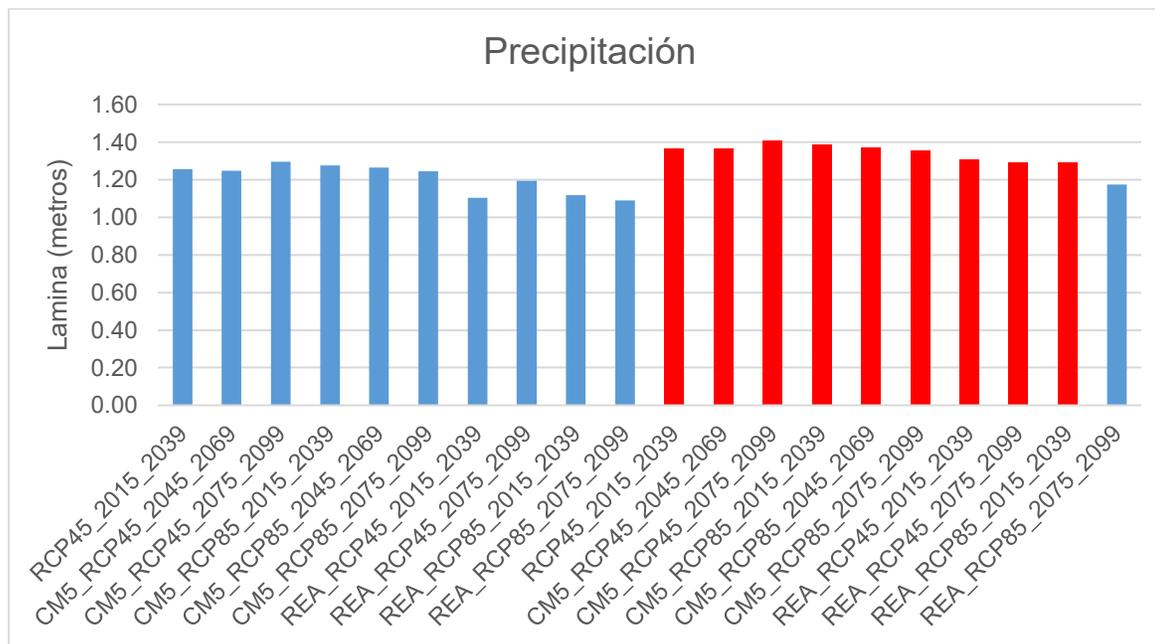


Figura 46. Laminas de precipitación resultantes de cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

En el comparativo de la evapotranspiración efectiva, se observa que todos los escenarios superan el valor mínimo histórico exceptuando el escenario REA\_RCP85\_2075\_2099; mientras que seis escenarios presentan valores de la máxima histórica. En la Figura 47, se presentan las laminas resultantes del balance hídrico.

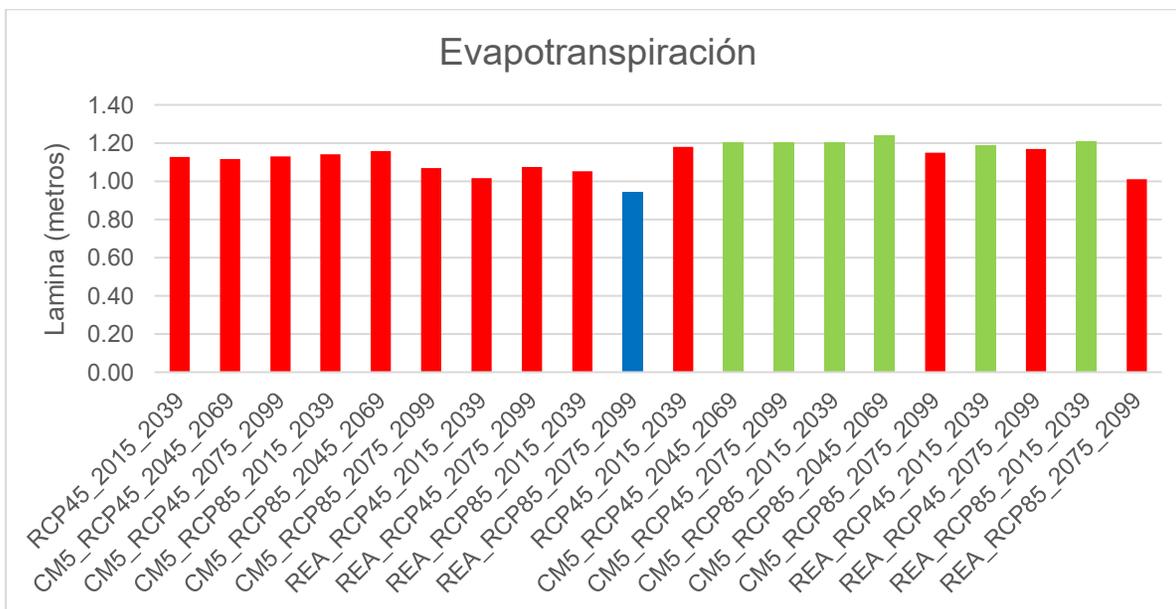


Figura 47. Laminas de precipitación resultantes de cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del excedente, se tiene que ningún escenario presenta valores por arriba del promedio histórico, teniendo siete escenarios que se encuentran por debajo de la mínima histórica siendo el escenario REA\_RCP\_2015\_2039 el que presenta el excedente mas bajo en todos los escenarios. En la Figura 48, se presentan las laminas de Excedente calculadas en los balances hídricos.

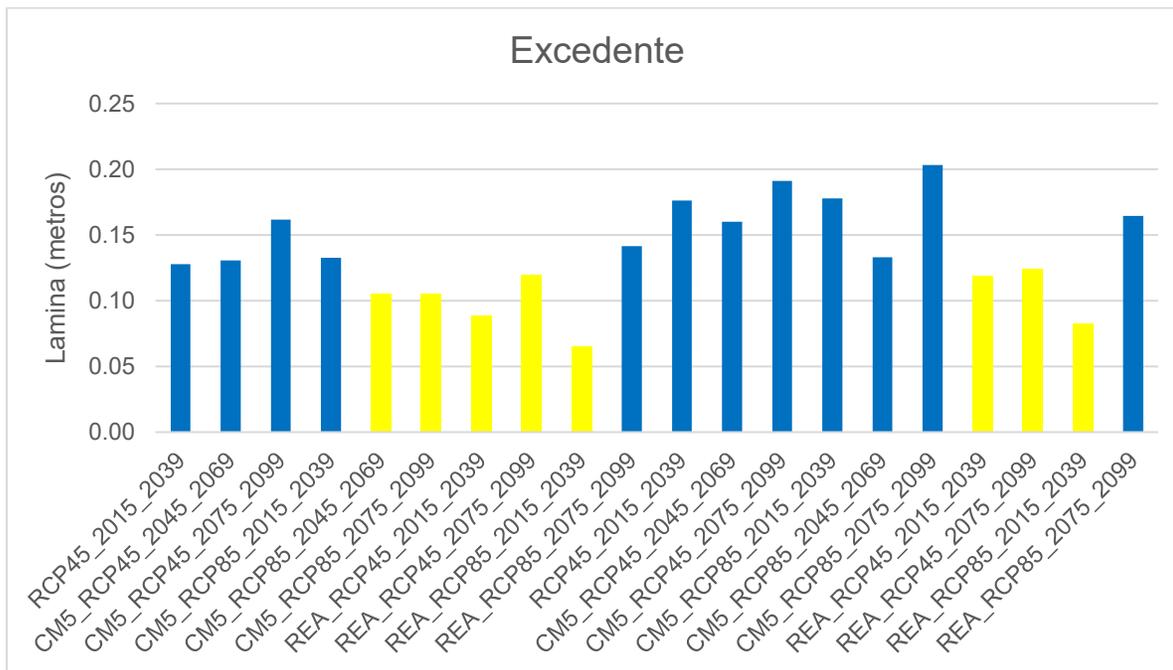


Figura 48. Laminas de precipitación resultantes de cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

### 5.6. Comparación de los volúmenes de recarga

Tomando como base la lamina de recarga promedio de 0.2 m, en el acuífero, se realizó una comparativa del porcentaje de variación entre la recarga calculada en cada horizonte de los dos escenarios de cambio climático y la recarga promedio. En la Tabla 80, se muestran los resultados de cada uno de los horizontes.

Tabla 80. Variación del excedente (recarga directa) comparado con la recarga promedio del acuífero.

Escenario	Excedente	
	Lamina (m)	Porcentaje
Pre_CNRMCM5_RCP 4.5_2015_2039	0.09	43.75%
Pre_CNRMCM5_RCP 4.5_2045_2069	0.11	52.69%
Pre_CNRMCM5_RCP 4.5_2075_2099	0.11	57.40%
Pre_CNRMCM5_RCP 8.5_2015_2039	0.13	63.04%



Escenario	Excedente	
	Lamina (m)	Porcentaje
Pre_CNRMCM5_RCP 8.5_2045_2069	0.14	70.97%
Pre_CNRMCM5_RCP 8.5_2075_2099	0.14	71.83%
Pre_REA_RCP 4.5_2015_2039	0.15	73.45%
Pre_REA_RCP 4.5_2075_2099	0.15	75.09%
Pre_REA_RCP 8.5_2015_2039	0.15	77.38%
Pre_REA_RCP 8.5_2075_2099	0.16	80.27%
%Pre_CNRMCM5_RCP 4.5_2015_2039	0.16	82.32%
%Pre_CNRMCM5_RCP 4.5_2045_2069	0.17	82.89%
%Pre_CNRMCM5_RCP 4.5_2075_2099	0.18	90.77%
%Pre_CNRMCM5_RCP 8.5_2015_2039	0.18	92.34%
%Pre_CNRMCM5_RCP 8.5_2045_2069	0.19	92.82%
%Pre_CNRMCM5_RCP 8.5_2075_2099	0.20	100.03%
%Pre_REA_RCP 4.5_2015_2039	0.21	102.60%
%Pre_REA_RCP 4.5_2075_2099	0.21	102.60%
%Pre_REA_RCP 8.5_2015_2039	0.21	103.18%
%Pre_REA_RCP 8.5_2075_2099	0.23	114.23%

Pre, horizonte utilizando la precipitación proyectada.

%Pre, horizonte utilizando el porcentaje de cambio de la precipitación promedio.

Graficando los volúmenes resultantes del balance superficial de los datos históricos utilizado en el estudio se observa el comportamiento de los volúmenes de agua en diferentes tiempos. En la Figura 49, muestra el comportamiento del balance en el periodo de 1990-2009.

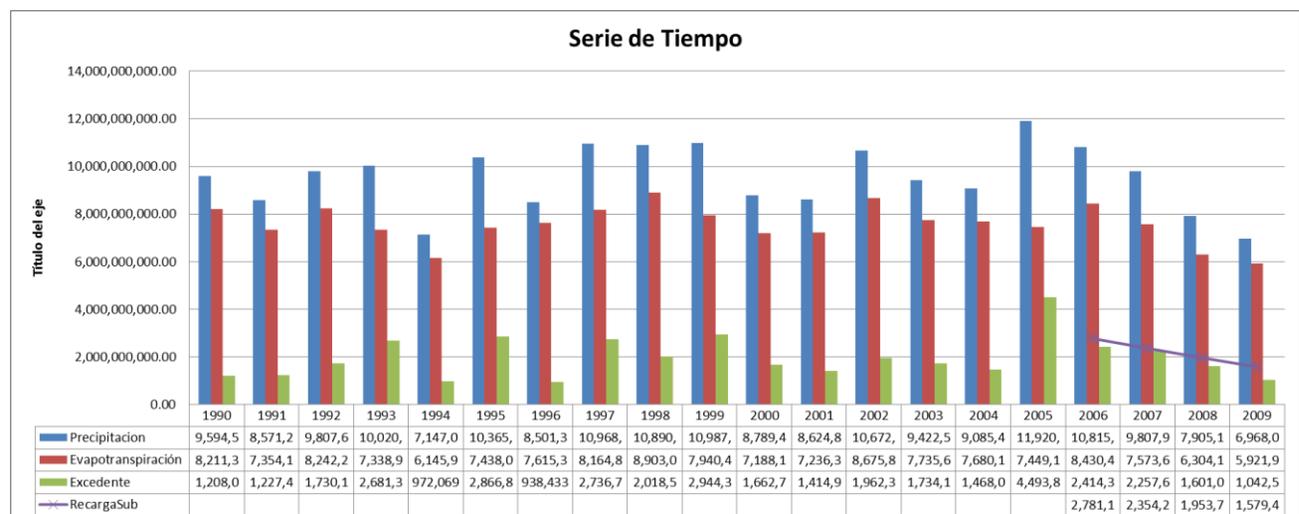
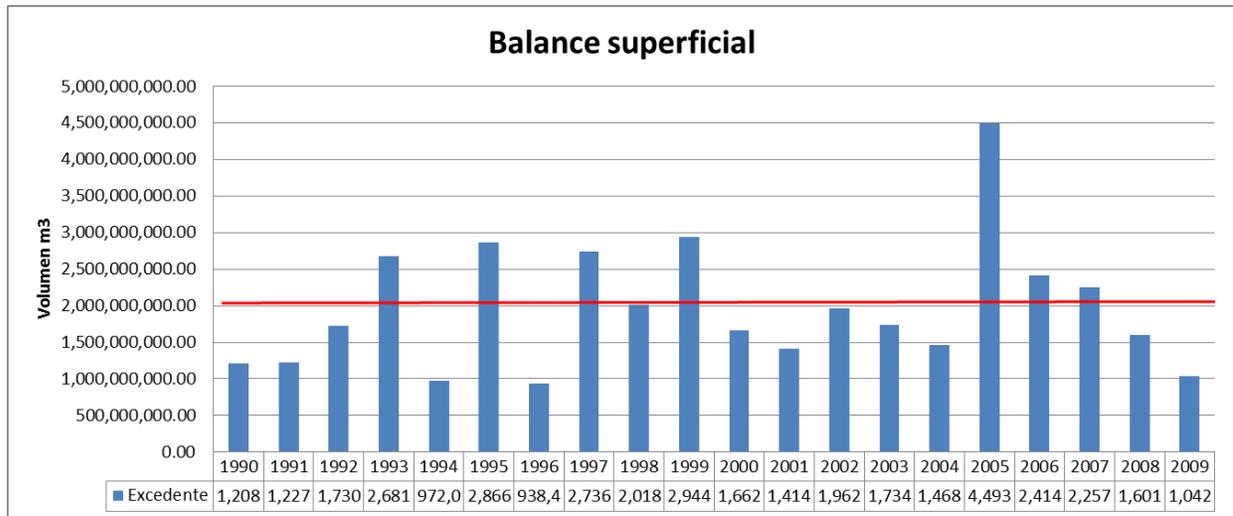


Figura 49. Volúmenes resultantes del balance superficial del periodo 1990-2009. Valores expresados en m<sup>3</sup>.



Como referencia visual de los volúmenes de recarga con los datos históricos analizados, se realizó una gráfica de comparación de los volúmenes de recarga con la recarga promedio del acuífero. En la Figura 50, se muestra los volúmenes de recarga superiores al volumen promedio de la recarga.



**Figura 50. Volumen de excedente (recarga directa) de los datos históricos. Valores expresados en m<sup>3</sup>.**

De la misma manera se realizó la gráfica de los balances subterráneos en cada una de las proyecciones, como línea de referencia se tomó el valor de la recarga promedio, con el fin de visualizar los horizontes que tuvieran volúmenes de recarga superior a la recarga promedio calculada. En la Figura 51, se observa el comportamiento del balance en cada una de las proyecciones climáticas.

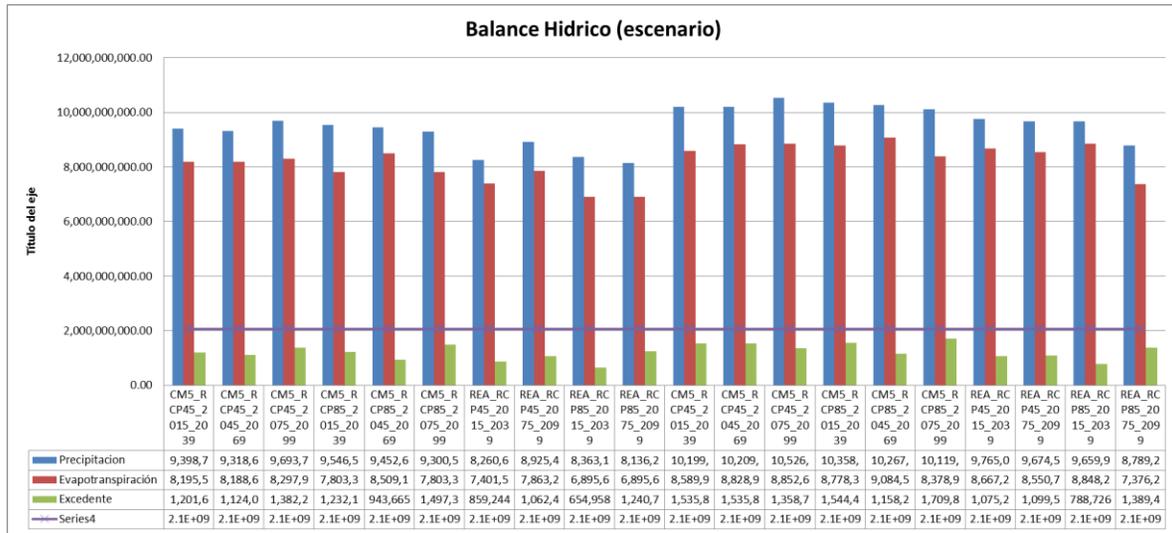


Figura 51. Balance hídrico en las diferentes proyecciones climáticas. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

### 5.6.1. Análisis de los horizontes calculados

Realizado un análisis estadístico básico, se calcularon los valores promedio, máximo, mínimo y mediana de los volúmenes promedio de los registros hídricos. En la Tabla 81, se presentan los valores estadísticos básicos.

Tabla 81. Valores estadísticos básicos de los registros históricos utilizados.

Parámetro	Valor (m <sup>3</sup> )			
	máximo	Promedio	mediana	mínimo
Precipitación	11,920,389,736.28	9,543,279,683.99	9,701,097,725.78	6,968,052,576.89
Evapotranspiración	8,903,012,813.94	7,577,486,771.27	7,594,509,204.84	5,921,944,941.81
Excedente (recarga directa)	4,493,829,384.38	1,968,789,306.20	1,732,187,226.74	938,433,089.96

### Horizonte 2015-2039

Se realizó la comparación de los valores estadísticos históricos con los resultados del balance hídrico en los horizontes proyectados. En la Figura 52, se observan los valores del horizonte 2015-2039, de precipitación que exceden o que se encuentran por debajo de los valores estadísticos.

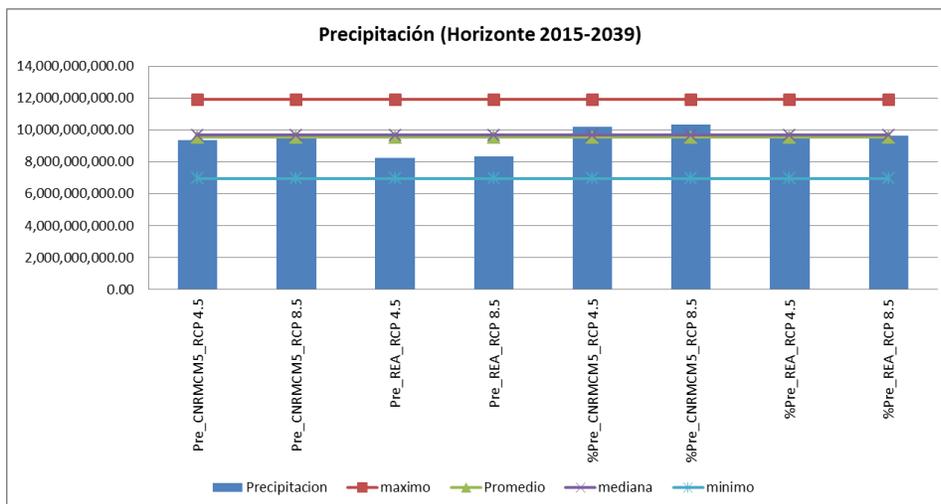


Figura 52. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

En la Figura 53, se presenta la comparación de los volúmenes resultantes de la evapotranspiración en el horizonte 2015-2039 contra los valores estadísticos de los registros históricos.

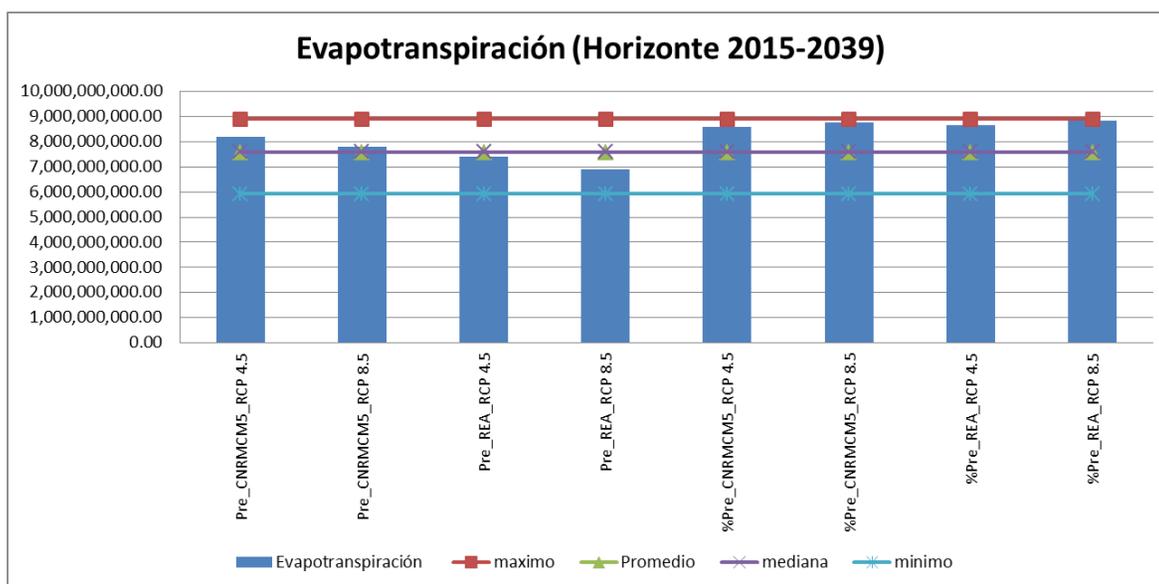


Figura 53. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

En la Figura 54, se muestran la comparación de los volúmenes excedentes del horizonte 2015-2039, comparados con los valores estadísticos históricos.

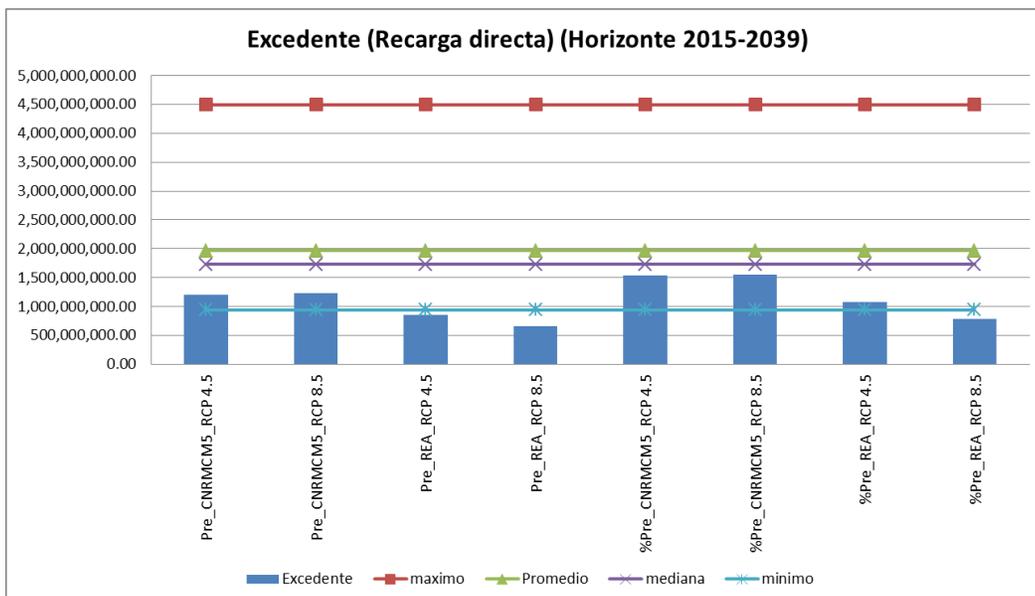


Figura 54. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

### Horizonte 2045-2069

A continuación, se muestran los resultados de la comparación estadística de los registros históricos y los resultados de los volúmenes de la precipitación proyectada en el horizonte 2045-2069. En este horizonte no se contempla el ensamble REA. En la Figura 55, se muestra el comportamiento de los volúmenes de precipitación.

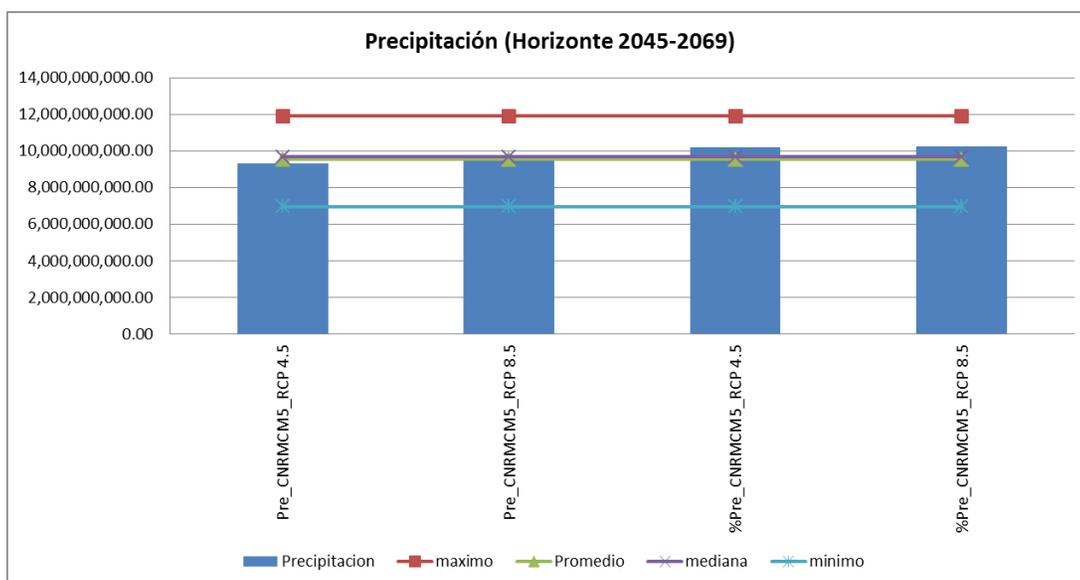


Figura 55. Comparación de la precipitación en el horizonte 2015-2039. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

En la Figura 56, se presenta la comparación de los volúmenes resultantes de la evapotranspiración en el horizonte 2045-2069 contra los valores estadísticos de los registros históricos.

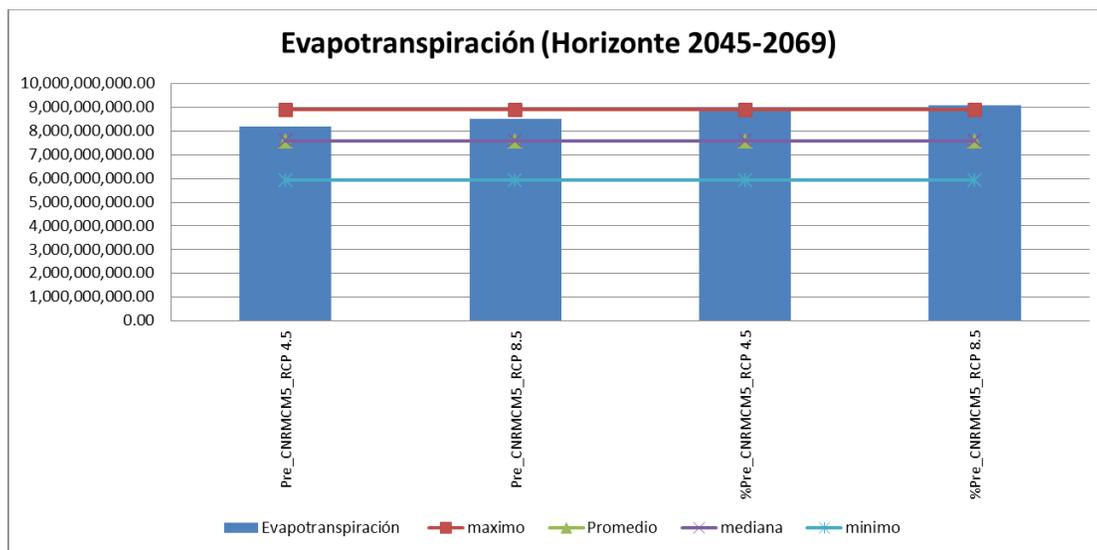


Figura 56. Comparación de la evapotranspiración en el horizonte 2045-2069. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

En la Figura 57, se muestran la comparación de los volúmenes excedentes del horizonte 2015-2039, comparados con los valores estadísticos históricos.

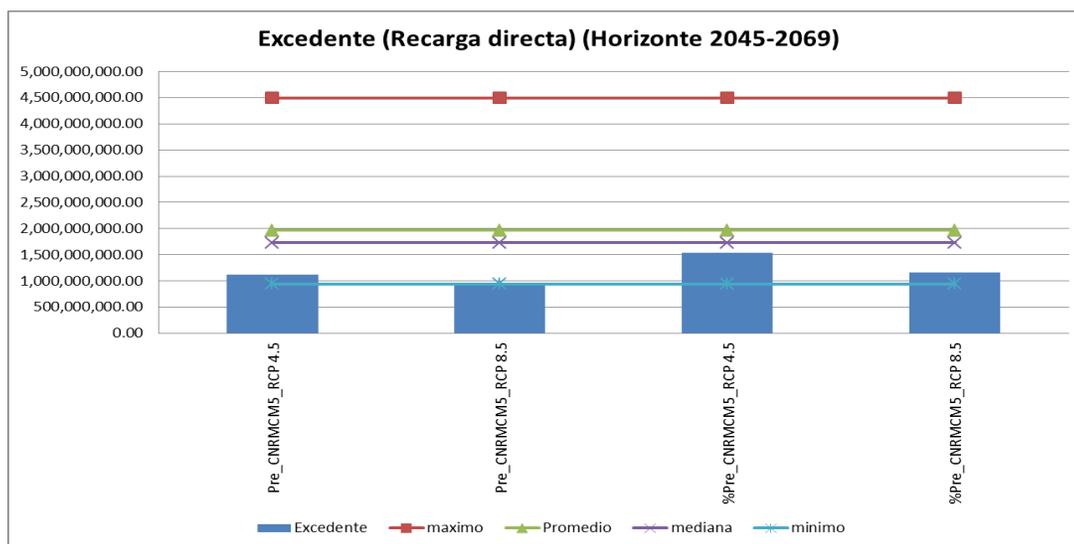


Figura 57. Comparación del excedente (recarga directa) en el horizonte 2045-2069. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

### Horizonte 2075-2099

Por último, se realizó la comparación de los valores estadísticos históricos contra los volúmenes resultantes del horizonte 2075-2099. A continuación, se muestra en la Figura 58, el comportamiento de la precipitación y los valores estadísticos.

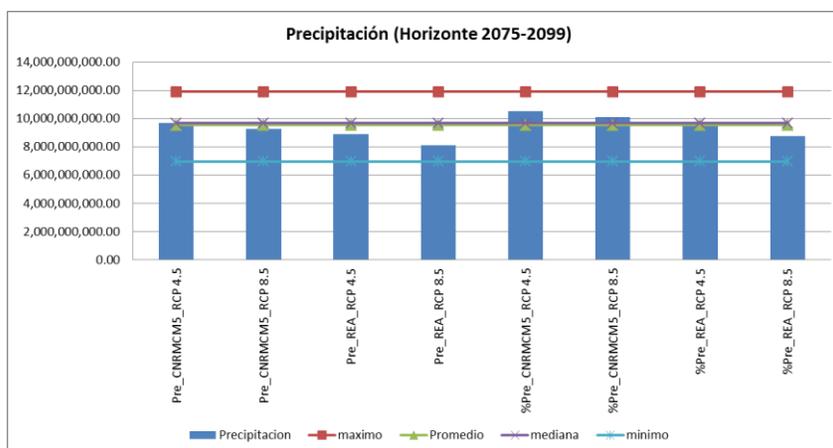


Figura 58. Comparación de la precipitación en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

En la Figura 59, se presenta la comparación de los volúmenes resultantes de la evapotranspiración en el horizonte 2075-2099 contra los valores estadísticos de los registros históricos

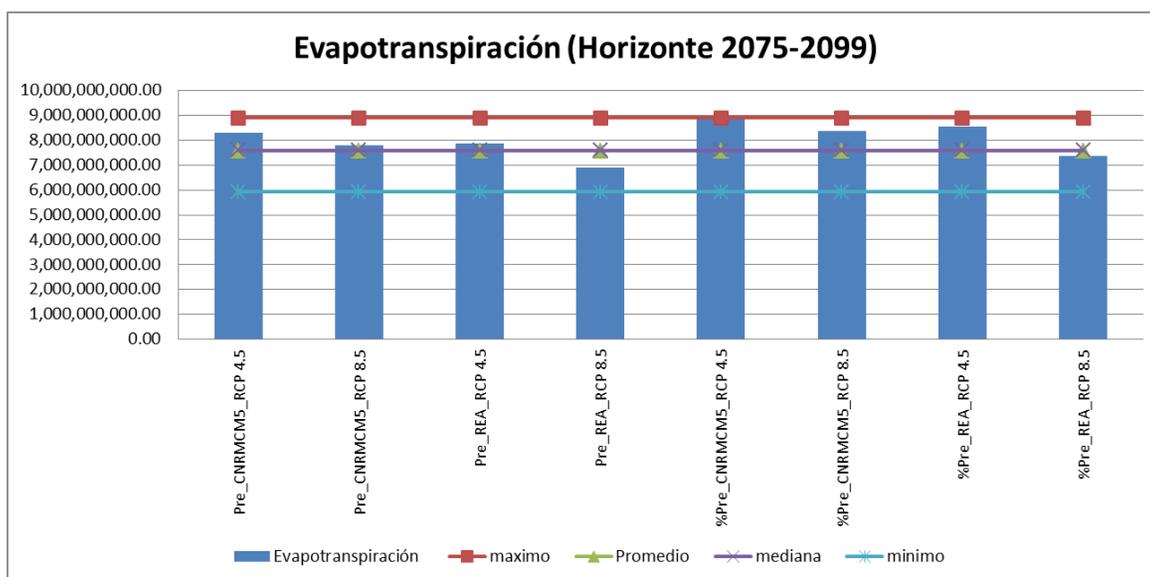


Figura 59. Comparación de la evapotranspiración en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

En la Figura 60, se muestran la comparación de los volúmenes excedentes del horizonte 2075-2099, comparados con los valores estadísticos históricos.

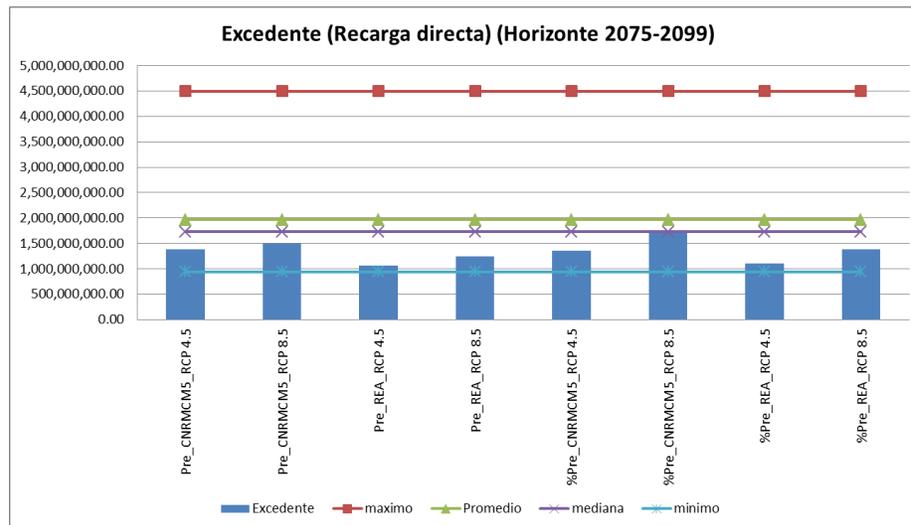


Figura 60. Comparación del excedente (recarga directa) en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en m<sup>3</sup>.

## 5.7. Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados generados en las estaciones climatológicas, la precipitación máxima acumulada, se presenta en la zona oeste del acuífero de estudio. Dicha precipitación se reduce en forma radial en la zona de estudio. La lámina promedio de precipitación que ocurre en el acuífero de 1,280 milímetros, equivalente a un volumen de 9,543,279,683 m<sup>3</sup>. Las láminas máximas se presentaron en los años 1997 y el 2006

Del total de registros históricos analizados, la lámina mínima que ocurre en el acuífero fue de 930 milímetros, equivalentes a un volumen de 6,968,052,576 m<sup>3</sup>, mientras que la máxima es de 1,590 milímetros, equivalentes a 11,920,389,736 m<sup>3</sup>. Teniendo una variación del volumen de 4,952,337,159 m<sup>3</sup>.

La evapotranspiración en el área de estudio se comporta de la siguiente manera; las láminas máximas se presentan en la zona oeste, dichas laminas se van reduciendo en dirección de la costa. Las láminas de evapotranspiración se encuentran en los rangos de los 800 a 1,500 milímetros. Los valores máximos de evapotranspiración máxima se presentan en la estación 31068 (CHANCENOTE, TIZIMIN,), con una lámina de 1,428 milímetros, en dicha estación se presentan valores máximos en los años de 1993, 1997, 2005, 2006 2008.



El excedente (recarga directa), se tienen laminas que oscilan en rangos de 400 a 1,000 milímetros, la zona de menor recarga se registra en la zona sur y la máxima se obtiene en la zona oeste. El valor máximo se presenta en la estación 23155 (CANCUN, BENITO JUAREZ), con una lámina de 1,119.53 milímetros, ocurrida en el año 2005.

Los parámetros resultantes del balance hídrico describen el comportamiento del acuífero de la siguiente manera: del 100% de la precipitación, el 80% regresa a la atmosfera en forma de evapotranspiración y el 20% se tiene como excedente que es considerado como la recarga al acuífero. La evapotranspiración máxima se presentó en el año 1996, mientras que la mínima fue en el año 2005. El excedente máximo se fue en el año 1995 y la mínima en el 1996.

### **Análisis del acuífero**

De acuerdo con la piezometría de la red de monitoreo de Conagua, denominada zona Cancún-Tulum se observa que la profundidad de nivel estático máximo se presenta en el pozo Tres Reyes con registros mayores a los 20 metros, dicho pozo se ubica en la parte suroeste, donde topográficamente se encuentra en la zona de mayor elevación. El pozo ubicado en la zona costera denominado como Pozo 13, Rancho Loma Bonita, presenta niveles cercanos al nivel medio del mar.

La dirección del flujo se comporta de manera radial en dirección del centro del estado hacia la zona costera. En el caso del área de estudio, la dirección se comporta de dirección suroeste, hacia la zona costera.

De acuerdo a los hidrógrafos realizados, comparando la precipitación contra los niveles estáticos, se observa que existe un comportamiento directo entre los niveles estáticos y las laminas de precipitación.

El volumen del flujo de entrada al acuífero tuvo el siguiente comportamiento: durante el año 2006 el volumen fue de 118 millones de  $m^3$ , en el año 2007 de 70 millones de  $m^3$ , en el año 2008 de 73 millones de  $m^3$  y en el año 2009 de 58 millones. El volumen del flujo de salida de 2006 de 579 millones de  $m^3$ , en el año 2007 de 138 millones de  $m^3$ , en el año 2008 de 239 millones de  $m^3$  y en el año 2009 de 214 millones de  $m^3$ .

Referente a la evapotranspiración subterránea, se estimaron los siguientes volúmenes, el año 2006 fue de 2,490 millones de  $m^3$ , en el año 2007 fue de 2,214 millones de  $m^3$ , en el año 2008 fue de 1,667 millones de  $m^3$  y en el año 2009 fue de 1,625 millones de  $m^3$ .

El cálculo del volumen de la recarga subterránea queda estimado en los siguientes rangos: periodo (2006-2007) 2, 591 millones de  $m^3$ , periodo (2007-2008), 2,027 millones de  $m^3$ .



## Escenarios de cambio climático

El análisis de los resultados se hace tomando en cuenta el porcentaje de cambio de precipitación histórica registrada.

Al calcular la evapotranspiración tomando como base los valores del porcentaje de cambio de precipitación históricos, se obtiene que lamina de evapotranspiración máxima se presenta la estación 31068 (CHANCENOTE, TIZIMIN), en todos los horizontes analizados. En el horizonte CNRMCM5\_RCP45\_2075\_2099, la lámina máxima fue de 1,354.33 milímetros. El excedente (recarga directa), se presenta en la estación 23027 (VICTORIA, LAZARO CARDENAS), con una lámina de 482.05 milímetros, en el horizonte REA\_RCP85\_2075\_2099.

### Precipitación estimada

El análisis de los resultados tomando en cuenta la precipitación proyectada, Se calcularon las láminas de evapotranspiración, donde los valores máximos en los diferentes horizontes se presentan en la estación 23155(CANCUN, BENITO JUAREZ), excepto la lámina máxima se presenta en el horizonte CNRMCM5\_RCP85\_2045\_2069, con un valor de 1231.16 milímetros, que se presenta en la estación 23027 (VICTORIA, LAZARO CARDENAS).

El excedente máximo en los escenarios de la proyección de la precipitación se presenta en el escenario CNRMCM5\_RCP45\_2075\_2099, con una lámina de 559.94 milímetros. Representado la estación 23025 (TULUM, SOLIDARIDAD). En dicha estación se presenta las mayores láminas de excedente en diferentes horizontes.

Al realizar la comparación de volúmenes estimados con el balance superficial de los diversos horizontes como se muestra en la Tabla 80, se identifica lo siguiente:

El horizonte Pre\_CNRMCM5\_RCP 4.5\_2015\_2039, presenta el menor volumen de recarga con una lámina promedio de 90 milímetros de la precipitación proyectada, mientras que en el horizonte CM5\_RCP85\_2075\_2099, se tiene la lámina de precipitación promedio de 230 milímetros.

### Horizonte Cercano (2015-2039)

La precipitación presentada en la Figura 52, se muestra que ningún horizonte se encuentra por arriba del volumen máximo histórico, de igual manera en todos los horizontes se encuentran por arriba de los volúmenes mínimos, en este caso los volúmenes mínimos se localizan en los horizontes REA\_RCP85\_2015\_2039, REA\_RCP45\_2015\_2039.

En el caso de la evapotranspiración mostrado en la Figura 53, se tiene que todos los horizontes se encuentran por arriba de los valores promedio históricos, excepto el REA\_RCP85\_2015\_2039 y REA\_RCP45\_2015\_2039. Los horizontes más cercanos a los valores máximos es el horizonte %PRE\_REA\_RCP85.

Para el excedente (recarga directa) mostrado en la Figura 54, se tiene que todos los horizontes se encuentran por debajo del valor promedio histórico, teniendo los horizontes pre\_REA\_RCP 4.5, pre\_REA\_RCP 8.5, %pre\_REA\_RCP 8.5, tienen volúmenes menores a los valores mínimos.



### **Horizonte Medio (2045-2069)**

En el caso de la precipitación como se muestra en la Figura 55, se tiene que todos los horizontes se encuentran por arriba de los valores promedio, aunque ningún horizonte presenta valores máximos históricos, teniendo el volumen máximo en el horizonte %Pre\_CNRMMCM5\_RCP8.5.

En la evapotranspiración mostrada en la Figura, todos los horizontes se encuentran por arriba de los valores promedio históricos y en el caso del horizonte %Pre\_CNRMMCM5\_RCP8.5 se encuentra por arriba del valor máximo.

En el excedente (recarga directa) mostrada en la Figura, se observa que en todos los horizontes se encuentran por debajo de los valores promedio, teniendo el horizonte Pre\_CNRMMCM5\_RCP8.5, que presenta el valor menor al mínimo histórico.

### **Horizonte Lejano (2075-2099)**

En la Figura 58, se observa los volúmenes de precipitación de los horizontes superan el valor mínimo histórico y el horizonte que presenta el menor volumen de precipitación es el Pre\_REA\_RCP8.5.

Los valores de evapotranspiración mostrados en la Figura 59, se encuentran por arriba de la media histórica en donde excepto los horizontes Pre\_REA\_RCP 8.5 y %Pre\_REA\_RCP 8.5. Todos los horizontes se encuentran por arriba del valor mínimo histórico.

En cuanto al excedente (Recarga directa) presentada en la Figura 60. Comparación del excedente (recarga directa) en el horizonte 2075-2099. Valores expresados en  $m^3$ , se tiene que todos los horizontes se encuentran por debajo de la media histórica teniendo el valor más alto en el horizonte %Pre\_\_CNRMMCM5\_RCP8.5.



## 6. ONCLUSIONES

El balance hídrico se realizó de manera puntual en las estaciones climatológicas encontradas en el área de estudio, determinando las láminas de precipitación, evapotranspiración, excedente (Recarga directa). Dicho balance se llevó a cabo utilizando el método Thornthwaite, utilizando los datos de precipitación de cada estación climatológica. Debido a que el acuífero se consideró que no existen aprovechamientos superficiales, (ríos, lagos o manantiales), se considera que el agua que precipita tiene el siguiente comportamiento, al llegar satura suelo donde se lleva a cabo el proceso de evapotranspiración; el excedente de recarga directamente los niveles de agua subterránea en el acuífero.

El tipo de suelo existente en el acuífero funciona como un almacenamiento de agua temporal. El agua que queda retenida en el suelo genera un proceso de recirculación a la atmósfera por medio de la evapotranspiración.

Las láminas de precipitación reportadas en el periodo de 1990 a 2005 no presentan algún comportamiento definido o algún tipo de tendencia. A partir del año 2005 al año 2009 se observa una tendencia decreciente; el año 2005 es el registro máximo de precipitación y el año 2009 es el registro mínimo. Durante el año 2005 se registraron los huracanes "Stan", "Emily" y "Wilma", que impactaron en la zona de estudio, dichos huracanes tuvieron un impacto directo en la precipitación; aunque el presente estudio no realiza un análisis directo de los huracanes impactados en el acuífero, es importante considerarlos como la fuente de dicha precipitación máxima.

Al realizar el cálculo de los volúmenes de entrada y de salida del flujo de agua subterránea en el acuífero, se observa que se tiene un volumen mayor de flujo de salida en comparación de la entrada, lo que se confirma con los volúmenes negativos del cambio de almacenamiento.

El balance subterráneo se determinó considerando que es un acuífero de tipo libre con un espesor homogéneo de 19 metros, así como un coeficiente de almacenamiento constante. De acuerdo a los resultados se observa que el equilibrio se obtiene cuando la recarga muy similar a la evapotranspiración subterránea.

Al tener al acuífero como la fuente más importante de aprovechamiento de agua en la zona de estudio, es importante tener regímenes de extracción en rangos no mayores a la recarga calculada.

De acuerdo a la información recopilada, es necesario implementar una red de monitoreo en el acuífero considerando zonas estratégicas con la infraestructura existente, con el fin de identificar el comportamiento de niveles de agua y los volúmenes de extracción.



## Escenarios de cambio climático

Como parte del estudio se realizó el balance superficial en los escenarios de cambio climático con el fin de poder proyectar los posibles volúmenes de recarga al acuífero en los diferentes horizontes. Utilizando dos escenarios de cambio climático RCP 4.5, RCP 8.5, en el modelo de circulación global CNRMCM5 y del ensamble REA; se obtuvieron un total de 20 diferentes horizontes (2015-2039), (2045-2069) (2075-2099), en cada uno de los cuales se determinó la recarga directa al acuífero.

Los datos espaciales de las proyecciones climáticas utilizadas en el presente estudio fueron utilizados para determinar las láminas de precipitación y temperatura en cada estación climatológica. En el caso de la precipitación se utilizaron los valores proyectados en cada horizonte; con base a los registros históricos se determinó el porcentaje de cambio de la precipitación histórica.

El análisis de la temperatura en los horizontes proyectados nos muestra que el incremento de la temperatura repercute directamente en la evapotranspiración, lo que genera una reducción en las láminas de recarga de agua al acuífero.

La precipitación proyectada y el porcentaje de cambio de la histórica, se encuentra dentro de los registros históricos utilizados en el estudio.

A nivel general, todos los horizontes proyectados presentan una disminución en la recarga directa al acuífero, lo que indica que de acuerdo con las proyecciones realizadas con el método de Thornthwaite, se espera una pérdida en los volúmenes de recarga lo que indicaría como una posible disminución de niveles de agua subterránea.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, Francisco., (1994); Fundamentos De Hidrología De Superficie. México. Limusa
- Back, William, Lesser, Juan Manuel., (1977); El Manejo Del Agua En La Península De Yucatán Aspectos Químicos Y Desarrollo Histórico; SRH, Boletín De Divulgación Técnica
- Barrera, Daniel., (2010); Infiltración. Método Del Frente Abrupto De Mojado De Green Y Ampt; Congreso Internacional De Hidrología De Llanuras
- Batllore Sampedro, Eduardo; Febles Patrón, José Luis., (2002); El Agua Subterránea En El Desarrollo Regional De La Península De Yucatán; Avance Y Perspectiva
- Bautista F., Bautista D., Delgado-Carranza C., (2009); Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications; *Atmósfera*
- Bautista, Francisco y Palacio, Gerardo., (xx); Parte III. Regionalización Edáfica Del Territorio De México, Capítulo 24. Península De Yucatán;
- Bautista, Francisco; Aguilar Duarte, Yameli; Batllori, Eduardo; (2011); Amenazas, Vulnerabilidad Y Riesgo De Contaminación De Las Aguas Subterráneas En La Península De Yucatán; Teoría y Praxis
- Botello, Alfonso V; Villanueva-Fragoso, Susana; Gutiérrez, Jorge; Rojas Galaviz, José Luis., (2010); Vulnerabilidad De Las Zonas Costeras Mexicanas Ante El Cambio Climático; Vulnerabilidad De Las Zonas Costeras Mexicanas Ante El Cambio Climático
- Campos Aranda, D.F. (1998); Proceso del ciclo Hdrológico; UASLP.
- Cervantes Martínez, Adrián., (2007); El Balance Hídrico En Cuerpos De Agua Cársticos De La Península De Yucatán; Teoría y Praxis
- Chavarri Velarde, Eduardo A., (xxx); Clase VIII Infiltración; Universidad Nacional Agraria La Molina
- Chávez Guillen, Ruben; Lara Guerrero, Fernando., (2000); Manuales de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea "conceptos básicos de Hidrogeología" (I parte); Conagua
- Chow, Ven Te.; Maidment, David R., (2000); Hidrología Aplicada. Mcgraw-Hill. Colombia
- Comision Nacional del Agua., (1990); Síntesis De Las Condiciones Geohidrológicas Del Área Cancún-Tulum En El Estado De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua
- Comision Nacional del Agua., (1991); Estudio Piezométrico Y De Calidad Del Agua Subterránea Del Corredor Turístico Cancún-Tulum; Comisión Nacional Del Agua, Gerencia Regional Sureste
- Comision Nacional del Agua., (2002); Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Cerros Y Valles (2301), Estado De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua
- Comision Nacional del Agua., (2002); Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Isla Cozumel (2305), Estado De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua
- Comision Nacional del Agua., (2002); Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Península De Yucatán (3105), Estado De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua



- Comision Nacional del Agua., (2002); Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua En El Acuífero Xpujil (0405), Estado De Campeche; Comisión Nacional del Agua
- Comision Nacional del Agua., (2007); El Sistema Hidrológico De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua
- CONDE, C.; ESTRADA, F.; MARTÍNEZ, B.; SÁNCHEZ, O.; GAY, C., (2011); Regional Climate Change Scenarios For México; *Atmósfera*
- Conde, Cecilia., (2007); México Y El Cambio Climático Global; México Y El Cambio Climático Global
- Embotelladora del Caribe., (1992); Estudios Geohidrológicos Y Análisis Físicoquímico De Los Abastecimiento De Agua De Embotelladora Del Caribe, S.A. De C.V.; Embotelladora del Caribe
- Escolero Fuentes, Oscar A.; Marín Stillman, Luis E.; Rebolledo Vieyra, Mario; Martínez, Victor., (2005); Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta de Xel-Ha y sus alrededores, Estado de Quintana Roo; UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
- Estrada, Francisco; Sánchez, Oscar; Ramírez, Jorge; Zavala, Jorge; Zermeño Díaz, David., (2008); Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional; Centro de Ciencias de la Atmosfera
- Exyco, S.A., (1989); Actividades Geohidrológicas Complementarias En El Área Del Corredor Turístico Cancún –Tulum, Edo De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua
- Exyco, S.A., (1990); Estudio Geohidrológico en el área Cancún-Leona Vicario y en la Isla de Cozumel, Edo. De Quintana Roo; Comisión Nacional del Agua
- Exyco, S.A., (1992); Actualización Del Inventario Y Padrón De Usuarios De Aprovechamientos Hidráulicos Y Descargas De Agua Residuales Del Corredor Turístico Cancún-Tulum-Punta Sam-Isla Mujeres Y Cozumel; Comisión Nacional del Agua
- Fernández Eguiarte, A.; Zavala Hidalgo, J.; Romero Centeno, R.; Conde Álvarez, A. C.; Trejo Vázquez, R.I., (2015); Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR en trámite. Obtenido de: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>
- Georama., (1978); Estudio Geohidrológico De Evaluación Y Censo En El Estado De Quintana Roo, Zona Del Arroyo UCUM; Secretaria De Agricultura Y Recursos Hidráulicos
- GERSE., (1991); Informe De La Actividad De Piezometría Y Toma De Muestras De Agua A Diferentes Profundidades Para La Elaboración De Perfiles De Salinidad En El Corredor Turístico Cancún Tulum, Q. Roo; Comisión Nacional del Agua
- Gondwe, Bibi R.N.; Lerer, Sara; Stisen, Simon; Marín, luis; Rebolledo-Vieyra, Mario; Merediz-Alonso, Gonzalo; Bauer-Gottwein, Peter., (2010); Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing; *Journal of Hydrology*
- Gonzales Hita, Luis; Lara Guerrero, Fernando., (1997); Interacción de las aguas Subterráneas con la Laguna de Nichuté. Q.R.; IMTA



- Granel Castro, Eduardo y González Hita, Luis., (2002); Deterioro De La Calidad De Agua Subterránea Por El Desarrollo Poblacional: Cancún, Q. Roo.; Ingeniería
- Gutiérrez-Aguirre, Martha Angélica; Cervantes-Martínez Adrián (Compiladores); (2008); ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL NORTE DE QUINTANA ROO, MEXICO; Universidad de Quintana Roo (UQROO), Unidad Cozumel
- Hernández-Terrones, Laura; Rebolledo-Vieyra, Mario; Merino-Ibarra, Martin; Soto Melina, Le-Cossec Adrien; Monroy-Ríos, Emiliano., (2011); Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems; Water Air Soil Pollut
- Imbach, Pablo., (2009); ABC del cambio climático en Mesoamérica; CATIE
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., (2002); Estudio Hidrológico Del Estado De Quintana Roo; INEGI
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., (2010); Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Benito Juárez, Quintana Roo; INEGI
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., (2010); Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Isla Mujeres, Quintana Roo; INEGI
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., (2010); Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Lázaro Cárdenas, Quintana Roo; INEGI
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., (2010); Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Solidaridad, Quintana Roo; INEGI
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., (2011); Compendio De Información Geográfica Municipal 2010, Tulum, Quintana Roo; INEGI
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., (2000); Escenarios De Emisiones; IPCC
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., (2000); Glosario De Términos; IPCC
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., (2008); El Cambio Climático Y El Agua; Documento técnico VI del IPCC
- Lesser Y Asociados, S.A., (1984); Proyecto Para La Disposición De Aguas Tratados Excedentes En Cancún, Q.Roo; Fonatur
- Lesser, Juan Manuel., (1976); Resumen Del Estudio Geohidrológico E Hidrológico De La Península De Yucatán; SRH, Boletín de Divulgación Técnica
- Lesser, Juan Manuel; Lesser, Illades; Espinosa Amador, Enrique., (1979); Características Hidrogeoquímicas De Un Acuífero Calcáreo Costero En La Parte Norte De La Península De Yucatán; seminario sobre aprovechamiento y manejo racional de los recursos hidráulicos subterráneos de la península de Yucatán
- Marín Stillman, Luis Ernesto, Pacheco Ávila, Julia Guadalupe; Méndez Ramos, Renan., (2005); Hidrogeología De La Península De Yucatán; El Agua Vista Desde La Academia
- Martínez, Julia; Fernández, Adrian., (2004); Cambio Climático: Una Visión Desde México; Semarnat



Masuelli, Sergio; Barrera, Daniel., (2010); Una extensión del modelo de Gree-Ampt a condiciones de inundación de profundidad variable en llanuras, con solución explícita; Congreso internacional de hidrología de llanuras

Morales López, Judith Adriana., (2007); Estrategia De Manejo Y Conservación De Recursos Hídricos Para La Zona De Influencia Norte De Sian Ka´An; Universidad Autónoma de Querétaro

Muñoz-Carpena, R.; Gowdsh, L., (2005); APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INFILTRACIÓN DE GREEN-AMPT CON REDISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO ENTRE ENCHARCAMIENTOS; Estudios de la Zona No Saturada del Suelo

Muñoz-Colunga, Ana; González, Marisa; Marín Luis., (xx); EXPLOTACIÓN DE ROCA CALIZA POR DEBAJO DEL NIVEL FREÁTICO EN QUINTANA ROO: ¿INDUSTRIA TURÍSTICA O MINERA?;

Ortiz Pérez, Mario Arturo; Méndez Linares, Ana Patricia., (1996); REPERCUSIONES POR ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR EN EL LITORAL DEL GOLFO DE MEXICO; Una Visión XXI

Rebolledo Vieyra, Mario., (2008); HIDROGEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN; Seminario Sobre La Conservación De La Zona Norte De Quintana Roo

**Remeneiras, G. (1972).**,. Tratado de Hidrología Aplicada. Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona

Rocha y asociados S.A., (1980); Servicios De Prospección Y Levantamientos Geológicos Y Geofísicos En La Zona De Lázaro Cárdenas, Quintana Roo; dirección general de programas de infraestructura hidráulica

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos., (1996); Informe Geohidrológico Estado De Yucatán; Secretaria De Agricultura Y Recursos Hidráulicos

Secretaría de Recursos Hidráulicos., (1990); Sinopsis Geohidrológica Del Estado De Quintana Roo; Secretaria De Agricultura Y Recursos Hidráulicos

Servicio Geológico Mexicano., (1996); Carta Geológico Minera Cancún F16-8;

Servicio Geológico Mexicano., (1996); Carta Geológico Minera Chetumal E16-4-7;

Sokolov, A.A.; Chapman, T.G., (1981); Métodos De Cálculo Del Balance Hídrico. Instituto De Hidrología De España/Unesco. España

civergrafia:

[http://www.cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/entidades/div\\_municipal/qroompioscolor.pdf](http://www.cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/entidades/div_municipal/qroompioscolor.pdf)

<http://atlasclimatico.unam.mx>

<http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>

<http://escenarios.inecc.gob.mx/>

<https://smn.conagua.gob.mx/es/>

<https://www.inegi.org.mx/>

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

<https://www.gob.mx/conagua>

