



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CUENCA DEL RÍO YAQUI Y SU IMPACTO EN EL SISTEMA ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI, SONORA, MÉXICO

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

ELIA MARÍA TAPIA VILLASEÑOR

Hermosillo, Sonora, Marzo de 2013

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la colaboración de muchas personas e instituciones a las cuales quisiera expresar mi más amplio agradecimiento.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme aceptado como becario con número de registro 237819 en el plan de Maestría en Ciencias-Geología, durante el período de Enero de 2010 a Diciembre de 2012.

Agradezco al Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI), y al Grupo de Trabajo de Modelación Climática Acoplada (WGCM), por su rol al publicar la base de datos de la fase 3 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP).

Agradezco con mucho cariño a mis maestros Ismael Minjarez Sosa y Alejandra Montijo González por su apoyo incondicional, tomando el rol de guías, mentores y amigos. Por preocuparse por sus alumnos como un padre que se preocupa por sus hijos.

Al M.C. Carlos Minjarez Sosa, por aceptar la responsabilidad de ser parte de este trabajo, así como del jurado.

Al Dr. Inocente Guadalupe Espinoza, por el tiempo y esfuerzo dedicado a este trabajo.

Al Dr. Miguel Rangel Medina, por compartir sus amplios conocimientos relacionados con el tema.

A la Dra. Tereza Cavazos Pérez y a la M.C. Sarahí Arriaga Ramírez, por las asesorías y recomendaciones brindadas durante los inicios de esta investigación de tesis.

A la Universidad de Sonora, en especial al Departamento de Geología y a la División de Ciencias Exactas y Naturales por el apoyo y financiamiento en becas y congresos relacionados con el tema, importantes para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeras de oficina, Ari Orduño, Rocío Jacobo y Lourdes García. A Francisco Cuen y Vicente Obregón, por las asesorías técnicas que hicieron posible este trabajo. A mis amigas y colegas de ERAH S.C., Laura Ramírez, Samantha Cireth y Alba Ramírez, por el apoyo recibido durante el tiempo que estuve estudiando.

A todos los que apoyaron en el proceso de edición, gracias.

A mis queridos padres, que han sido ejemplo de superación y perseverancia.



CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1. Estudios previos	3
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivos generales	5
1.2.2. Objetivos particulares	5
2. Metodología	6
2.1. Selección del área de estudio	6
2.2. Recopilación de información existente	8
2.2.1. Series históricas de precipitación y temperatura	8
2.2.2. Escenarios de cambio climático del proyecto CMIP3	10
2.2.3. Régimen de almacenamiento en presas	10
2.2.4. Geología, hipsometría y geomorfología.....	11
2.2.5. Parámetros físicos y químicos	11
2.2.6. Altura de mareas y olas	11
2.3. Selección del modelo de cambio climático	12
2.4. Proyección de escenarios de cambio climático	14
2.5. Impacto del cambio climático en la recarga del acuífero	14
2.6. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar.....	16
2.7. Vulnerabilidad a la intrusión marina	18
3. Generalidades.....	19
3.1. Fisiografía.....	19
3.2. Climatología	20
3.3. Hipsometría	21
3.4. Geología.....	25
3.4.1. Estratigrafía	25
3.4.2. Geología estructural	29
3.5. Geomorfología.....	32
3.6. Hidrografía.....	35
4. Modelos de Circulación Global (MCG)	39



4.1. Simulaciones de los Modelos de Circulación Global (MCG)	41
4.2. Descripción de los Modelos de Circulación Global (MCG)	39
4.3. Características de los Modelos de Circulación Global.....	41
5. Validación de los tres MCG y para el Cambio Climático en la Cuenca del Río Yaqui.....	46
5.1. Análisis hidroclimatológico histórico	46
5.1.1. Precipitación media anual.....	46
5.1.2. Temperatura media anual.....	53
5.1.3. Evaporación real media anual	56
5.2. Validación mensual de los modelos de circulación global	58
6. Proyección de cambio climático para la cuenca del Río Yaqui	61
6.1. Escenarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración	61
6.2. Escenarios de escurrimiento	74
7. Impacto de las proyecciones de cambio climático en la recarga Sistema Acuífero Valle del Yaqui.....	79
7.1. Calculo de recarga	79
8. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en el Sistema Acuífero Valle del Yaqui.....	82
8.1. Criterio de Gornitz para la determinación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar.	83
8.2. Evaluación de los componentes de la base de datos.....	84
8.2.1. Valores de altitud representados por mapas topográficos.....	84
8.2.2. Cambio del nivel del mar	84
8.2.3. Geología	84
8.2.4. Geomorfología	84
8.2.5. Desplazamiento de la línea de costa	84
8.2.6. Olas	84
8.2.7. Rango de Marea	85
8.3. Resultados del criterio de Gornitz para el acuífero Valle del Yaqui.....	85
9. Vulnerabilidad a la intrusión salina en el Sistema Acuífero Valle del Yaqui	94
9.1. Índice GALDIT para el acuífero Valle del Yaqui	94
9.2. Evaluación de los componentes de la base de datos.....	95
9.2.1. Tipo de Acuífero (G).....	95
9.2.2. Conductividad Hidráulica del Acuífero (A)	95
9.2.3. Nivel de agua subterránea sobre el mar (L)	95
9.2.4. Distancia Tierra Adentro Perpendicular a la Costa (D).....	96



9.2.5. Impacto existente de la intrusión marina (I) 96

9.2.6. Espesor del Acuífero (T)..... 96

9.3. Resultados del índice GALDIT para determinar la vulnerabilidad a la intrusión salina..... 104

10. Conclusiones 104

11. Bibliografía..... 106

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Estaciones Climatológicas Analizadas 9

Tabla 2.2 Valores del SPI..... 13

Tabla 2.3 Rango de los componentes del índice de vulnerabilidad costera..... 17

Tabla 2.4 Parámetros del método GALDIT. 18

Tabla 4.1 Modelos Climáticos Globales Empleados en el AR4-IPCC (Base de Datos CMIP3) 44

Tabla 4.2 Características de los Modelos Climáticos Globales Seleccionados (Base de Datos CMIP3) 45

Tabla 5.1 Precipitación media total para la subcuenca La Angostura..... 48

Tabla 5.2 Precipitación media total para la subcuenca El Novillo 49

Tabla 5.3 Precipitación media total para la subcuenca El Oviachic 51

Tabla 5.4 Temperatura media anual en la Subcuenca La Angostura..... 53

Tabla 5.5 Temperatura media anual en la Subcuenca El Novillo..... 53

Tabla 5.6 Temperatura media anual en la Subcuenca El Oviachic..... 53

Tabla 5.7 Coeficiente de Correlación de Pearson por Modelo de Circulación Global 59

Tabla 6.1 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca Angostura utilizando el MCG UKMO-HADCM3-B1 62

Tabla 6.2 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca El Novillo utilizando el MCG UKMO-HADCM3-B1 63

Tabla 6.3 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca El Oviachic utilizando el MCG UKMO-HADCM3-B1 64

Tabla 6.4 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca La Angostura utilizando el MCG UKMO-HADCM3-A2 64

Tabla 6.5 Precipitación, temperatura y evapotranspiración para la subcuenca El Novillo utilizando el MCG UKMO-HADCM3-A2 68

Tabla 6.6 Precipitación, temperatura y evapotranspiración para la subcuenca El Oviachic utilizando el MCG UKMO-HADCM3-A2..... 68



Tabla 6.7 Deducciones y Requerimientos en el Sistema de Presas del Río Yaqui..... 75

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 5.1 Precipitación media total para la subcuenca La Angostura	48
Gráfica 5.2 SPI al mes de Diciembre de 2010 para la Subcuenca La Angostura	49
Gráfica 5.3 Precipitación media total para la subcuenca El Novillo.....	50
Gráfica 5.4 SPI al mes de Diciembre de 2010 para la Subcuenca El Novillo	50
Gráfica 5.5 Precipitación media total para la subcuenca El Oviachic.....	52
Gráfica 5.6 SPI al mes de Diciembre de 2010 para la Subcuenca El Oviachic.....	52
Gráfica 5.7 Temperatura media anual para la subcuenca La Angostura	53
Gráfica 5.8 Temperatura media anual para la subcuenca El Novillo.....	54
Gráfica 5.9 Temperatura media anual para la subcuenca El Oviachic.....	56
Gráfica 5.10 Precipitación y evapotranspiración real anual para la subcuenca La Angostura	57
Gráfica 5.11 Precipitación y evapotranspiración real anual para la subcuenca El Novillo.....	57
Gráfica 5.12 Precipitación y evapotranspiración real anual para la subcuenca El Oviachic.....	58
Gráfica 6.1 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca La Angostura-SRES B1	65
Gráfica 6.2 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Novillo-SRES B1	65
Gráfica 6.3 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Oviachic-SRES B1	65
Gráfica 6.4 Coeficiente de Variación para Precipitación-SRES B1	66
Gráfica 6.5 Coeficiente de Variación para Temperatura-SRES B1	66
Gráfica 6.6 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca La Angostura-SRES A2.....	70
Gráfica 6.7 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Novillo-SRES A2	70
Gráfica 6.8 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Oviachic-SRES A2.....	70
Gráfica 6.9 Coeficiente de Variación para Precipitación (UKMO-HADCM3-A2)	71
Gráfica 6.10 Coeficiente de Variación para Temperatura (UKMO-HADCM3-A2)	71
Gráfica 6.11 Precipitación Proyectada (UKMO-HADCM3-A2) vs. umbrales de sequía para período de observación (1965-2010) en la Subcuenca La Angostura	72
Gráfica 6.12 Precipitación Proyectada (UKMO-HADCM3-A2) vs. umbrales de sequía para período de observación (1965-2010) en la Subcuenca El Novillo.....	73
Gráfica 6.13 Precipitación Proyectada (UKMO-HADCM3-A2) vs. umbrales de sequía para período de observación (1965-2010) en la Subcuenca El Oviachic.....	73
Gráfica 6.14 Proyecciones de escorrentía para las subcuencas La Angostura, El Oviachic y El Novillo....	76



Gráfica 6.15 Almacenamiento proyectado para la presa el Oviachic	77
Gráfica 6.16 Almacenamiento histórico en la Presa el Oviachic 1965-2010	77
Gráfica 7.1 Volumen Disponible para Riego	80
Gráfica 7.2 Cambio de Almacenamiento en la Presa El Oviachic	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Localización	7
Figura 3.1 Fisiografía	22
Figura 3.2 Climatología	22
Figura 3.3 Hipsometría.....	24
Figura 3.4 Geología.....	30
Figura 3.5 Columna Estratigráfica.....	31
Figura 3.6 Geomorfología	34
Figura 3.7 Hidrografía en el Sistema Acuífero Valle del Yaqui.....	36
Figura 3.8 Hidrografía en la Cuenca del Río Yaqui.....	37
Figura 4.1 Escenarios de Emisiones según Reporte Especial (IPCC-SRES 2000) para el IPCC	40
Figura 4.2 Esquema del Desarrollo de los Posibles Forzantes según el Escenario Considerado	40
Figura 4.3 Componentes de los Modelos Climáticos Globales (Tomado de Acevedo, 2009)	42
Figura 4.4 Ejemplo de discretización espacial de un Modelo de Circulación Global (Castro, 2007)	43
Figura 5.1 Estaciones Climatológicas y Polígonos de Thiessen	47
Figura 5.2 Grid de Validación para el Noroeste de México. a) Información climatológica histórica proveniente de las estaciones de CONAGUA. b) Información climatológica histórica proveniente de la base de datos CMIP3 (2°). c) Información climatológica histórica pro.....	60
Figura 6.1 Interfaz gráfica para las proyecciones de escorrentía de la Cuenca del Río Yaqui	75
Figura 8.1 Aumento del nivel del mar (m) en el próximo siglo de acuerdo a la IPCC.....	82
Figura 8.2 Factor A1.....	86
Figura 8.3 Factor A2.....	87
Figura 8.4 Factor A3.....	87
Figura 8.5 Factor A4.....	89
Figura 8.6 Factor A5.....	87



Figura 8.7 Factor A6.....	91
Figura 8.8 Factor A7.....	101
Figura 8.9 Vulnerabilidad al Ascenso del Nivel del Mar de acuerdo con el Criterio de Gornitz	93
Figura 9.1 Equilibrio agua dulce-agua salada	94
Figura 9.2 Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación	95
Figura 9.3 Parámetro G, Sistema Acuífero Valle del Yaqui.....	97
Figura 9.4 Parámetro A, Sistema Acuífero Valle del Yaqui	98
Figura 9.5 Parámetro L, Sistema Acuífero Valle del Yaqui	98
Figura 9.6 Parámetro D, Sistema Acuífero Valle del Yaqui.....	100
Figura 9.7 Parámetro I, Sistema Acuífero Valle del Yaqui	98
Figura 9.8 Parámetro T, Sistema Acuífero Valle del Yaqui	102
Figura 9.9 Índice GALDIT para la evaluación de vulnerabilidad intrínseca por intrusión salina, Sistema Acuífero Valle del Yaqui.....	103



RESUMEN

De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2008), los recursos de agua dulce son vulnerables y podrían resultar gravemente afectados por el cambio climático, con diversas consecuencias para las sociedades humanas y los ecosistemas.

Este trabajo es de relevancia social, ecológica y económica, por ser el área de estudio una de las zonas agrícolas más importantes de la República Mexicana, lo que resalta la necesidad e importancia de llevarlo a cabo.

Se analizaron los posibles efectos del cambio climático, de acuerdo con las proyecciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático y los Modelos de Circulación Global del Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP3); además de identificar las zonas vulnerables al ascenso del nivel del mar y a la intrusión salina.

Después de llevar a cabo un proceso de validación, en donde se compararon los resultados de tres modelos de circulación a baja escala (12 km de resolución): MIROC3_2_MEDRES de Japón, UKMO-HADCM3 de Gran Bretaña y MPI-ECHAM5 de Alemania, con respecto a la información histórica del área de estudio para los años de 1965 a 2010, se seleccionaron las proyecciones de Gran Bretaña para presentar los escenarios de cambio climático en el área de estudio hasta 2099.

Se utilizaron escenarios A2 y B1, para altas y bajas emisiones de gases de efecto invernadero respectivamente, lo que generó los siguientes resultados:

De acuerdo con el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para el período histórico de 1965 a 2010, se identificaron períodos de sequía extrema y excepcional para el escenario A2 (menos favorable) alternados con períodos donde la precipitación supera dos desviaciones estándar con respecto a la media histórica. Se determinó el coeficiente de variación para precipitación y temperatura en La Angostura, El Oviachic y el Novillo, durante el período de observación de 1965 a 2010, en contraste con las proyecciones de cambio climático hasta 2099, obteniendo rangos de variación que van del 16% al 25% en La Angostura, del 18% al 26% en el Novillo y del 14 al 22% en el Oviachic. En lo que respecta a la temperatura, se identifican variaciones que van del 2.7% al 6.4% en La Angostura, del 1.7% al 5.6% en el Novillo y del 2.4 al 3.8% en el Oviachic.



El Escenario B1 (favorable) describe un comportamiento semejante al A2, con ligeros incrementos en precipitación media anual, y un coeficiente de variación que haciende de 16% a 20% en la subcuenca La Angostura, de 17 a 24% en El Novillo y de 8 a 14% en el Oviachic. La temperatura media anual en la Angostura y en El Oviachic será un grado centígrado menor en el escenario B1.

Se calculó el coeficiente de escurrimiento histórico para cada una las subcuencas de estudio de acuerdo con los registros de precipitación y de almacenamiento en presas, dando como resultado un coeficiente de 0.08 para La Angostura, 0.03 para El Oviachic, y 0.10 para El Novillo.

El escurrimiento en el área de estudio presenta variaciones producidas por los cambios de precipitación y temperatura en la zona, sin embargo, las proyecciones de recarga indican que utilizar políticas de transferencia adecuadas, el agua será suficiente para cubrir los requerimientos anuales de ciudad Obregón, Colonias Yaquis, los Pueblos Ribereños y el Distrito de Riego del Río Yaqui.

Con base al análisis de los escenarios de cambio climático y su impacto vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en el área de estudio, se obtuvieron los siguientes resultados: Para vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar varían desde Muy Alta a Muy Baja, predominando la vulnerabilidad Muy Alta en toda la zona, debido principalmente a la topografía y las características litológicas.

En lo que respecta a la vulnerabilidad a la intrusión marina, el Sistema Acuífero Valle del Yaqui presenta una vulnerabilidad baja a moderada a la intrusión salina. El índice GALDIT, arrojó una vulnerabilidad muy baja a pesar de que sus parámetros mostraban valores elevados, resultado que podría deberse al número de factores analizados y al algoritmo utilizado.

Se espera que este documento sirva como un compendio de información acerca de los efectos del cambio climático para el Sistema Acuífero Valle del Yaqui y que las metodologías utilizadas sean aplicadas en las zonas que se encuentran actualmente vulnerables al cambio global, con el objetivo de que se tomen las medidas necesarias para salvaguardar el recurso hídrico.



1. INTRODUCCIÓN

Desde el principio de los tiempos, el hombre ha estado ligado a las condiciones climáticas de su entorno físico. El clima modela hábitos y rasgos culturales, modifica creencias y estructuras jerárquicas de sociedades, determina procesos de expansión y contracción de población, de nomadismo y sedentarismo. Omitir esta realidad creyendo en la perpetuidad de las condiciones de equilibrio climático que conocemos y en las que hemos vivido por mucho tiempo, solo traerá consecuencias adversas para la sociedad y los ecosistemas; de allí la importancia de analizar los posibles efectos del cambio climático.

Si ahondamos un poco en la historia de la Tierra encontraremos una continua sucesión de cambios, caracterizados por la superposición progresiva de unas condiciones de equilibrio sobre otras, en períodos de miles de años, millones de años e incluso cientos y miles de millones de años, en los que se han manifestado intercalaciones entre épocas cálidas y glaciares.

Está documentado que a partir de 1860 con la finalización de la pequeña edad de hielo, entramos en un período de calentamiento (aunque han existido períodos cortos de enfriamiento) que aún hoy persiste y probablemente se extenderá.

Con este estudio se pretende presentar un panorama general de los efectos que tendrían los cambios en precipitación y temperatura dentro del sistema acuífero Valle del Yaqui, que incluyen la modificación de los patrones de evapotranspiración, escorrentía e infiltración, así como la salinización y ocurrencia de inundaciones debido al incremento del nivel del mar.

Las condiciones de equilibrio que han sido relativamente constantes en el tiempo y en el espacio durante períodos apreciables, determinan lo que conocemos como clima. El clima está relacionado con el concepto de permanencia y tiene como objeto el análisis de procesos atmosféricos en torno a sus valores promedios por medio de la evaluación de normales climatológicas para largos períodos de tiempo.

El clima presenta fluctuaciones a escalas relativamente cortas conocidas como variabilidad climática, asociada con el registro de datos por encima o por debajo de las normales climatológicas. La diferencia registrada entre la variable analizada con respecto a la normal climatológica se conoce como anomalía.



Las escalas temporales más significativas en que se presenta este tipo de variación están dadas en orden mensual, estacional, anual, decadal e incluso intervalos mayores, presentando fenómenos asociados para cada uno.

Los fenómenos asociados a las escalas temporales señaladas están caracterizados, a su vez, por fenómenos de tiempo atmosféricos de diferentes dimensiones espaciales y grados de intensidad que impactan de forma significativa el desarrollo de las actividades del ser humano. Forman parte de la fluctuación normal del clima y por si solos no constituyen, por muy extremos que sean, fundamento válido para hablar de cambio climático. Solo cuando las anomalías obedecen a una tendencia de largo plazo (30 años o más) y se modifican los patrones normales, podemos hablar de cambio climático, aunque a veces con cierto maquillaje propagandístico, y en diferentes vías, se nos intenta confundir.

La complejidad de este fenómeno y sus múltiples interacciones ha motivado una movilización sin precedentes en la comunidad internacional, que espera enfrentar el problema y sus consecuencias por medio de investigaciones y estudios específicos. Es así como la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon en 1988 el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) con el objetivo de ofrecer a la comunidad mundial información científica, técnica y socioeconómica relevante para la comprensión de los elementos relativos al cambio climático de origen antropogénico, sus repercusiones, riesgos y sus posibilidades de atenuación y adaptación.

Se decide llevar a cabo el estudio “Escenarios de Cambio Climático para la Cuenca del Río Yaqui y su Impacto en el Sistema Acuífero Valle del Yaqui, Sonora, México”; con el objetivo de abordar las posibles consecuencias del cambio climático en una de las cuencas más importantes del estado de Sonora, cuya escorrentía irriga una de las principales regiones agrícolas de la República Mexicana, que por más de 5 décadas se ha ubicado dentro de las principales regiones productoras de trigo y algodón.

El análisis y evaluación de escenarios futuros, así como la determinación de zonas vulnerables, aun cuando implique cierto grado de incertidumbre, permitiría una detección temprana y oportuna de temas clave y prioritarios para concentrar los esfuerzos de investigación, adaptación y mitigación (Puche, 2007).



1.1. Estudios previos

Entre las funciones del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático está la de publicar informes relevantes al cambio climático que representan un set de información científica que sirvió como base para la generación de este estudio y que incluye las siguientes publicaciones:

- Primer informe de evaluación (SAR): Publicado en 1990, confirma los elementos científicos que suscitan preocupación acerca del cambio climático. A raíz de ello, la Asamblea General de las Naciones Unidas decidió preparar una Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), que entró en vigor en 1994.
- Informe complementario de 1992: Presentado en Río de Janeiro durante la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, logró aprobar la Convención Marco sobre el Cambio Climático para tratar de estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero a un nivel aceptable.
- Segundo informe de evaluación (SAR): Titulado "Cambio climático 1995", se puso a disposición de la Segunda Conferencia de las Partes en la CMCC, y proporcionó material para las negociaciones del Protocolo de Kioto derivado de la Convención.
- Tercer informe de evaluación (TAR): Titulado "Cambio climático 2001", consta también de tres informes de grupos de trabajo sobre "La base científica", "Efectos, adaptación y vulnerabilidad", y "Mitigación", así como un Informe de síntesis en el que se abordan diversas cuestiones científicas y técnicas útiles para el diseño de políticas.
- Cuarto informe de evaluación (AR4): Este informe fue de extrema importancia para el desarrollo de esta tesis, pues en él se publicaron las simulaciones de precipitación y temperatura producidas por los grupos de modelación líderes del mundo (Wood et al. 2002, Wood et al. 2004, and Maurer 2007), que permitieron determinar algunos de los efectos del cambio climático en el sistema acuífero Valle del Yaqui.
- Cambio Climático 2007 Impacto Adaptación y Vulnerabilidad: Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC. Ofrece la evaluación científica completa y actual del impacto del cambio climático, la vulnerabilidad de los entornos natural y humano y el potencial de respuesta mediante la adaptación.
- El Cambio Climático y el Agua: Documento técnico VI del IPCC publicado en 2008 bajo la dirección de la Unidad Técnica de Apoyo del Grupo de Trabajo II. En dicho documento se examina la relación entre el cambio climático y los recursos de agua dulce, haciendo énfasis en los problemas relacionados con los recursos hídricos, que



incluyen falta de agua, exceso de agua y polución. Al dar a conocer las posibles implicaciones del cambio climático y las fuentes de agua dulce, representa una razón más para llevar a cabo el presente estudio.

Además de las publicaciones del IPCC, se hace referencia a las investigaciones llevadas a cabo para el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California (PEACC-BC, 2010), donde se determinaron las proyecciones de cambio climático para el noroeste de México utilizando algunos de los modelos de circulación global a baja escala que se describen en este trabajo. En dicho proyecto participaron más de 60 investigadores del CICESE, la UABC y el COLEF y fue financiado por la Secretaría de Protección al Ambiente (SPA) del Gobierno del Estado de Baja California.

También se cita el estudio “Tendencias observadas de extremos de precipitación en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos y proyecciones bajo condiciones de cambio climático” (Arriaga, 2008) y las “Proyecciones Regionales de Cambio Climático para Baja California”, (Cavazos, 2009).

El Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, ha incursionado a su vez en los estudios de cambio climático con los informes titulados:

- Escenarios de Cambio Climático en Sonora. Evaluación Preeliminar.
- Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque.
- Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle Guaymas y San José de Guaymas.

El primero presentado en 2010 como parte del Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático para el Estado de Sonora y los últimos dos publicados en 2012, como parte de un convenio donde participa la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los documentos fueron elaborados con el objetivo de establecer la magnitud de los impactos esperables frente a escenarios de cambio climático, y son considerados como precursores para esta tesis.

En lo que respecta a los estudios de vulnerabilidad a la intrusión salina y ascenso del nivel del mar, se cuenta con publicaciones de metodologías diversas siendo las más relevantes para este estudio:

- Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Publicado por Chachadi y Lobo-Ferreira (2005), presenta el método indexado



GALDIT que evalúa factores como el tipo de acuífero, conductividad hidráulica, elevación del nivel estático, distancia al mar, impacto de la intrusión salina y espesor del acuífero.

- Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro: Publicado en 2004 por Kokot et al., calcula la vulnerabilidad a partir de las diferentes unidades geológicas, geomorfológicas y de aspectos relacionados con el nivel del mar considerando la metodología propuesta por Gornitz (1990).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

Determinar el impacto del cambio climático en el acuífero Valle del Yaqui, por medio de una evaluación de cuatro fuentes de afectación principales: Evapotranspiración, escorrentía, recarga, e intrusión salina; que son producto de los cambios en los patrones de precipitación, temperatura y ascenso del nivel del mar.

1.2.2. Objetivos particulares

- Evaluar , tres modelos de circulación global utilizados para simular el clima en el área de estudio: MIROC3_2_MEDRES de Japón, UKMO-HADCM3 de Gran Bretaña y MPI-ECHAM5 de Alemania, obtenidos del Proyecto CMIP3 del Buró de Reclamación de Estados Unidos, con respecto a las métricas climatológicas observadas en la región de estudio.
- Seleccionar el Modelo de Circulación Global a baja escala que mejor se ajuste a la información observada de 1965 a 2010.
- Obtener escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura para el período de 2010 a 2099 y determinar la evapotranspiración en la cuenca del río Yaqui, con base en dichas proyecciones.
- Establecer escenarios de escorrentía que permitirán determinar las proyecciones de recarga para el sistema acuífero Valle del Yaqui para el período de 2010 a 2099.
- Determinar el grado de vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar utilizando la metodología de Gornitz (1990).
- Determinar la vulnerabilidad a la intrusión salina utilizando el método indexado GALDIT para acuíferos costeros.



2. METODOLOGÍA

A partir de los informes del IPCC (2007) donde se describen las posibles áreas de afectación de las cuencas hidrográficas debido al fenómeno del Cambio Climático, se eligieron para este trabajo los siguientes aspectos, por considerar aquellos que pudieran tener un impacto importante en el Sistema Acuífero del Valle del Yaqui:

1. Escenarios de Escurrimiento y su impacto en la recarga.
2. Ascenso del Nivel del Mar y asociado a este, la vulnerabilidad a la intrusión salina.

En este sentido se ha optado por un enfoque metodológico consistente en los siguientes pasos:

- Selección del área de estudio,
- Recopilación de información disponible,
- Selección del modelo de cambio climático,
- Proyección de escenarios de cambio climático,
- Determinación de su impacto en el sistema acuífero,
- Estimación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar e intrusión salina;

A continuación se describen cada uno de los pasos enumerados.

2.1. Selección del área de estudio

Se eligió el acuífero Valle del Yaqui como área de estudio por representar una de las zonas de producción agrícola más importantes del país. Queda comprendido dentro de la Región Hidrológica RH9 Sonora Sur y tiene una extensión aproximada de 5000 km², abarcando parcialmente los municipios de Cajeme, Bacum, Guaymas, y San Ignacio Río Muerto.

Entre las poblaciones más importantes que se localizan dentro del valle se encuentran: Ciudad Obregón, Esperanza, Benito Juárez y Bacum (Figura 2.1).

La corriente del Río Yaqui es la más importante de la región, tiene un volumen medio anual escurrido de alrededor de 2,800 millones de metros cúbicos (Monreal y otros 2003). Presentándose los mayores gastos con las lluvias de verano en la parte alta de la sierra, sin dejar de tener importancia las lluvias de invierno y las nevadas. Se considera que el Río Yaqui termina su escurrimiento en la presa Álvaro Obregón.

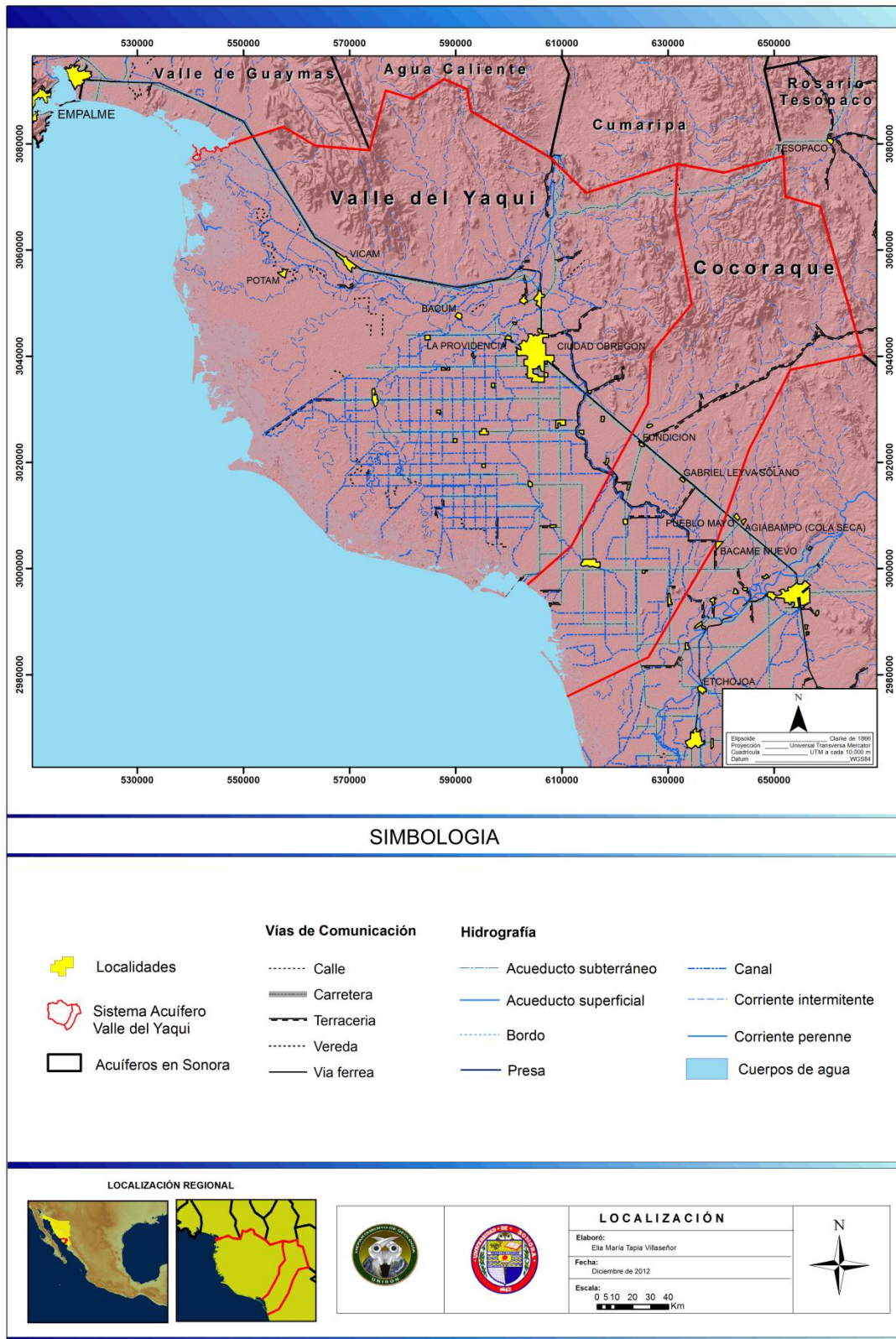


Figura 2.1 Localización



El Río Yaqui, ha sido a través de los años, el principal vehículo de transporte del material reciente de relleno del valle, cuya principal fuente de material proviene de las rocas que rodean la enorme cuenca, rellena por depósitos aluviales que se han prolongado hasta la costa.

El acuífero ha sido alimentado por las infiltraciones del Río Yaqui, de los canales y de las filtraciones del agua de riego vertida en los suelos agrícolas, teniendo así una recarga total inducida de 646.73 Hm³ (Monreal et al., 2003).

2.1. Recopilación de información existente y elaboración de un SIG

Para cumplir los objetivos del presente estudio, fue necesaria la recopilación exhaustiva de información climatológica histórica y proyectada para el acuífero Valle del Yaqui; registros de almacenamiento en presas; geología, hipsometría y geomorfología de la región; parámetros físicos y químicos del acuífero; así como registros de marea y altura de olas para la porción costera de la zona de estudio. La información recopilada sirvió como base para la generación de un Sistema de Información Geográfica utilizando el software ArcGis 10.0 y las fuentes de información se describen en los capítulos siguientes.

2.1.1. Series históricas de precipitación y temperatura

El análisis climatológico de la región se llevó a cabo considerando 33 estaciones climatológicas, principalmente de CONAGUA, 22 localizadas dentro de la Cuenca Río Yaqui, cuatro localizadas en el Valle del Yaqui y las cinco restantes ubicadas en los alrededores del área de estudio, específicamente en las poblaciones de Mazatan, Naco, Banámichi, Mazocahui, Punta de Agua, Quiriego y Navojoa. La selección de las estaciones se llevó a cabo tomando en consideración únicamente las que cuentan con un mayor periodo y continuidad de datos, así como una distribución espacial adecuada para el estudio. Las estaciones analizadas se muestran en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1 Estaciones Climatológicas Analizadas

No.	ESTACION	ESTADO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
1	Agua Prieta	Son	Agua Prieta	31° 19' 47.60"	109° 32' 48.70"	1,232
2	Bacadehuachi	Son	Bacadehuachi	29° 48' 29.86"	109° 08' 34.25"	728
3	Bacerac	Son	Bacerac	30° 21' 20.00"	108° 56' 02.20"	1,066
4	Col. Morelos	Son	Agua Prieta	30° 49' 42.89"	109° 13' 17.17"	872
5	El Cubil	Son	Sahuaripa	28° 13' 11.00"	109° 14' 56.00"	334
6	El Novillo II	Son	Soyopa	28° 56' 48.00"	109° 37' 14.00"	240
7	El Tápiro	Son	Compas	30° 14' 07.30"	109° 48' 58.10"	903
8	Granados	Son	Granados	29° 51' 40.34"	109° 18' 42.20"	548
9	Guápoca	Chih	Cd. Madera	29° 09' 56.00"	108° 18' 10.00"	1,241
10	Mulatos	Son	Sahuaripa	28° 38' 00.00"	108° 45' 00.00"	1,165
11	Nacozari	Son	Nacozari	30° 22' 29.97"	109° 41' 26.94"	1,162
12	Onavas	Son	Onavas	28° 27' 44.00"	109° 31' 35.00"	175
13	P. Abraham González	Chih	Guerrero	28° 28' 55.00"	107° 29' 00.00"	2,020
14	P. Alvaro Obregón	Son	Cajeme	27° 48' 35.00"	109° 48' 53.00"	116
15	P. La Angostura	Son	Villa Hidalgo	30° 26' 30.00"	109° 23' 08.00"	860
16	Paso de Nácori	Son	Nácori Chico	29° 25' 42.00"	109° 05' 28.00"	507
17	Sahuaripa	Son	Sahuaripa	29° 03' 12.00"	109° 14' 00.00"	430
18	Soyopa	Son	Soyopa	28° 45' 00.00"	109° 38' 04.00"	225
19	Tecoripa	Son	La Colorada	28° 37' 30.00"	109° 57' 09.00"	410
20	Temósachic	Chih	Temósachic	28°57' 00.00"	107° 49' 00.00"	1,932
21	Térapa	Son	Moctezuma	29° 42' 34.20"	109° 38' 55.36"	641
22	Yécora	Son	Yécora	28° 22' 11.00"	108° 55' 37.00"	1,552
23	Punta de Agua	Son	Guaymas	28° 24' 59.00"	110° 25' 59.00"	245
24	Mazocahui	Son	Baviácora	29° 32' 07.44"	110° 07' 11.08"	505
25	Banámichi	Son	Banámichi	29° 56' 26.96"	110° 12' 49.64"	610
26	Naco	Son	Naco	31° 19' 32.30"	109° 56' 54.10"	1,441
27	Mazatán	Son	Mazatán	29° 00' 12.00"	110° 08' 06.00"	540
28	P. Álvaro Obregón	Son	Cajeme	27°49'23"	109°53'09"	116.0
29	4P6	Son	Guaymas	27°25'32"	110°14'55"	35.0
30	Vicam	Son	Guaymas	27°39'00"	110°17'00"	46.0
31	Ciudad Obregón	Son	Cajeme	27°28'53"	109°56'17"	18.0
32	Batacosa	Son	Quiriego	27°31'46"	109°24'04"	230.0
33	Ciano Navojoa	Son	Navojoa	27°00'43"	27°00'43"	34.0



2.1.2. Escenarios de cambio climático del proyecto CMIP3

Los Modelos de Circulación Global proveen escenarios de cambio climático que nos pueden dar detalles acerca de la distribución de clima y pueden ayudar a identificar los extremos climáticos; además de ser de gran ayuda para estudios de impactos y vulnerabilidad.

En el año 2007, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), publicó 23 Modelos de Circulación Global con escenarios de cambio climático para el siglo XXI, a través del Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI, por sus siglas en inglés; Meehl et al., 2007; <https://esg.llnl.gov:8443/index.jsp>). La fase 3 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP), representa una colección de las salidas de los modelos producidos por los grupos de modelación líderes del mundo (Wood et al. 2002, Wood et al. 2004, and Maurer 2007; http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip3_projections/).

Para esta tesis se decidió trabajar los escenarios de cambio climático producto de tres modelos de circulación global a baja escala (12 km de resolución): MIROC3_2_MEDRES de Japón, UKMO-HADCM3 de Gran Bretaña y MPI-ECHAM5 de Alemania. Dichos modelos fueron proporcionados por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore y la Universidad de Santa Clara (LLNL-Reclamation-SCU), y forman parte de la tercera fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP).

Los modelos cuentan con una resolución espacial de 1/8° en latitud y longitud (~12 km). El periodo disponible de los datos es enero 1950 – diciembre 2099 y se encuentran a escala mensual. Asimismo se utilizaron dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: SRESA2 (emisiones altas) y SRESB1 (emisiones bajas).

2.1.3. Régimen de almacenamiento en presas

El régimen de almacenamiento en presas fue proporcionado por la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua, con registros de 1965 a 2010 donde se observa el almacenamiento inicial, variación de almacenamiento, entradas, salidas, aportación al vaso y escurrimiento por cuenca propia para la subcuenca La Angostura, El Novillo y El Oviachic, información necesaria para la determinación del coeficiente de escurrimiento histórico para cada una de las subcuencas.



2.1.4. Geología, hipsometría y geomorfología

La geología, hipsometría y geomorfología juegan un papel importante para la determinación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la porción costera del acuífero.

La Geología del área de estudio se determinó con base en las Cartas Geológico-Mineras del Servicio Geológico Mexicano a escala 1.250,000: H12-2 Guaymas, H12-3 Ciudad Obregón y H12-6 Huatabampo.

La hipsometría del acuífero se determinó con base en los datos de elevación topográfica estereoscópica del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), con tres arco-segundos de resolución.

La geomorfología del acuífero Valle del Yaqui, se obtuvo de la Metodología para la Elaboración del Mapa Hidrogeomorfológico de la cuenca del Río Asunción, publicado por Gutiérrez Anguamea en 2010.

2.1.5. Parámetros físicos y químicos

Los parámetros físicos y químicos para el acuífero se obtuvieron del Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle Del Yaqui, municipio de Cajeme, elaborado por la Universidad de Sonora en 2003, así como el Estudio de Caracterización Físicoquímica y Piezometría de los Acuíferos Costeros de la Región Noroeste, también por la Universidad de Sonora presentado en febrero de 2007.

2.1.6. Altura de mareas y olas

Para la altura máxima de olas en la porción costera del acuífero de estudio, se utilizaron los registros históricos para el año 2011, obtenidos del fotomareógrafo de la Secretaría de Marina para la estación Guaymas y los registros de CICESE para la de la estación Yávaros, Sonora.



2.2. Selección del modelo de cambio climático

Para la determinación del impacto del cambio climático en el acuífero Valle del Yaqui, fue necesario seleccionar el Modelo Circulación Global adecuado para la zona.

Los modelos de circulación global proveen escenarios de cambio climático; sin embargo sus resultados no son necesariamente idénticos, y la disparidad entre ellos refleja el grado de incertidumbre en el conocimiento del clima. Por este motivo, los resultados de las simulaciones del clima se cotejan con datos observados mediante el proceso de validación, lo que permite ponderar la eficiencia de cada modelo y orientar el desarrollo de mejoras futuras.

Como primer paso para la validación y selección de escenarios de cambio climático, se descargaron los Modelos de Circulación Global: UKMO-HADCM3, MIROC3_2_MEDRES y MPI-ECHAM5, enmarcados dentro del IV Reporte del IPCC del año 2007 (AR4), proporcionados por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore y la Universidad de Santa Clara (LLNL-Reclamation-SCU), para dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: SRESA2 (emisiones altas) y SRESB1 (emisiones bajas).

El formato original de los modelos de circulación utilizados es el netCDF que corresponde a un formulario de datos comunes en red, destinado a almacenar datos científicos multidimensionales y que requieren de la utilización de software especializado para su procesamiento y análisis.

Los tres modelos para el área de estudio fueron analizados utilizando el software MATLAB R2009a y ArcGis 10.0.

El proceso de validación se llevó a cabo mediante la elaboración de un análisis climatológico histórico utilizando estaciones de CONAGUA distribuidas a lo largo de la cuenca del Río Yaqui, que cubren un período de tiempo de 45 años: 1965-2010.

Se determinó la precipitación media anual y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para el área de estudio; así como la temperatura y evapotranspiración real para el período histórico determinado, con el objetivo de contrastar los resultados con los Modelos de Circulación Global seleccionados. Se presentan los resultados para cada una de las estaciones climatológicas analizadas y se utilizó el método de polígonos de Thiessen para presentar la información a nivel subcuenca.



El procedimiento para el cálculo del SPI consiste en generar una serie de precipitación histórica, y puesto que se ha observado que una serie de tiempo de precipitación se ajusta bien a una serie de distribución gama, se procede a transformarla a una distribución normal con una media igual a 0 y una desviación estándar igual a 1, cuya abscisa es el SPI. Utilizando el programa de cómputo desarrollado por McKee et al. (1993) se obtienen los valores que son comparados con la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores del SPI

Valor del SPI	Intensidad de Sequía
2.0 y más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
-2.0 y menos	Extremadamente seco

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, entre los registros de CONAGUA y las proyecciones de cambio climático para el período de observación histórica de 1965 a 2010 utilizando la ecuación 2.1, lo que permitió elegir la proyección más acertada en el área de estudio.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{(n - 1)S_x S_y} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde x_i y y_i son las variables, para n datos que intervienen en el estudio.

También se generó un grid de validación estacional para los años de 1985-2005 con base en las estaciones seleccionadas, lo que permitió calcular el porcentaje de error entre la información observada y modelada, así como la ubicación espacial de dichos errores.



2.3. Proyección de escenarios de cambio climático

Antes de proyectar los escenarios de cambio climático para la cuenca del Río Yaqui, se llevó a cabo una corrección de tendencia (bias correction), de acuerdo con el porcentaje de error obtenido en el grid de validación, con el objetivo de ajustar el modelo con la precipitación y temperatura histórica observada.

Una vez corregido el modelo de circulación global se determinaron las proyecciones de cambio climático del área en sus escenarios SRES-A2 (emisiones bajas) y SRES-B1 (emisiones bajas).

Las proyecciones de precipitación y temperatura se presentan para la Subcuenca La Angostura, El Novillo y el Oviachic, cuya escorrentía irriga el acuífero Valle del Yaqui y que abarcan el área de estudio.

2.4. Impacto del cambio climático en la recarga del acuífero

El impacto del cambio climático en la recarga del acuífero se determinó con base en los efectos de las posibles modificaciones de los patrones de precipitación y temperatura en la evapotranspiración, escurrimiento y almacenamiento en las presas.

La evapotranspiración real anual se calculó utilizando la fórmula empírica de Turc y Coutagne (Ecuación 2.2 y 2.3 respectivamente), para las proyecciones obtenidas.

La ecuación empírica de Turc establece lo siguiente:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

ETR=Evapotranspiración anual real (mm)

P=Precipitación media anual (mm)

T=Temperatura media anual (°C)

La ecuación empírica de Coutagne establece que:

$$ETR = P - xP^2 \quad \text{Ecuación 2.3}$$



$$X = \frac{1}{0.8+0.14T}$$

Ecuación 2.4

Dónde:

$$1/8x < P < 1/2x$$

ETR= Evapotranspiración anual real (m/año)

P=Precipitación media anual (m/año)

T= Temperatura media anual (°C)

Se llevó a cabo un análisis histórico de los almacenamientos en presas proporcionados por la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua, en relación con los registros de precipitación y temperatura para la zona, con el objetivo de determinar el coeficiente de escurrimiento histórico para cada una de las subcuencas evaluadas. Dicha información permitió calcular la escorrentía proyectada para la cuenca del Río Yaqui.

Los resultados de las proyecciones de escorrentía se determinaron utilizando el escenario de cambio climático menos favorable (SRES-A2) y el software de modelación dinámica Stella 9.0.2., que proporciona un marco de referencia y una interfaz gráfica de usuario para la observación e interacción cuantitativa de las variables de un sistema, en este caso la cuenca del río Yaqui.

Con los escenarios de escorrentía proyectados y los registros históricos de transferencia de agua entre las presas del sistema, se determinó el almacenamiento de agua para la Presa El Oviachic y, a partir de estos, el bombeo requerido para cumplir con las necesidades de agua del Distrito de Riego, entendidas como el volumen de agua concesionada.

Como una forma de evaluar el posible impacto en el acuífero se evaluó el cambio de almacenamiento anual del Sistema Acuífero tanto en el período histórico como en el proyectado.

Esto se realizó mediante la ecuación:

$$RI+Fs+Rr+Ic-Etr-Br-Fb=Ca$$

Ecuación 2.5



Dónde

RI= Recarga de ladera en millones de metros cúbicos (calculada con base en las proyecciones de cambio climático para precipitación y temperatura)

Fs= Flujo subterráneo en millones de metros cúbicos (tomado de Monreal et al., 2003).

Rr= Retorno de riego en millones de metros cúbicos (tomado de Monreal et al., 2003).

Ic= Infiltración en canales en millones de metros cúbicos (tomado de Monreal y otros, 2003).

Etr= Evapotranspiración (calculada con base en las proyecciones de cambio climático para precipitación y temperatura).

Br= Bombeo requerido (tomado de Monreal et al., 2003).

Fb= Flujo base (tomado de Monreal et al., 2003).

2.5. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar

La determinación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar se obtuvo mediante la utilización del criterio de Gornitz (1990) que exige una adaptación numérica de datos oceanográficos y geológicos, que resultan de la observación directa, información bibliográfica y de muestreo.

El criterio de Gornitz se basa en la utilización de 7 variables principales y se resuelve mediante la siguiente fórmula:

$$V = \sqrt{(a1*a2*a3*a4*a5*a6*a7)/7} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Dónde:

- a1. Altura máxima de la ola: Representa la energía del medio marino y su capacidad erosiva.
- a2. Cambio del Nivel del Mar: Representada por valores de altitud e indicadores de peligro de inundación.
- a3. Geología: Representa la resistencia a la erosión de los afloramientos del área costera dependiendo de la litología y características estructurales de la roca.



- a4. Geomorfología: Permite prever la evolución del paisaje, posible degradación a partir de inundación y erosión y condiciones energéticas
- a5. Desplazamiento de la línea de costa: Dato que representa el comportamiento histórico de la línea de costa y su tendencia evolutiva respecto a la componente horizontal.
- a6. Altura máxima de ola: Esencial para la determinación de la energía involucrada en la incidencia de olas sobre las áreas costeras, pues es proporcional al cuadrado de la altura de las olas.
- a7. Rango de mareas: junto con los episodios de tormenta permite identificar las variaciones episódicas del nivel del mar. Se relaciona tanto a inundación como al riesgo de erosión.

La Tabla 2.2 indica los valores que permiten dar un tratamiento numérico a la ecuación 2.6.

Tabla 2.3 Rango de los componentes del índice de vulnerabilidad costera

	RANGO DE LAS VARIABLES DE VULNERABILIDAD COSTERA				
	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta
Variables	1	2	3	4	5
1. Altitud (m)	>30	21-30	11 – 20	6 – 10	0 - 5
2.Cambio de nivel del mar (mm/año)	< -1.0	- 1.0 a 0	0.1 a + 2.0	2.1 a 40	> 4.0
3.Tipo de Roca (geología)	Rocas plutónicas, volcánicas y metamórficas de alto grado	Rocas metamórficas de bajo grado	Mayoría de las rocas sedimentarias	Rocas sedimentarias poco consolidadas	Sedimentos inconsolidados
4.Geoforma (geomorfología)	Fiordos, acantilados altos	Acantilados intermedios y bajos	Barras, deltas, espigas tómbolos	Playa, y playa sobre plataforma litoral	Planicie de marea, marismas
5.Desplazamiento de la línea de costa (m/a)	>+0.1	0.00	-0.1 a -0.5	-0.6 a -1.0	< -1.0
	Acreción	Estable	Erosión	Erosión	erosión
6. Máxima altura de ola en un año (m)	0 - 2.9	3.0 - 4.9	5.0 - 5.9	6.0 - 6.9	> 6.9
7. Rango de marea (m)	< 0.5	0.5 - 1.9	2.0 - 4.0	4.1 - 6.0	> 6.0



2.6. Vulnerabilidad a la intrusión marina

El grado de vulnerabilidad a la intrusión marina se calculó utilizando el método indexado GALDIT de Chachadi et. al (2005) para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, que se basa en la combinación de diferentes parámetros:

Tabla 2.4 Parámetros del método GALDIT.

Factor	Indicador	Peso	Variable		Valor
G	Ocurrencia de agua subterránea/Tipo de Acuífero	1	Acuífero Confinado		10
			Acuífero libre		7.5
			Acuífero semiconfinado		5
			Acuífero limitado (recarga y/o límites paralelos a la línea de costa)		2.5
A	Conductividad hidráulica del acuífero (m/día)	3	Clase	Rango	
			Alta	>40	10
			Media	10-40	7.5
			Baja	5-10	5
			Muy baja	<5	2.5
L	Nivel del agua subterránea sobre el mar (m)	4	Clase	Rango	
			Alto	<1.0	10
			Medio	1.0-1.5	7.5
			Bajo	1.5-1.2	5
			Muy bajo	>2.0	2.5
D	Distancia tierra dentro perpendicular a la costa (m)	4	Clase	Rango	
			Muy cerca	<500	10
			Cerca	500-750	7.5
			Medio	750-1000	5
			Lejos	>1000	2.5
I	Estatus de impacto existente de intrusión salina $Cl^-/[HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}]$	1	Clase	Rango	
			Alto	>2	10
			Medio	1.5-2	7.5
			Bajo	1-1.5	5
			Muy bajo	<1	2.5
T	Espesor del acuífero (m)	2	Clase	Rango	
			Grueso	>10	10
			Medio	7.5-10	7.5
			Chico	5-7.5	5
			Muy chico	<5	2.5

Cada uno de los 6 indicadores tiene un peso predeterminado que refleja su importancia relativa en la intrusión salina. El índice GALDIT se obtiene calculando los parámetros individuales aplicando la siguiente expresión:

$$iVGALDIT = \frac{\sum_{t=1}^6 W_t * R_t}{\sum_{t=1}^6 W_t}$$

Ecuación 2.7



3. GENERALIDADES

En este capítulo se describirán las características del área de estudio, su fisiografía, climatología, hipsometría, geología y geomorfología, información que servirá para la determinación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en el acuífero Valle del Yaqui.

3.1. Fisiografía

El área de estudio se encuentra ubicada en tres subprovincias fisiográficas: 1) Sierras y Llanuras Sonorenses, 2) Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa y 3) Pie de la Sierra (Figura 3.1); correspondiendo a la Provincia de Llanuras Sonorenses, Llanura Costera del Pacífico y Sierra Madre Occidental, respectivamente (INEGI, 1991).

Cabe mencionar que estas subprovincias están compuestas principalmente por rocas sedimentarias, ígneas, metamórficas y vulcanosedimentarias, con edades que varían desde el Paleozoico al Reciente.

A continuación, de manera general, se describen las subprovincias que abarca el área de estudio. La Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa está representada por el delta del río Yaqui donde se encuentra localizado el extenso Distrito de Riego del Río Yaqui. Todo su territorio se encuentra casi a nivel del mar y la mayoría del mismo está cubierto de material aluvial. La línea de costa es sinuosa con un buen número de bahías y esteros.

La subprovincia de Sierras y Llanuras Sonorenses está formada de sierras bajas separadas por llanuras (INEGI, 1991). Tales sierras son más elevadas (700 a 1400 m.s.n.m.) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 m.s.n.m. o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan rocas ígneas intrusivas félsicas, aunque también son importantes, particularmente en la parte central de la subprovincia, rocas extrusivas, metamórficas, calizas y conglomerados del Terciario. Las llanuras están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes.



3.2. Climatología

La región de estudio presenta un clima semi-seco, seco y muy seco, de acuerdo con la clasificación del INEGI. Dicha región se caracteriza por sus altas temperaturas durante el verano y por su baja precipitación en la mayor parte del año. En general, la cuenca del Yaqui presenta periodos de lluvia durante el invierno y durante el verano como se describirá a continuación con más detalle.

El área de estudio se encuentra dentro de la región principal del Monzón de Norteamérica-NAM (Douglas et al., 1993 Reyes et al., 1994, Adams y Comrie, 1997). El régimen de precipitación durante el verano está prácticamente regido por el Monzón ya que el calentamiento intenso de la gran masa de terreno que representa la Sierra Madre Occidental provoca que la dirección de los vientos, que normalmente viajan del continente al mar, cambie y se dirijan ahora del mar hacia el continente, proporcionando aire húmedo (en la atmósfera baja) hacia el interior de la cuenca favoreciendo la convección de vapor de agua y la generación de tormentas (Douglas et al. 1993 y Reyes 1994). Más del 60% de la precipitación anual se registra durante el periodo monzonal (Adams y Comrie, 1997), dentro de la cuenca, los regímenes de precipitación tienen una gran variación presentando un gradiente que va de 25 mm/mes, en la parte costera, hasta 450 mm/mes en la sierra alta (Reyes et al., 1994).

Por otro lado, las lluvias de invierno tienen una naturaleza frontal, es decir, son mayormente generadas por convergencias de aire húmedo aunado a la presencia de frentes fríos provenientes del polo norte. La precipitación durante los meses de enero y diciembre representa aproximadamente entre el 5 y el 10 % de la precipitación anual. Finalmente, la presencia de huracanes del Pacífico y muy ocasionalmente del Atlántico favorecen la ocurrencia de precipitación durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

A continuación se presenta la descripción más detallada del tipo de clima presente en el área de estudio; mientras que el comportamiento general de la temperatura, precipitación, evaporación y evapotranspiración se describe en los capítulos posteriores.

BW(h)hw: Corresponde a un clima muy seco, cálido y/o desértico, con régimen de lluvias en verano. La temperatura media anual supera los 22 °C. Predomina en la zona costera del sistema acuífero Valle del Yaqui.



BSohw: Corresponde a un clima seco, semicálido con invierno fresco. La temperatura media anual que supera los 18°C y se presenta esporádicamente en la porción centro-norte del acuífero Valle del Yaqui y Cocoraque, respectivamente.

BSo(h')hw: Clima seco con temperatura media anual superior a los 22 grados centígrados, se caracteriza por ser cálido y presentar régimen de lluvias de verano. Se ubica en la porción noreste del acuífero Valle del Yaqui y en el centro del acuífero Cocoraque.

BS1(h')h: Corresponde a un clima semiseco, catalogado como el menos seco de los secos, y con la característica de ser cálido. Se presenta en la porción noreste del acuífero Cocoraque.

BS1hw: Clima semiseco, semicálido con invierno fresco y con temperatura media anual superior a los 18 grados centígrados. Se presenta como puntos esporádicos al noreste del acuífero Valle del Yaqui y al noreste del acuífero Cocoraque.

3.3. Hipsometría

La hipsometría es la parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos para determinar y representar la altura, también llamada "cota", de cada uno de los puntos, respecto de un plano de referencia. Con la hipsometría se consigue representar el relieve del terreno.

El mapa hipsométrico es de gran importancia para el estudio de relieve, además de ser el inicial en este proceso. Para la definición de los intervalos a utilizar, se consideró la altura máxima y la mínima del área de estudio, obtenida de los datos de elevación topográfica estereoscópica del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), con tres arcossegundos de resolución.

Los intervalos de altura se colocan en un archivo en formato de tabla dentro de un SIG, el cual se aplica al mapa en formato raster, indicando por medio de álgebra sencilla que los píxeles con un valor determinado, se agrupan en un intervalo definido en la tabla de clasificación.

La intención de este mapa es expresar de manera inmediata y clara el relieve en su totalidad. En el plano de Hipsometría (Figura 3.3), se utilizaron coloraciones azules para denotar las zonas más bajas y los colores verde, amarillo, y rojo, para las zonas más altas.

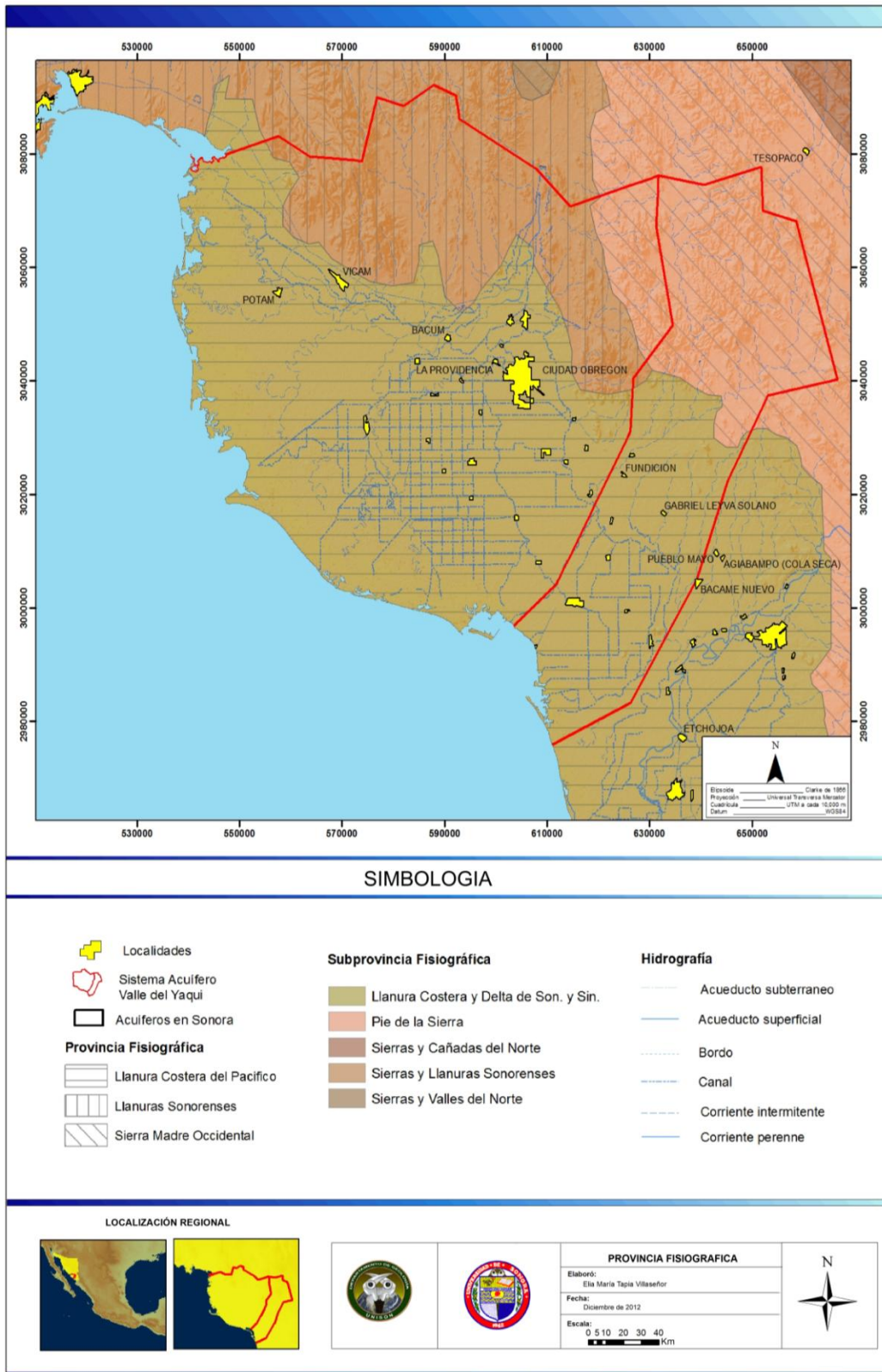


Figura 3.1 Fisiografía

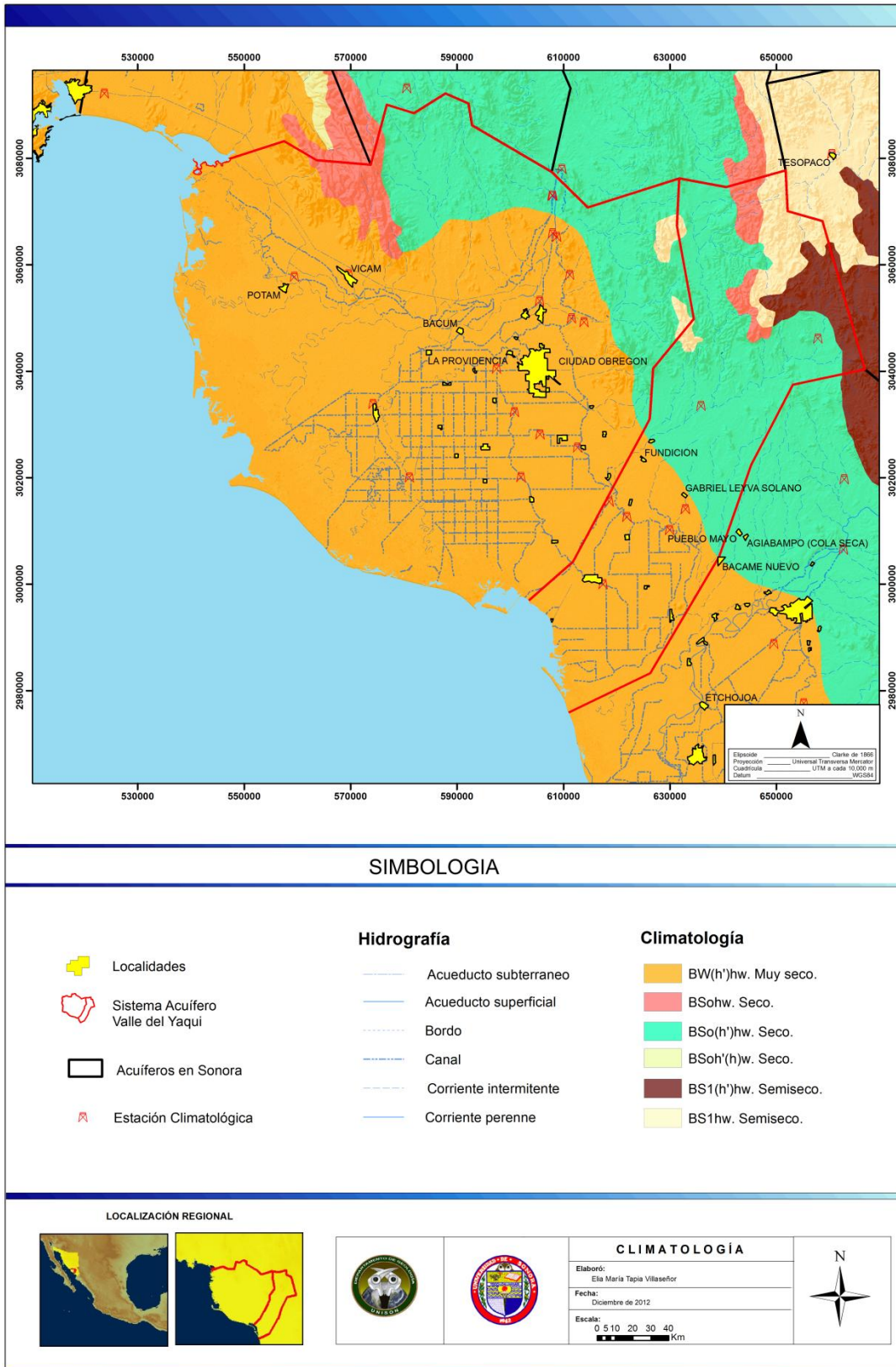


Figura 3.2 Climatología

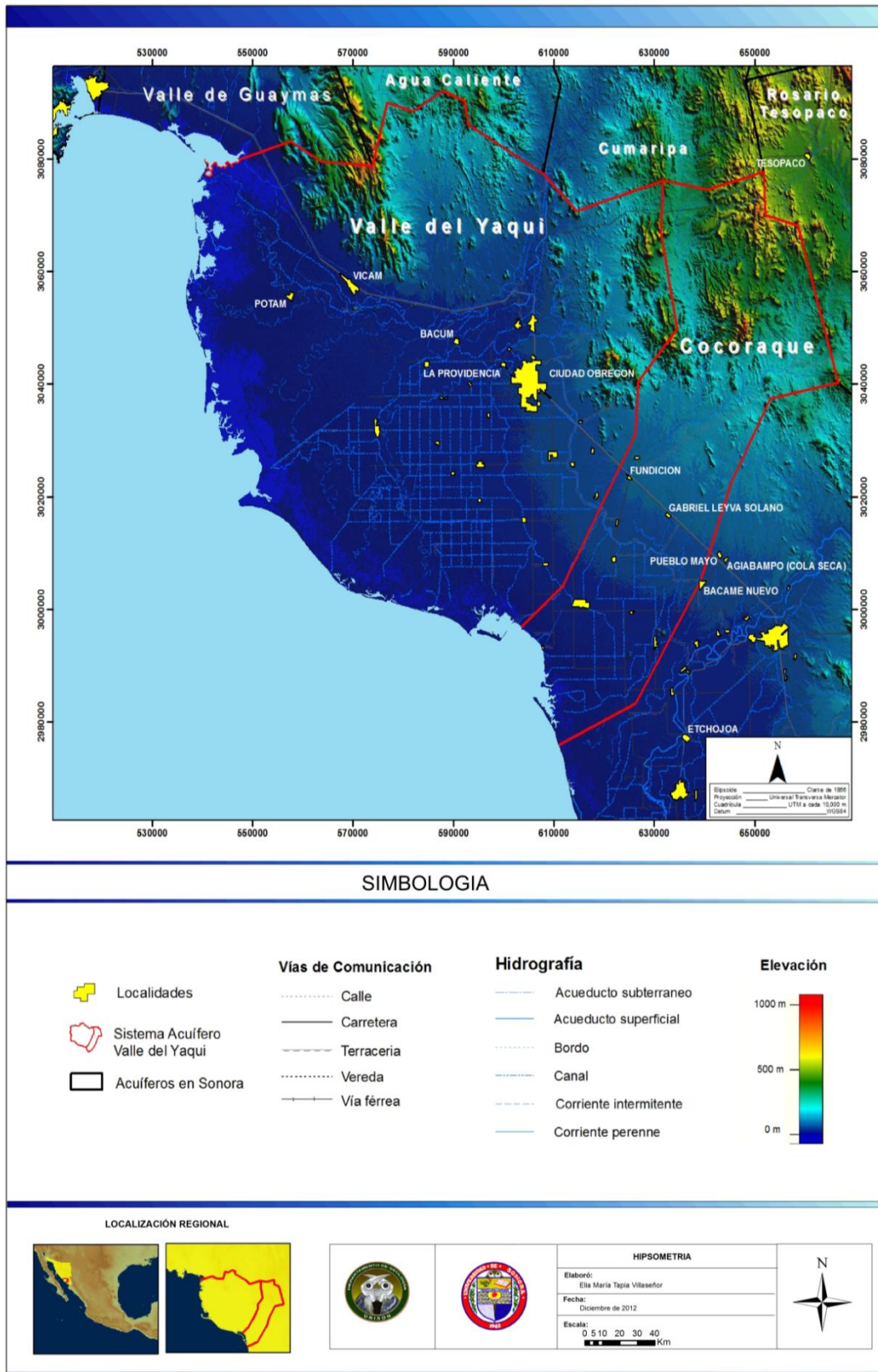


Figura 3.3 Hipsometría



3.4. Geología

La cuenca del Valle del Yaqui se encuentra cubierta casi en su totalidad por rocas ígneas, cretácicas y terciarias, por conglomerados de fines del Terciario y por depósitos aluviales y residuales del Cuaternario (Figura 3.4).

Posteriormente a la formación de las rocas ígneas, aparecen aún dentro del Terciario, depósitos detríticos continentales de la formación Báucarit a los que sobreyacen areniscas y conglomerados (Monreal et al., 2003).

Los últimos acontecimientos geológicos que ocurrieron en la zona fueron la formación de materiales aluviales, depósitos de talud y suelo residual, fenómenos que continúan actualmente.

3.4.1. Estratigrafía

Dentro del área de estudio en el Valle del Río Yaqui, existen unidades estratigráficas cuyas edades varían desde el Cretácico Superior hasta el Holoceno y la nomenclatura tanto formal como informal que se utiliza para las unidades estratigráficas está basada principalmente en Monreal et al., 2003. A continuación se enlistan las unidades que afloran en el área de estudio, desde el más antiguo al más reciente:

CRETÁCICO SUPERIOR

Ensamble Intrusivo Superior (KsTpaGr-Gd, KsTeGr-Gd)

Las intrusiones batolíticas de composición granítica-granodiorítica se encuentran distribuidas de forma aislada. El batolito presenta variaciones en el color de gris claro-blanquecino a gris-verdoso y rosa, la textura es porfídica y fanerítica de grano medio, constituido de feldespato potásico, albita-oligoclasa, cuarzo, biotita, con minerales de alteración como sericita, clorita y hematita. Esta unidad es parte del Batolito Laramide de Sonora (90-40 millones de años) definido por Damon et al., en 1983, como una serie de intrusiones félsicas emplazadas desde el Cretácico Tardío y hasta el Eoceno, los cuales caracterizan al arco magmático mesozoico terciario en Sonora. Dichos intrusivos representan la continuación hacia el sur del cinturón batolítico del oeste norteamericano.



TERCIARIO VOLCÁNICO

Aquí se agrupan todas las variedades de rocas volcánicas que se originaron durante el Terciario, las que ocupan la mayor parte de las serranías que rodean al valle y cuya composición varía de basalto a andesita y riolita.

No fue posible establecer una secuencia dentro de estas rocas, en virtud de que no muestran una sucesión litológica y estratigráfica definida, que pueda ser reconocida entre un afloramiento y otro.

Los basaltos y las andesitas son las más abundantes y se presentan como rocas de color gris oscuro a negro e intemperizan en tonos cafés. Entre las diferentes coladas se encuentran derrames de tobas andesíticas de color gris claro a rosado y aglomerados que intemperizan a café rojizo. Hacia la parte superior son más frecuentes las rocas riolíticas, que se encuentran generalmente formando mesetas y a veces picos aislados.

Predominan en esta secuencia las tobas consolidadas, aglomerados y derrames lávicos. Las tobas de color blanco amarillento están generalmente muy consolidadas, los aglomerados de color rosado, presentan fragmentos líticos de 3 a 4 cm de diámetro, mientras que los derrames riolíticos, cuya coloración varía de gris a rojizo, presentan fenocristales de cuarzo y plagioclasa.

Andesita – Toba Andesítica (TpaeA-TA)

Dentro del área aflora una serie de secuencias volcánicas de composición principalmente intermedia y ácida constituidas por andesitas, tobas andesíticas, las cuales son correlacionables con el grupo Nacozari (Grijalva y Roldán, 1997).

Riolita – Dacita (To(?)R-Da), Ignimbrita – Toba Riolítica (Tolg-RT)

De edad Oligoceno y Mioceno, este grupo contiene una serie de secuencias volcánicas, volcanoclásticas y piroclásticas de composición principalmente ácida e intermedia, constituida por ignimbritas, tobas riolíticas, riolitas y dacitas. Tienen un color que varía de gris claro a gris rojizo con textura porfídica.

Andesita – Dacita (TmA-Da)

Del Mioceno aflora una secuencia volcánica representada por andesitas y dacitas con características de flujos de lava de carácter intermedio y ácido, presentan una textura compacta masiva con matriz afanítica, las andesitas presentan un color café grisáceo con



crisales de hornblenda y la dacita se presenta rojiza de textura fanerítica equigranular. Estas rocas pueden ser correlacionadas por edad con las andesitas La Espuela y la unidad dacítica El Mezquite del Mioceno 15.3-22.7 Ma (Mora A.G., 1992) de la Sierra de Santa Úrsula.

Toba Riolítica – Riolita (TmTR-R), Toba Riolítica – Basalto (TmTR-B)

Dentro del área de estudio la formación Báucarit está representada en parte por una serie volcánica ácida compuesta por tobas riolíticas y riolitas, su color es pardo que cambia de tonalidad por intemperismo; por lo general esta unidad se encuentra bien consolidada y es correlacionable con la parte superior del conglomerado Báucarit de edad Mioceno. Estas rocas representan una sedimentación continental ligada a la distensión terciaria de Cuencas y Sierras.

DERRAMES LÁVICOS

Basalto – Andesita (TmB-A)

Esta secuencia incluye además andesitas basálticas, brechas y aglomerados basálticos estas rocas fueron denominadas "Basaltos Antiguos" (Johnpeer, 1979). Presentan una textura fina y una coloración gris oscuro a negra y generalmente se le encuentra idingsitizado con vesículas rellenas de calcita y sílice; para esta secuencia existe un fechamiento de 17.8 ± 5 Ma.

Basalto (TmB)

Del Mioceno Tardío y caracterizados por presentarse como derrames y brechas que varían a andesita basáltica, la textura es siempre afanítica con poco olivino en pequeños cristales, aunque también los hay de carácter toleítico, presentan vesículas parcialmente rellenas por calcita o sílice. Esta unidad puede correlacionarse con el basalto Las Trincheras de la Sierra de Santa Úrsula fechados en 8.5 a 10.3 Ma. Esta secuencia es correlacionable con el llamado Basalto Sierra Oscura.

TERCIARIO SUPERIOR CLÁSTICO

Sobreyaciendo concordantemente a las rocas anteriormente descritas se encuentra aflorando a lo largo del Río Yaqui, aguas abajo del vertedor de la Presa Alvaro Obregón y en el cauce del Arroyo Cedros, entre el Rosario y Quiriego, una formación constituida por



una alternancia de conglomerados y areniscas. Los conglomerados se encuentran sobre todo a lo largo del Arroyo Cedros y se presentan como una roca de color amarillento a rojizo muy cementada en la que los fragmentos subredondeados presentan un diámetro de 5 a 30 cm. A la altura de Quiriego, siempre en el cauce del Arroyo Cedros, esta formación está constituida por una potente sección de areniscas de grano fino, poco compactadas, en las que observan alternancias de capas limosas y una estratificación bien marcada.

Aguas abajo del vertedor de la Presa Álvaro Obregón estas rocas están constituidas por una arenisca de grano grueso algo compactado, en estratos horizontales de 30 a 50 cm. de espesor.

Conglomerado Polimictico-Arenisca (TmCgp-Ar), Conglomerado Polimictico-Basalto (TmCgp-B)

Durante el Mioceno se desarrolló una sedimentación en ambientes de abanicos aluviales, sistemas fluviales y lacustres, influenciados grandemente por una actividad volcánica bimodal correspondiente al Grupo Rosario, compuesta por conglomerados polimícticos, areniscas y basaltos. Su color es pardo que cambia de tonalidad por intemperismo; por lo general esta unidad se encuentra bien consolidada. Estas rocas representan una sedimentación continental ligada a la distensión terciaria de Cuencas y Sierras.

Conglomerado Polimictico-Arenisca (TplCgp-Ar)

Del Plioceno al Holoceno se desarrolla una amplia actividad erosiva y se originan secuencias fluviales y fluviodeltáicas de sedimentos mal consolidados y no consolidados, que están incluidos en el Grupo Sonora.

CUATERNARIO CLÁSTICO

Continúa la actividad erosiva en este período y expone materiales que se están depositando en el área, estando constituidos por depósitos de talud, materiales aluviales y suelo vegetal. Estos sedimentos son el producto de la destrucción de todas las rocas que se encuentran expuestas a los diversos agentes de la erosión.



Adicional a estos sedimentos, encontramos una secuencia sedimentaria compuesta por conglomerados en asociación con areniscas, dichos conglomerados se observan mal consolidados, (Conglomerado Polimíctico-Arenisca (**QptCgp-Ar**) Conglomerado Polimíctico (**QptCgp**)). La granulometría de los depósitos aluviales varía desde grava gruesa y arenas (Grava – Arena (**Qptgr-ar**)) en los márgenes del Río Yaqui y material de tipo aluvial como son arenas y limos y arcillas (**Qhoar, Qholm-ar**) en el resto del valle. También es observable depósitos de litoral que consisten de arena con bioclastos de coral, espículas de equinodermos, gasterópodos, ostrácodos, pelecípodos y esponjas (**Qholi**); además de material palustre (**Qhopa**), lacustre (**Qhola**), eólico (**Qhoeo**) y Aluvión (**Qhoal**).

3.4.2. Geología estructural

En la zona del Sistema Acuífero Valle del Yaqui, se tienen estructuras principalmente en la parte norte del mismo, teniendo como principal dirección de las fallas NW-SE, aunque también se tiene un gran número de fallas con una dirección perpendiculares a estas, pero son en menor frecuencia. El área de la parte sureste de Sonora es principalmente afectada por el sistema de fallas de San Andrés (Monreal et al., 2003). Las fallas son principalmente normales, así como un seguimiento o paralelismo con las fracturas que se dan en el mismo.

Es interesante notar que ciertos autores (Minjárez et al., 2000) han postulado que en alguna parte del área deben de existir una o varias estructuras fundamentales que yuxtapongan ya sea dos o más ‘terrenos tectónicos’ al cratón norteamericano (Ortega-Gutiérrez et al., 1994). El tipo de acreción de estos ‘terrenos’ es aún tema de debate. Se sugiere que el sur-oeste del área fue originalmente el marco de una margen continental activa, destruida eventualmente por la colisión de diferentes terrenos tectónicos que yacieron más al sur-oeste, y luego sufrieron las consecuencias de la apertura del Golfo de California (Minjárez et al., 2003).

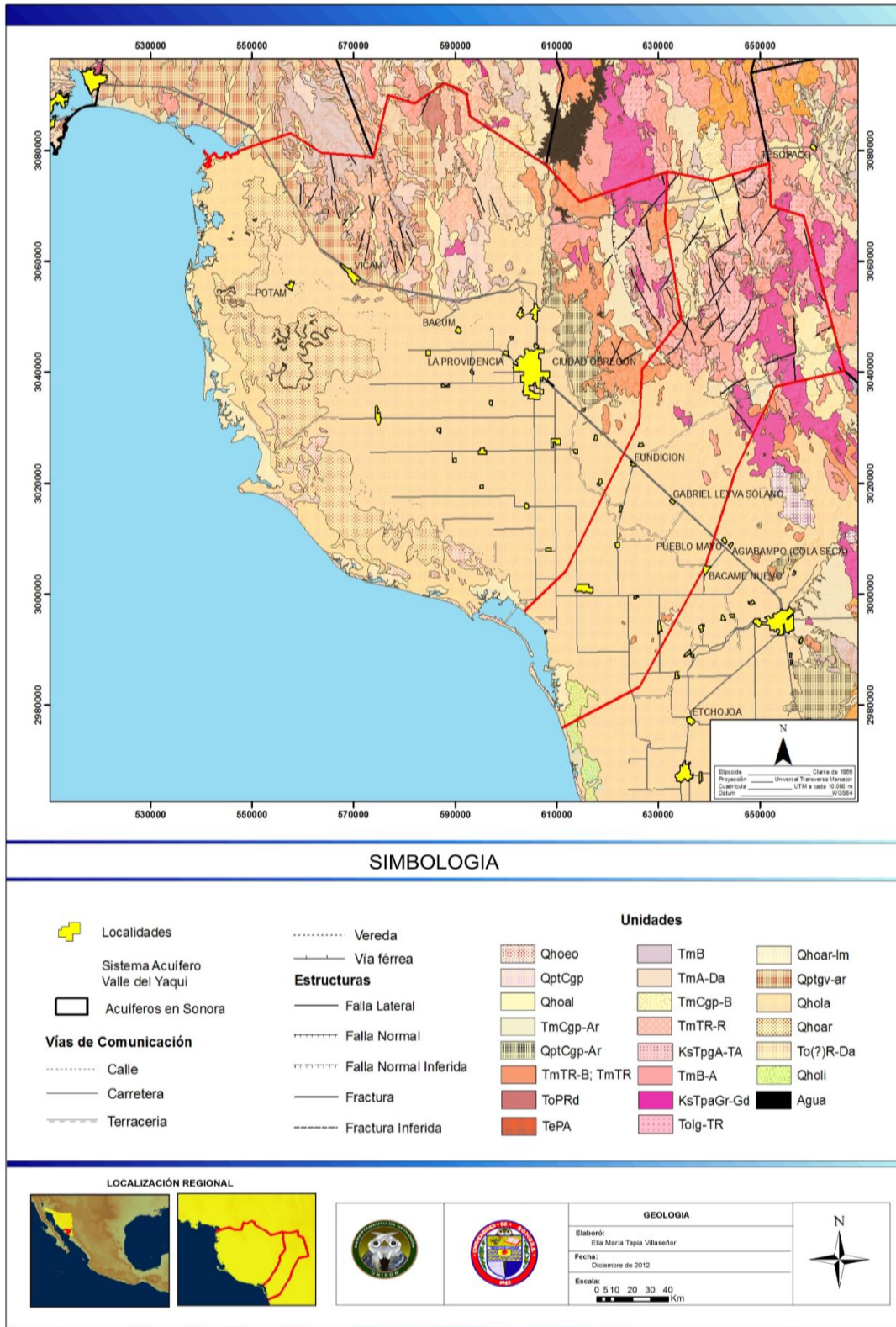


Figura 3.4 Geología

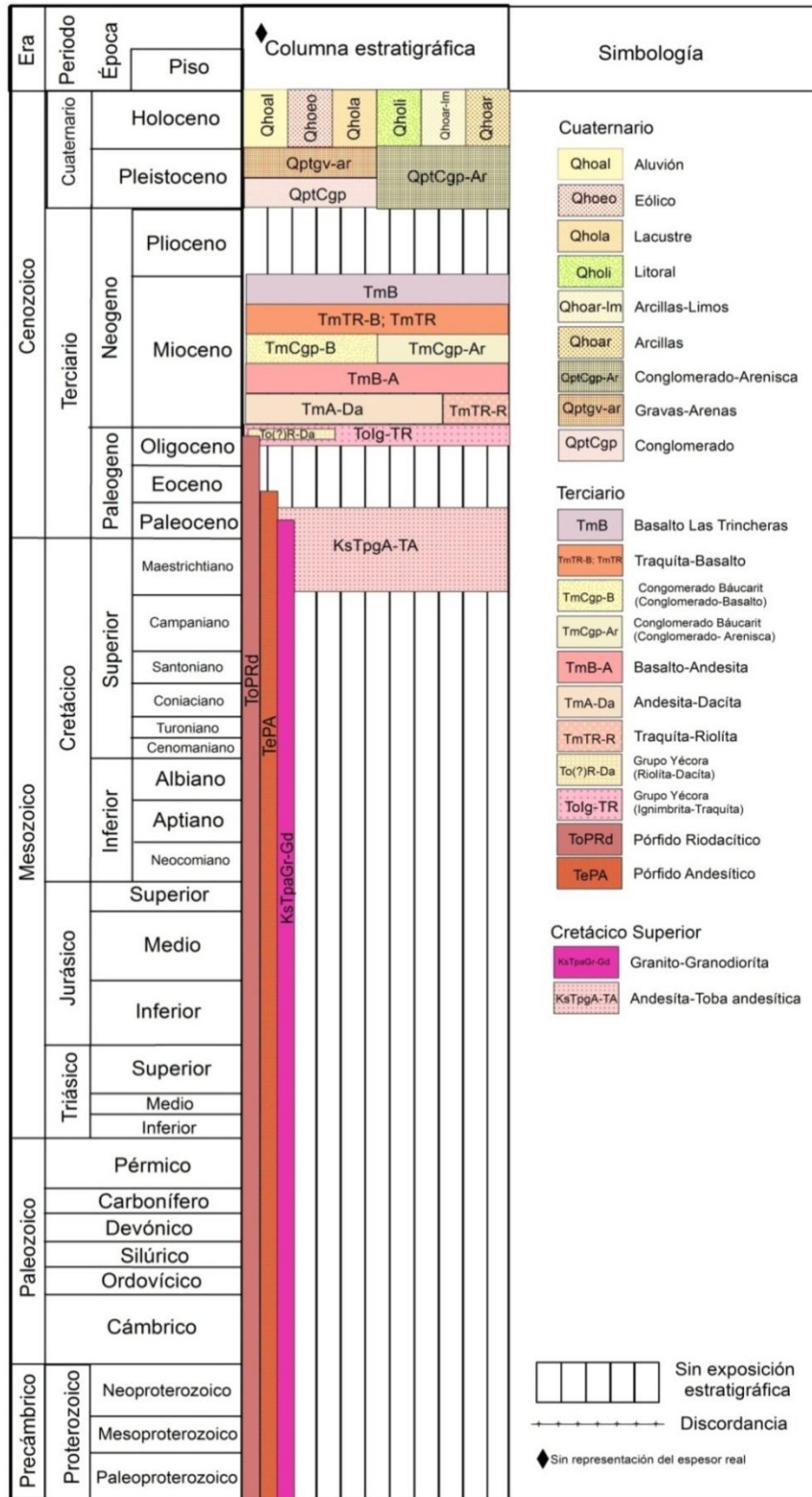


Figura 3.5 Columna Estratigráfica



3.5. Geomorfología

Para la elaboración del mapa Geomorfológico se utilizaron varios parámetros para la clasificación de unidades, como son: geoforma, drenaje, altura relativa, pendiente, litología y edad. La altura relativa o diferencias de altitudes se tomó en cuenta de la base a la cima de la misma unidad, definiéndose como lomeríos y planicies a todos aquellos cuerpos que presentan un nivel menor a los 200 m, montaña baja se tomó un rango de 200-500 m y para montaña alta a los mayores a 500 m. La estabilidad de la pendiente se clasificó en cuatro categorías denominadas como estable para pendientes entre $0-10^{\circ}$, metaestable entre $10-25^{\circ}$, inestable entre $25-35^{\circ}$ y abrupta en zonas donde la pendiente son superiores a 35° . Otros parámetros tomados en cuenta son la litología y la edad (Gutiérrez, 2010).

De acuerdo con las características anteriormente descritas se pudieron discriminar 17 unidades geomorfológicas (Figura 3.6), las cuales se mencionan a continuación:

Ma I Vi-Va Ti: Ladera montañosa alta inestable de origen volcánico denudativo del Terciario inferior.

Ma M Vi-Va To: Ladera montañosa alta metaestable de origen volcánico denudativo del Terciario Oligoceno.

Mb M Vi-Va To: Ladera montañosa baja metaestable de origen volcánico denudativo del Terciario Oligoceno.

Lo E Lu-Ar Tm: Lomerío estable de origen denudativo, formado por arenisca, basalto, lutita del Terciario Mioceno.

Lo E Cgp-B Tm: Lomerío estable de origen denudativo volcánico, formado por conglomerado polimíctico y basalto del Terciario Mioceno.

Lo E Pi-PaKsTpa: Lomerío estable de origen estructural denudativo, formado por plutónica intermedia, plutónica ácida del Cretácico superior, Terciario Paleoceno.

Lo E Va-Vi Ti: Lomerío estable de origen volcánico denudativo, formado por roca volcánica ácida y volcánica intermedia del Terciario inferior.



Lo M Pi-PaKsTpa: Lomerío metaestable de origen estructural denudativo, formado por roca plutónica intermedia y ácida del Cretácico superior, Terciario Paleoceno.

Lo M Vb Tm: Lomerío metaestable de origen volcánico denudativo, formado por roca volcánica básica del Terciario Mioceno.

Pi E CgpQpt: Piedemonte estable de origen denudativo formado por conglomerado polimíctico del Cuaternario Pleistoceno.

Pi M Vi-Va Tm: Piedemonte metaestable de origen denudativo, formado por roca volcánica intermedia y volcánica ácida del Terciario Mioceno.

PI al Qho: Planicie aluvial de origen fluvial, formada por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno.

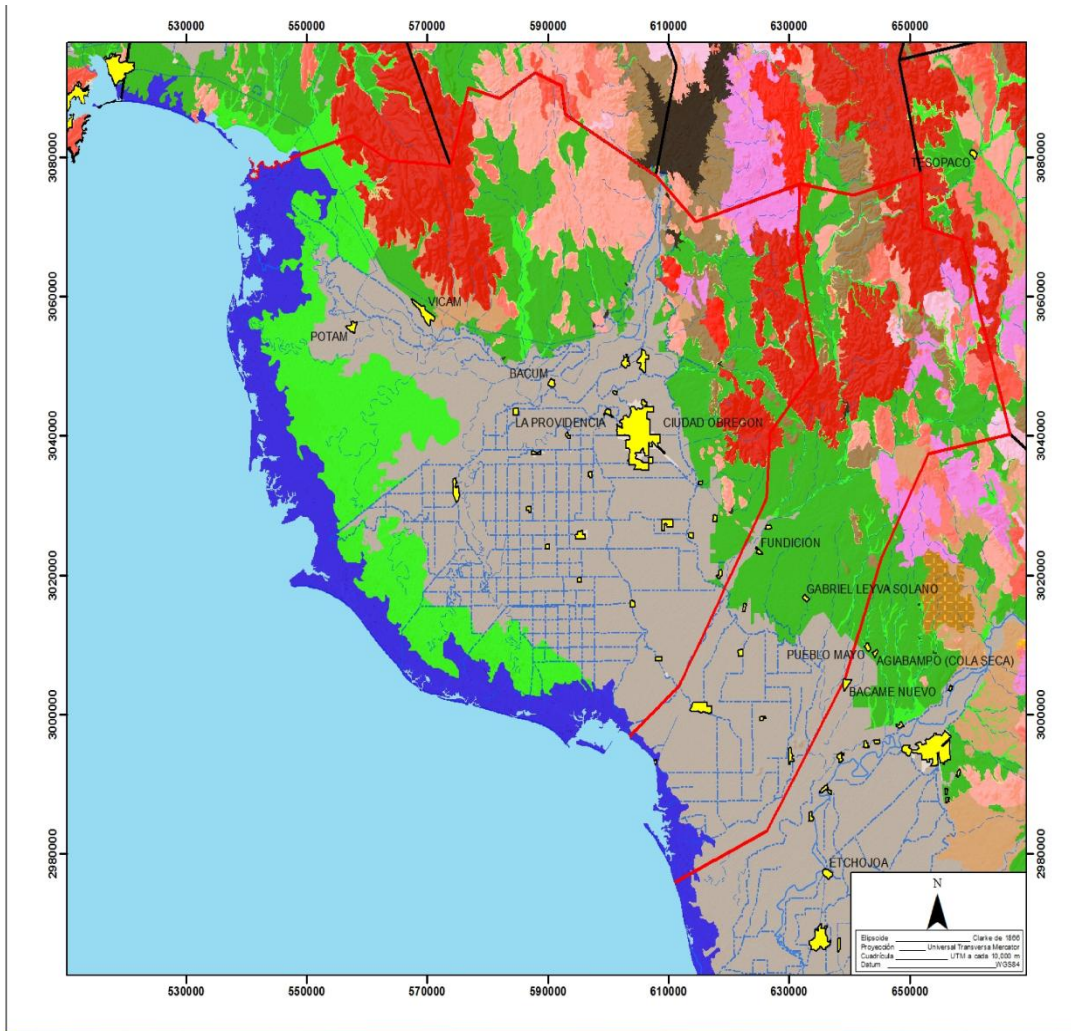
Pldivsup al Qho: Planicie con patrón divergente superior de origen fluvial, formada por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno.

PI Ca al Qho: Planicie costera activa de origen lacustre/marino, formada por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno.

Plan al Qho: Zona cultivada de origen antropogénico, formada por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno.

Ciudad: Zona urbana de origen antropogénico. Ciudad.

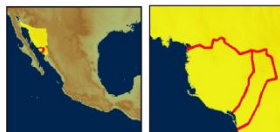
Agua: Cuerpos de agua de origen fluvial.



SIMBOLOGIA

<p> Localidades</p> <p> Sistema Acuífero Valle del Yaqui</p> <p> Acuíferos en Sonora</p> <p>Hidrografía</p> <p> Acueducto subterráneo</p> <p> Acueducto superficial</p> <p> Bordo</p> <p> Canal</p> <p> Corriente intermitente</p> <p> Corriente perenne</p>	<p>Unidades geomorfológicas</p> <p>Origen Volcánico Denudativo</p> <p> Ladera montañosa alta inestable</p> <p> Ladera montañosa alta metaestable</p> <p> Ladera montañosa baja metaestable</p> <p> Lomerío estable</p> <p> Lomerío metaestable</p> <p>Origen Estructural Denudativo</p> <p> Lomerío estable</p> <p> Lomerío metaestable</p>	<p>Origen Denudativo/Volcánico</p> <p> Lomerío estable</p> <p>Origen Denudativo</p> <p> Lomerío estable</p> <p> Piedemonte estable</p> <p> Piedemonte metaestable</p> <p>Origen Antropogénico</p> <p> Zona urbana</p> <p> Zona cultivada</p>	<p>Origen Fluvial</p> <p> Cuerpos de agua</p> <p> Planicie aluvial</p> <p> Planicie con patrón divergente superior</p> <p>Origen Lacustre Marino</p> <p> Planicie costera activa</p>
---	--	---	--

LOCALIZACIÓN REGIONAL



GEOMORFOLOGIA	
Elaboró:	Ela María Tapia Villaseñor
Fecha:	Diciembre de 2012
Escala:	0 5 10 20 30 40 Km



Figura 3.6 Geomorfología



3.6. Hidrografía

El Sistema Acuífero Valle del Yaqui se encuentra ubicado en la Región Hidrológica No. 9; pertenece a la cuenca baja del Río Yaqui y forma parte de una compleja distribución de planicies fluvio-aluviales y deltaicas de río (Figura 3.7).

La cuenca del río Yaqui drena un área aproximada de 69,590 km² hasta la presa Álvaro Obregón (Oviachic) y aproximadamente 72,590 km² hasta su desembocadura en el Golfo de California (Figura 3.8), avanzando a través de elevaciones de terreno de hasta 3,000 m.s.n.m. La precipitación promedio varía de 1,800 mm al año en la parte alta a 200 mm en la parte media y baja. Su gasto medio regulado por el sistema hidráulico del control de presas es de 200,000 m³/mes (Monreal et al., 2003).

El Río Yaqui tiene dos principales tributarios, los cuales nacen en la parte alta de la Sierra Madre Occidental, ambos con corrientes perennes; el primero, con el nombre del Río Papigochic y segundo siendo el Río Sirupa que nace en el Estado de Chihuahua y, aunque cambia de rumbo bruscamente, mantiene una dirección preferencial SE-NW, tomando el nombre de Río Aros al entrar a la jurisdicción de Sonora y uniéndose a la corriente del Río Bavispe, aguas arriba de la Presa Plutarco Elías Calles, para formar el Río Yaqui. El tributario principal, el Río Bavispe, nace también en la misma sierra unos 200 km al norte; entra al estado de Sonora con rumbo preferencial SE-NW y se intersecta con el Río Agua Prieta que nace en el Estado de Arizona, E. U. A., cambiando de rumbo bruscamente a N-S, manteniendo el mismo nombre hasta que a su vez confluye con el Río Aros y toma el nombre de Río Yaqui. A 100 km al norte de esta confluencia y sobre el Río Bavispe se encuentra la presa La Angostura, que almacena hasta 1,270 millones de m³. Ya con el nombre de Río Yaqui, aunque con varios cambios bruscos de rumbo, mantiene una dirección preferencial N-S (Monreal et al., 2003).

Otros afluentes importantes del sistema son los ríos Verde, Tutuaca, Mulatos, Bonito, Sahuaripa, Bacanora, Moctezuma (con el cual forma el embalse de la presa El Novillo) y Tecoripa. El Río Yaqui drena finalmente al Golfo de California en el estero de Santo Domingo, después de su paso por el sistema de presas y aprovechamientos mencionados, así como numerosos repesos construidos sobre afluentes de menor importancia, principalmente para uso agrícola (Monreal et al., 2003). A continuación se presenta la Figura 3.7 y 3.8 donde se observa la Hidrografía para el sistema acuífero Valle del Yaqui, y la cuenca del Río Yaqui que irriga el acuífero de estudio.

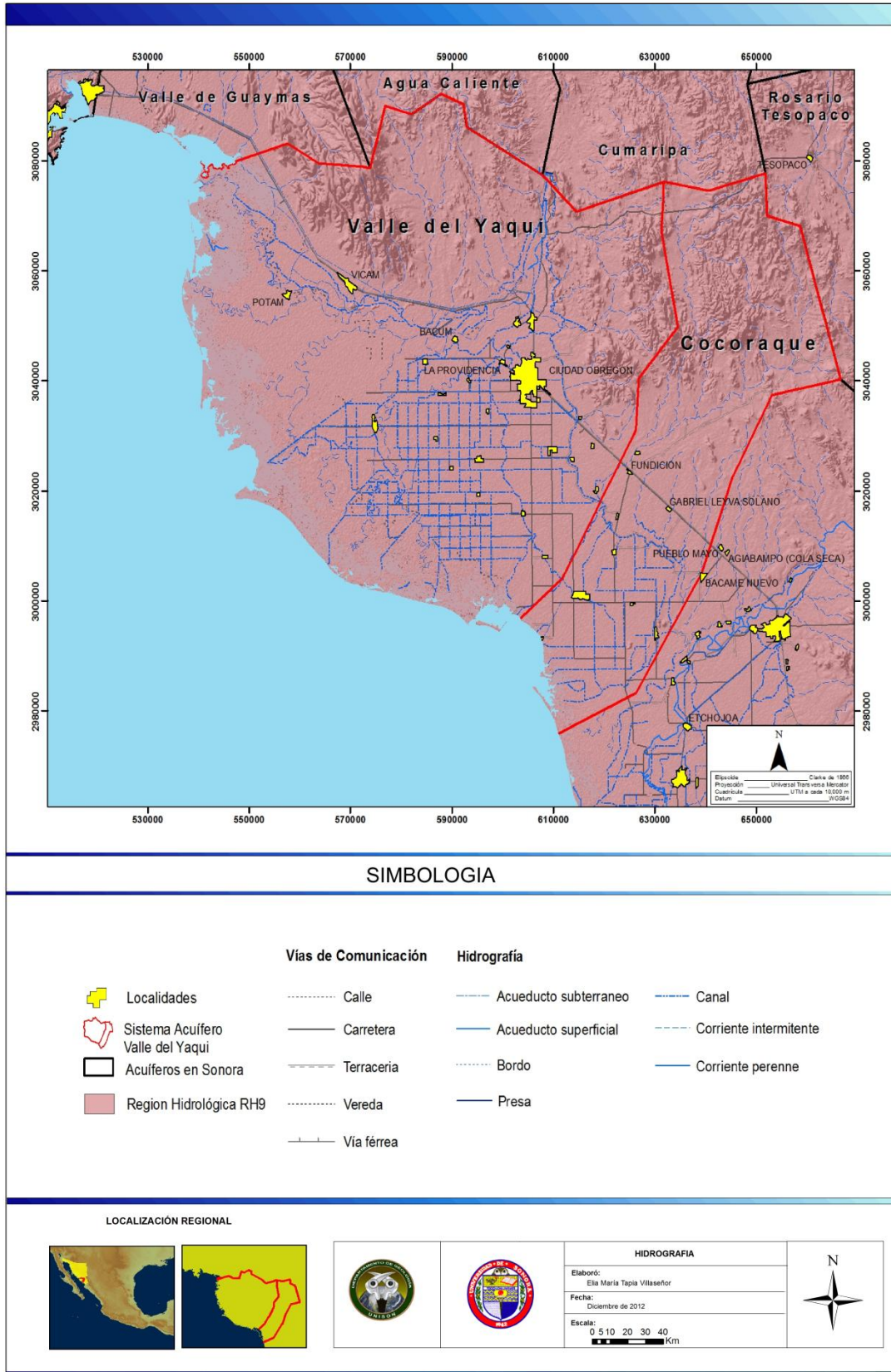


Figura 3.7 Hidrografía en el Sistema Acuífero Valle del Yaqui

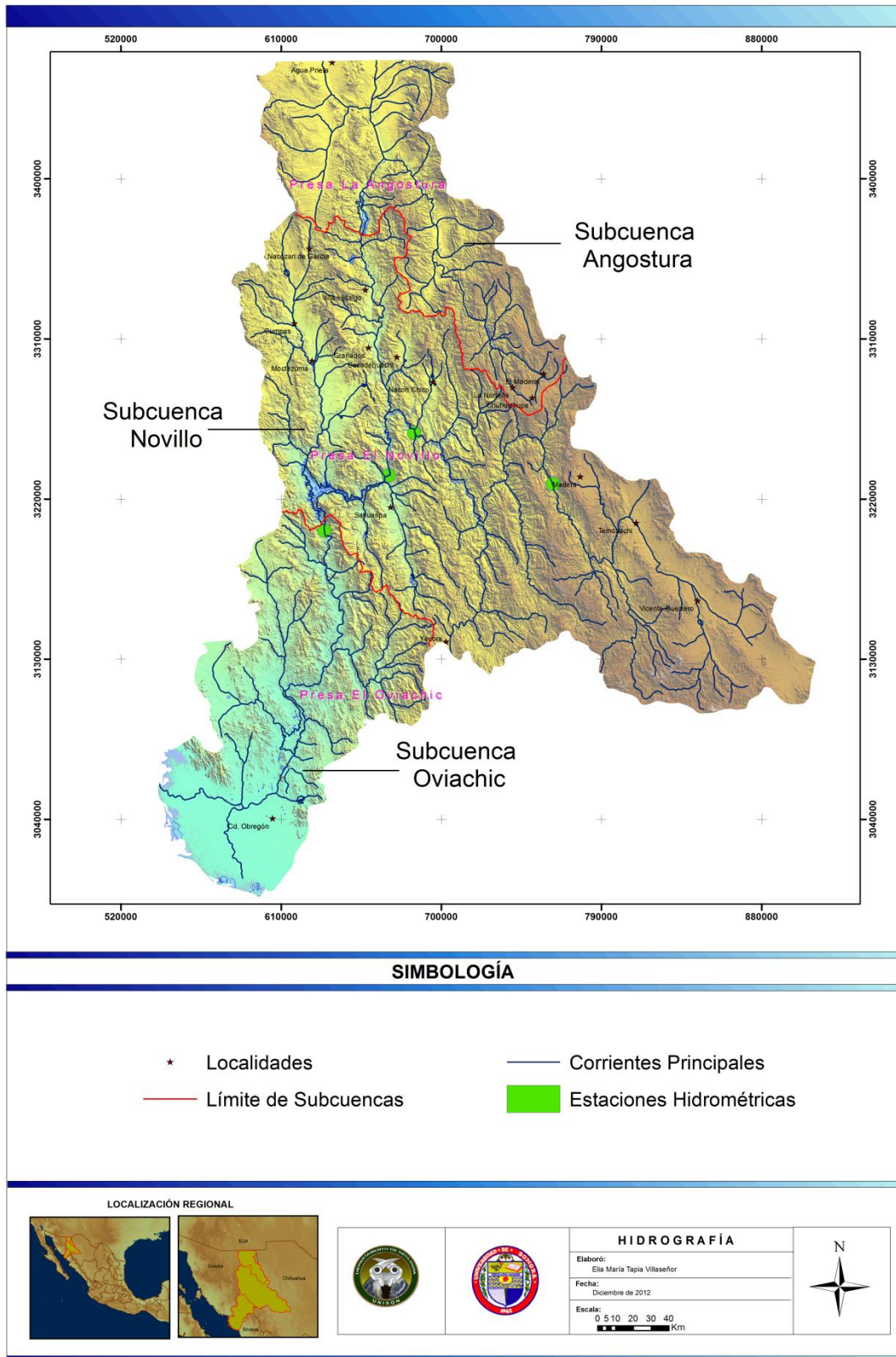


Figura 3.8 Hidrografía en la Cuenca del Río Yaqui



El río Yaqui cuenta con tres presas principales para el almacenamiento, control de avenidas y generación de energía eléctrica: Lázaro Cárdenas (Angostura), Plutarco Elías Calles (El Novillo) y Alvaro Obregón (El Oviachic), las cuales se observan en la figura 3.8 y se describen a continuación.

La Angostura fue construida con el propósito de riego, durante el período de 1936 a 1942 y se sitúa a unos 25 kilómetros al este de la población de Nacozari, Sonora. Tiene una capacidad al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) de 703.4 hm³, mientras que al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) su capacidad es de 1,116.5 hm³.

De su registro histórico, se observa que la presa La Angostura ha tenido bajos almacenamientos durante los últimos años, observándose un descenso a partir de 1994, con una recuperación durante el año 2005, y a principios del año 2007 conserva almacenamientos superiores al NAMO; los almacenamientos mínimos se han registrado en los años 1967 y 1977, con 32.2 hm³ y 17.5 hm³, respectivamente, y en el año 2004 se alcanzaron los 53.7 hm³.

La presa El Novillo fue construida durante el período de 1954 a 1964, con el propósito de generar energía eléctrica y controlar avenidas. Se sitúa a unos 151 kilómetros al oriente de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Tiene una capacidad al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) de 3,020 hm³, mientras que al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) su capacidad es de 3,628.6 hm³.

Al igual que la presa La Angostura, los almacenamientos tienen una tendencia decreciente a partir de 1994, con recuperaciones anuales. Sin embargo, desde las precipitaciones de enero de 2005, los almacenamientos incrementaron sus niveles.

La presa Álvaro Obregón se encuentra ubicada aproximadamente 40 km al norte de Ciudad Obregón, en el municipio de Cajeme, Sonora. Fue construida durante el período de 1947 a 1952, con fines de irrigación en los distritos de riego del río Yaqui, generación de energía eléctrica y control de avenidas.

Tiene una capacidad al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) de 3,226.7 hm³, mientras que al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) es de 4,200 hm³. A partir de 1994 la presa presenta una tendencia descendente, y desde el año 2005 se tiene un incremento en sus niveles de almacenamiento



4. MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL (MCG)

4.1. Simulaciones de los Modelos de Circulación Global (MCG)

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para proyectar el clima en escalas estacionales o anuales, o para generar escenarios de cambio climático. Uno de los de mayor importancia en materia de modelación numérica del clima ha sido el reconocer que las predicciones o proyecciones del clima sólo pueden darse en un sentido probabilístico que refleje la naturaleza del sistema climático. Por ello, un pronóstico del clima se debe construir con varios experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes. El conjunto de todos los experimentos constituye un ensamble, que permite establecer la condición más probable (UNAM, 2008, tomado de Acevedo, 2009). Mediante el uso de computadoras de gran capacidad de procesamiento y la aplicación de diversos métodos de cálculo numérico pueden obtenerse soluciones aproximadas del sistema de ecuaciones de un Modelo de Circulación Global (MCG). De la integración en el tiempo de este sistema se obtiene como solución la evolución temporal y espacial (tridimensional) del sistema climático, en función de las condiciones iniciales y de contorno elegidas y de los valores de ciertos parámetros climáticos (p.e. concentración de CO₂ atmosférico). Esto se denomina experimento numérico, simulación climática ó experimento climático.

Para la elaboración de proyecciones de cambio climático es necesario el uso de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: CO₂, CH₄, N₂O, etc. (Figura 4.1). A partir de los escenarios de emisiones es posible calcular las concentraciones globales de gases efecto invernadero y el forzamiento radiativo correspondiente, lo que lleva a una proyección del incremento de la temperatura global. Estos escenarios consideran una gama de posibles condiciones de desarrollo global para los próximos 100 años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía (Figura 4.2).

Hay dos grandes familias de escenarios de acuerdo con el IPCC. Los escenarios “A” describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los “B” ese crecimiento es más moderado. Los A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2, se considera que el desarrollo se dará más a nivel regional. Estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población, tecnología, economía,



uso del suelo, agricultura y energía) a nivel global y regional. El escenario A1B se basa en la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes; entendiéndose por equilibrada la situación en que no dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares” (IPCC, 2000).

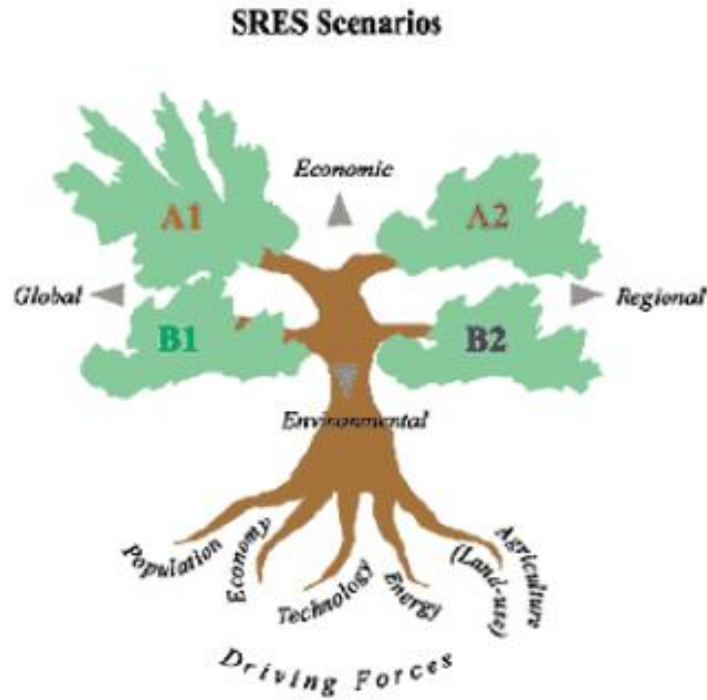


Figura 4.1 Escenarios de Emisiones según Reporte Especial (IPCC-SRES 2000) para el IPCC

Escenario	Población	Economía	Medio ambiente	Equidad	Tecnología	Mundialización
A1B	↷	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↷	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘

Figura 4.2 Esquema del Desarrollo de los Posibles Forzantes según el Escenario Considerado



El concepto de escenario no debe confundirse con el de pronóstico, ya que el objeto de cada uno de ellos es diferente, así como las causas, el manejo y la comunicación de la incertidumbre apropiadas en cada caso. De acuerdo con el IPCC, los escenarios climáticos se definen como “una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto” (IPCC-WGI 2007).

Los escenarios presentados en el IV. Reporte de Evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental para Cambio Climático (IPCC-WGI 2007), se centran en proyecciones regionales de temperatura y precipitación. Sin embargo, la estructura regional se desarrolló para extensiones de nivel casi continental, como fue Norte América, Europa o África.

Normalmente, los estudios de cambio climático utilizan distintos modelos de clima y un conjunto de escenarios de emisión para reflejar el rango de incertidumbre causado por las diferentes suposiciones que se adoptan en cuanto al cambio en las emisiones de gases efecto invernadero, el cambio tecnológico, población y grado de desarrollo económico, entre otros. Así cada escenario representa una alternativa de cómo se podría comportar el clima futuro.

4.2. Descripción de los Modelos de Circulación Global (MCG)

Los MCG son algoritmos matemáticos que representan el sistema climático de la tierra (Acevedo, 2009). Estos modelos se encuentran en el extremo superior de la jerarquía de modelos del clima, son acoplados (atmósfera-océano y suelo) y predicen cambios de las variables en un mayor tiempo. Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos:

La dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum.

La física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación.

Factores como la interacción océano-atmósfera, topografía, y parámetros que representan la dinámica de la vegetación. Estas expresiones son basadas en las leyes



físicas tales como la conservación de energía y masa (Figura 4.3) así como las relaciones empíricas basadas en características y tendencias observadas, tales como fórmulas que relacionen temperatura y humedad con la formación de la nube” (IPCC, 2007).

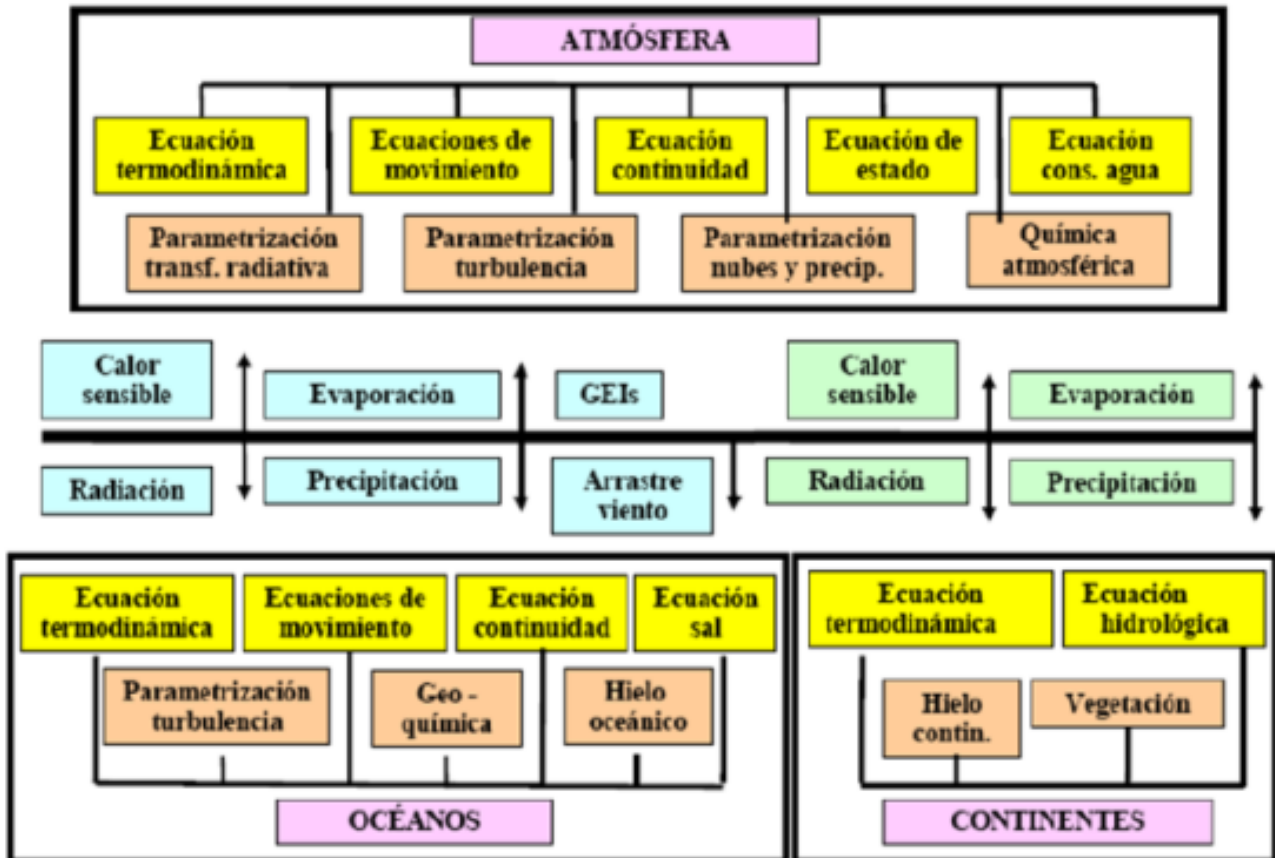


Figura 4.3 Componentes de los Modelos Climáticos Globales (Tomado de Acevedo, 2009)

Para resolver estas ecuaciones los MCG utilizan métodos numéricos discretizando la variación espacial en celdas tridimensionales (x, y, z) y discretizando la variación temporal en intervalos finitos de tiempo (Figura 4.4).

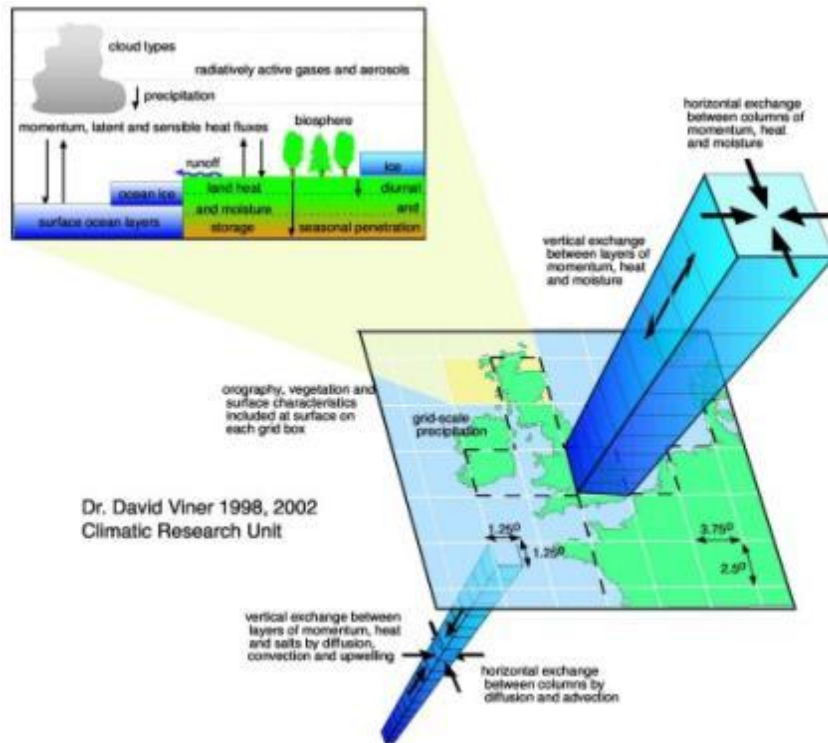


Figura 4.4 Ejemplo de discretización espacial de un Modelo de Circulación Global (Castro, 2007)

De acuerdo con el IPCC (2007), muchos procesos físicos, ocurren en escalas espaciales mucho más pequeñas que la resolución de los modelos y en consecuencia no pueden modelarse y resolverse en forma explícita. Sus efectos medios se incluyen en forma aproximada con un método simple, aprovechando sus relaciones basadas en la física con las variables a mayor escala.

Para poder hacer proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos climáticos que simulen todos los procesos importantes que rigen la evolución futura del clima. Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras. Durante ese período se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y el hielo marino, que luego se fueron integrando gradualmente.



4.3. Características de los Modelos de Circulación Global

Los modelos climáticos utilizados en este estudio se enmarcan dentro del Reporte IV del IPCC del año 2007 (AR4), los cuales se obtuvieron Laboratorio Nacional Lawrence Livermore y la Universidad de Santa Clara (LLNL-Reclamation-SCU).

Dichos modelos, forman parte de la tercera fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3, por sus siglas en inglés) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP, por sus siglas en inglés) y se enlistan a continuación:

Tabla 4.1 Modelos Climáticos Globales Empleados en el AR4-IPCC (Base de Datos CMIP3)

Modeling Group, Country	WCRP CMIP3 I.D.	Referencia Primaria
Bjerknes Centre for Climate Research	BCCR-BCM2.0	Furevik et al., 2003
Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis	CGCM3.1 (T47)	Flato and Boer, 2001
Meteo-France / Centre National de Recherches Meteorologiques, France	CNRM-CM3	Salas-Melia et al., 2005
CSIRO Atmospheric Research, Australia	CSIRO-Mk3.0	Gordon et al., 2002
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-CM2.0	Delworth et al., 2006
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-CM2.1	Delworth et al., 2006
NASA / Goddard Institute for Space Studies, USA	GISS-ER	Russell et al., 2000
Institute for Numerical Mathematics, Russia	INM-CM3.0	Diansky and Volodin, 2002
Institut Pierre Simon Laplace, France	IPSL-CM4	IPSL, 2005
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan	MIROC3.2 (medres)	K-1 model developers, 2004
Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA	ECHO-G	Legutke and Voss, 1999
Max Planck Institute for Meteorology, Germany	ECHAM5/ MPI-OM	Jungclaus et al., 2006
Meteorological Research Institute, Japan	MRI-CGCM2.3.2	Yukimoto et al., 2001
National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM3	Collins et al., 2006
National Center for Atmospheric Research, USA	PCM	Washington et al., 2000
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office, UK	UKMO-HadCM3	Gordon et al., 2000



Para este estudio, se analizaron los resultados de tres modelos de circulación a baja escala: miroc3_2_medres de Japón, ukmo_hadcm3 de Gran Bretaña, y mpi_echam5 de Alemania, pues de acuerdo con Acevedo (2009), se trata de los modelos con más alta resolución espacial atmosférica. La siguiente tabla muestra las características de los modelos de circulación global seleccionados.

Tabla 4.2 Características de los Modelos Climáticos Globales Seleccionados (Base de Datos CMIP3)

Modelo	Resolución atmosférica	Parametrización de las nubes	Parametrización de la convección
miroc3_2_medres	T106(~1.125° x1.125°)	Pronóstico total de agua esquema basado en (Le Treut y Li 1991) con efecto secundario indirecto de aerosoles basado en (Berry 1967)	Pronóstico de cierre de Arakawa-Schubert, sobre la base de (Pan y Randall 1998) con la condición empírica basada en la represión
ukmo_hadcm3	1.25°x1.25°	Esquema de diagnóstico basado en la función de probabilidad triangular. Parametrizados RH-crítico, suponiendo que la anchura de PDF depende de la variación local de la temperatura y la humedad. Esquema del gradiente vertical de nubes. Microfísica: esquema de fase mixta que incluye pronósticos del contenido de hielo ; resuelve ecuaciones físicas para procesos microfísicos (Martin, y otros 2006)	Esquema de flujo de masa basado originalmente en (Gregory y Rowntree 1990), pero con importantes modificaciones incluido el transporte de momentos en la convección basado en la relación de gradiente de flujo, separando convección profunda y superficial y la inclusión de esquema simple de radiación (Martin, y otros 2006).
mpi_echam5	1.875°x1.875°	Ecuaciones de pronóstico para la fases de agua (vapor, líquido, hielo), microfísica de nubes (Lohmann y Roeckner 1996), humedad relativa parametrización de la nubosidad. El esquema de la microfísica incluye los cambios de fase entre los componentes de agua y los procesos de precipitación (autoconversión, acrecentamiento, acumulación). La evaporación, la sublimación de la lluvia, la nieve y el deshielo de la nieve son considerados	Esquema de flujo de masa para la convección superficial, media y profunda (Tiedtke 1989) con modificaciones para la convección profunda de acuerdo a (Nordeng 1994) El sistema se basa en las ecuaciones para el estado de equilibrio de masa, calor, humedad, las nubes y el impulso de un conjunto de corrientes ascendentes y descendentes incluyendo la turbulencia.



5. VALIDACIÓN DE MCG Y PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO YAQUI

En este capítulo, se describirán los resultados de la validación de los tres modelos de circulación global seleccionados para la elaboración de este estudio. Abarcará desde la elaboración de un análisis climatológico histórico para la cuenca del Río Yaqui, el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson para la información observada y proyectada, la selección del modelo de circulación global y la elaboración del grid de validación que permitirá llevar a cabo las correcciones de tendencia.

5.1. Análisis hidroclimatológico histórico

Se determinó la precipitación, temperatura media anual y evapotranspiración real en el área de estudio para el período histórico determinado, con el objetivo de contrastar los resultados de los Modelos de Circulación Global seleccionados. A su vez se determinó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), con el fin de identificar los umbrales de sequía históricos que servirán de base para la determinación de períodos extremos de precipitación para las proyecciones futuras (2010-2099). Los resultados se presentan a nivel subcuenca y se obtuvieron en función de las estaciones climatológicas y los polígonos de Thiessen respectivos. En la figura 5.1 se observa la localización de las estaciones de estudio, los polígonos de Thiessen y las subcuencas analizadas: La Angostura, El Novillo y El Oviachic.

5.1.1. Precipitación media anual

La precipitación es el parámetro más importante dentro del ciclo hidrológico, ya que es el proceso mediante el cual se recibe el recurso en la superficie terrestre para convertirse en escurrimiento, evapotranspiración e infiltración al subsuelo.

La precipitación media total calculada para la subcuenca la Angostura en función de los datos de las estaciones climatológicas y sin considerar el factor de Thiessen, es de 472.6 mm (Tabla 5.1). La máxima se calculó en la estación Guapoca con 699.2 mm y una mínima total de 331.6 mm en Colonia Morelos. Para la subcuenca La Angostura se obtuvo una precipitación media anual de 416 mm utilizando factores de Thiessen para corregir.

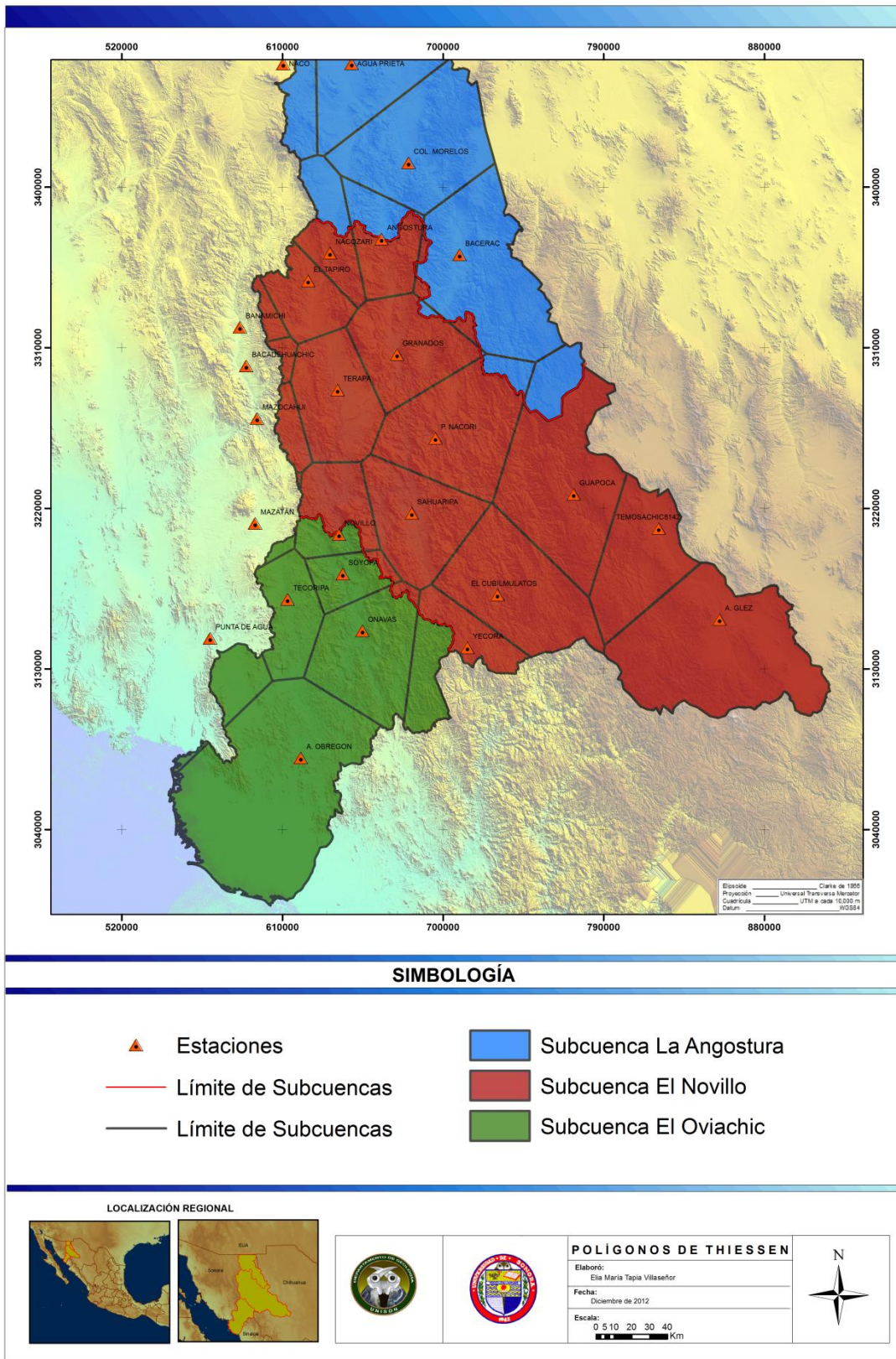


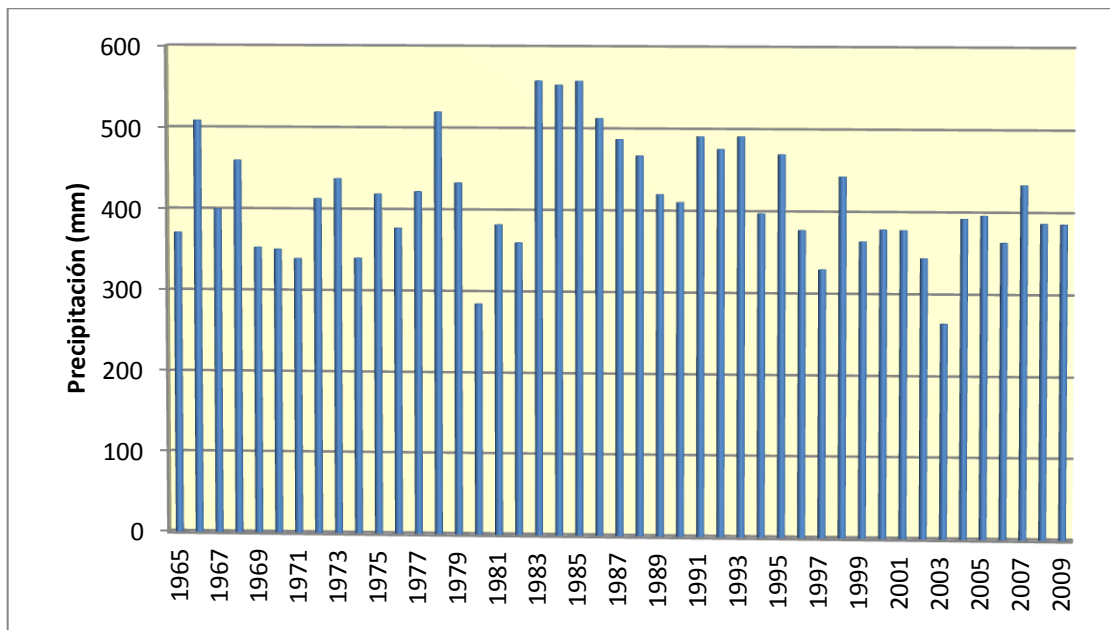
Figura 5.1 Estaciones Climatológicas y Polígonos de Thiessen



Tabla 5.1 Precipitación media total para la subcuenca La Angostura.

ESTACIÓN	AREA (km ²)	FACTOR DE THIESSEN	PPT TOTAL (mm)	PPT MEDIA (mm)
AGUA PRIETA	6918.7	0.29	341.2	99.8
P. NACORI	386.1	0.02	536.2	8.8
BACERAC	5013.6	0.21	527.3	111.8
COL. MORELOS	4627.3	0.20	331.6	64.9
GRANADOS	74.8	0.00	459.2	1.5
GUAPOCA	908.0	0.04	699.2	26.8
NACOZARI	767.8	0.03	550.9	17.9
P. LAZARO C.	776.6	0.03	404.0	13.3
NACO	4180.8	0.18	403.8	71.4
TOTAL	23653.7	1.00	472.6	416.0

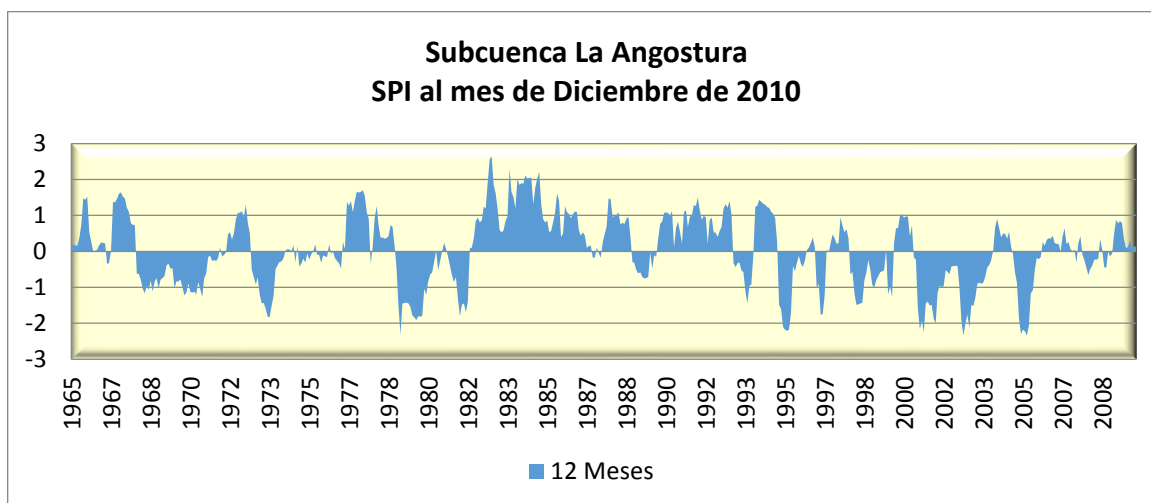
A su vez se presenta el Gráfico 5.1, donde se observa la precipitación media total para la subcuenca la Angostura, para un período que abarca 1965 a 2010, dónde se presentan períodos significativos de sequía durante los años de 1980 y 2003, mientras que las precipitaciones máximas se alcanzaron en los años de 1983, 1984 y 1985.



Gráfica 5.1 Precipitación media total para la subcuenca La Angostura



El siguiente gráfico muestra los resultados del Índice de Precipitación Estandarizado para la subcuenca La Angostura, indicador que permite cuantificar tanto déficits en la precipitación con valores que van de -2.0 a -0.5, como eventos anormalmente húmedos con una desviación positiva de 0.5 en adelante.



Gráfica 5.2 SPI al mes de Diciembre de 2010 para la Subcuenca La Angostura

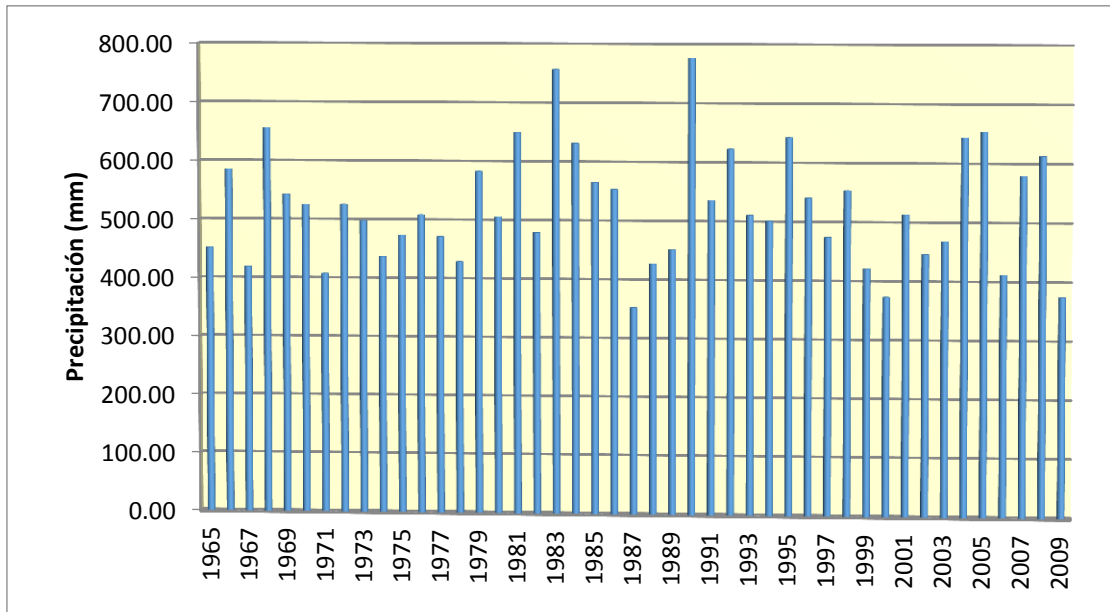
La precipitación media total calculada en función de los datos de las estaciones para la subcuenca El Novillo, sin considerar el factor de Thiessen, es de 590.7 mm (Tabla 5.2). La máxima se calculó en la estación Yécora con 886.2 mm y una mínima de 419.0 mm en la Presa Álvaro Obregón. Se obtuvo una precipitación media anual de 452.0 utilizando factores de Thiessen para corregir.

Tabla 5.2 Precipitación media total para la subcuenca El Novillo

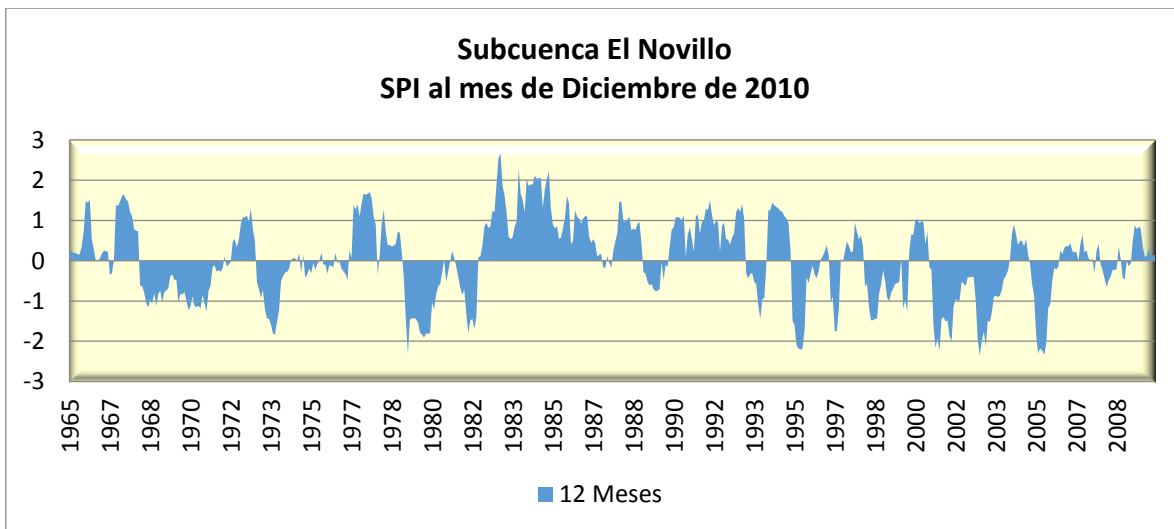
ESTACIÓN	FACTOR DE THIESSEN	PPT TOTAL (mm)	PPT MEDIA (mm)
EL NOVILLO	0.04	643.7	20.8
ONAVAS	0.19	610.7	113.4
A. OBREGÓN	0.49	419.0	157.9
SOYOPA	0.06	642.2	36.9
TECORIPA	0.10	587.8	48.5
YECORA	0.07	886.2	53.4
PUNTA DE AGUA	0.06	426.4	18.4
MAZATAN	0.01	509.6	2.6
TOTAL	1.00	590.7	452.0



A su vez se presenta el Gráfico 5.3, donde se observa la precipitación media total para la subcuenca El Novillo, para un período que abarca 1965 a 2010, dónde se presentan períodos significativos de sequía durante los años de 1987 y 2000, mientras que las precipitaciones máximas se alcanzaron en los años de 1968, 1983, 1990, 2004 y 2005. El Gráfico 5.4 muestra los resultados del SPI para la Subcuenca El Novillo, con una alternancia de períodos secos y húmedos para el tiempo de observación.



Gráfica 5.3 Precipitación media total para la subcuenca El Novillo



Gráfica 5.4 SPI al mes de Diciembre de 2010 para la Subcuenca El Novillo

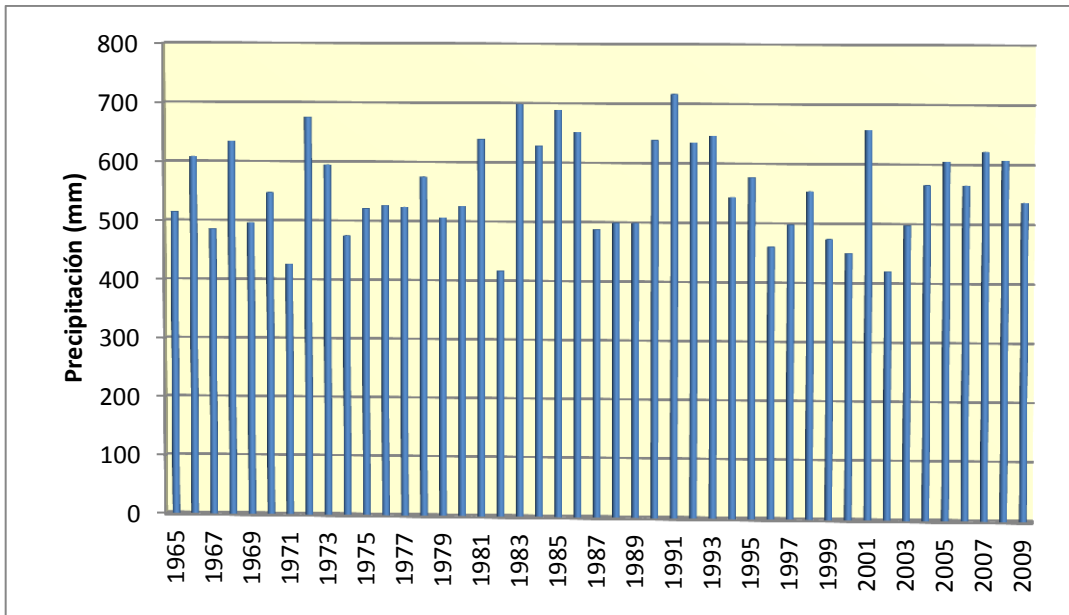


La precipitación media total calculada en función de los datos de las estaciones para la subcuenca El Oviachic, sin considerar el factor de Thiessen, es de 581.2 mm (Tabla 5.3). La máxima se calculó en la estación Yécora con 912.9 mm y una mínima de 422.0 mm en la Presa Lázaro Cárdenas (La Angostura). Se obtuvo una precipitación media anual de 569.3 utilizando factores de Thiessen para corregir.

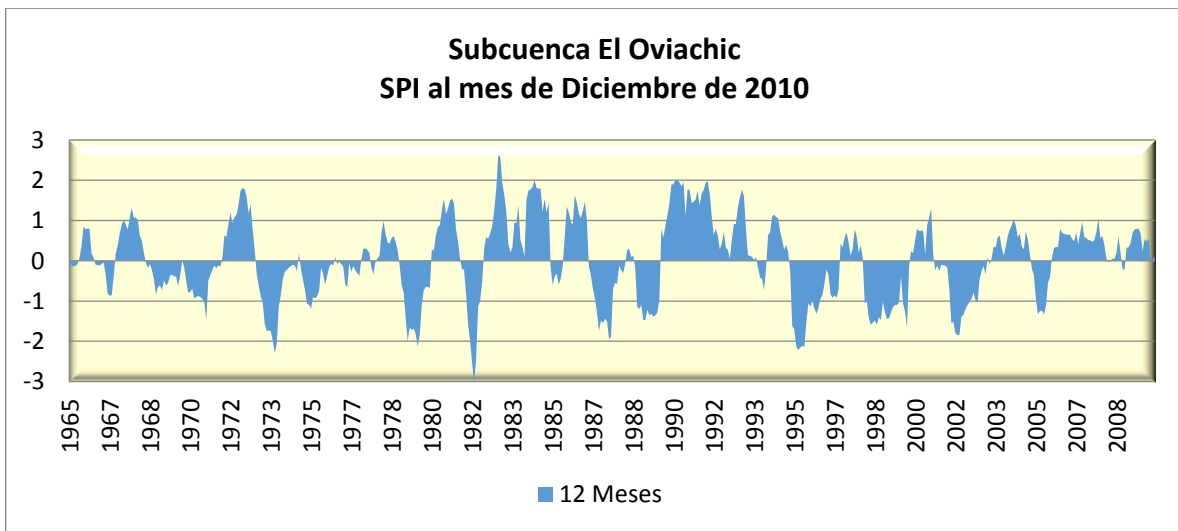
Tabla 5.3 Precipitación media total para la subcuenca El Oviachic

ESTACIÓN	FACTOR DE THIESEN	PPT TOTAL (mm)	PPT MEDIA (mm)
GRANADOS	0.09	459.2	41.0
GUAPOCA	0.16	707.3	111.5
NACUZARI	0.03	575.2	17.2
ONAVAS	0.00	610.7	2.3
P.A.GLEZ	0.21	480.6	100.8
P. ANG. L.C.	0.04	422.0	16.5
P. NACORI	0.13	546.6	68.6
SAHUARIPA	0.09	723.7	67.3
SOYOPA	0.00	642.2	2.9
TEMOSACHIC	0.09	459.1	43.6
TERAPA	0.09	554.7	48.9
YECORA	0.04	912.9	34.4
MAZOCAHUI	0.02	560.2	10.0
BANAMICHI	0.01	482.7	4.5
TOTAL	1	581.2	569.3

A su vez se presenta el Gráfico 5.5 donde se observa la precipitación media total para la subcuenca El Oviachic, para un período que abarca 1965 a 2010, donde se presentan períodos significativos de sequía durante los años de 1982 y 2002, mientras que las precipitaciones máximas se alcanzaron en los años de 1983, 1985, 1991 y 2001. El Gráfico 5.6 muestra los resultados del SPI para la Subcuenca El Oviachic, donde también se observa una alternancia de períodos secos y húmedos para el tiempo de observación.



Gráfica 5.5 Precipitación media total para la subcuenca El Oviachic



Gráfica 5.6 SPI al mes de Diciembre de 2010 para la Subcuenca El Oviachic



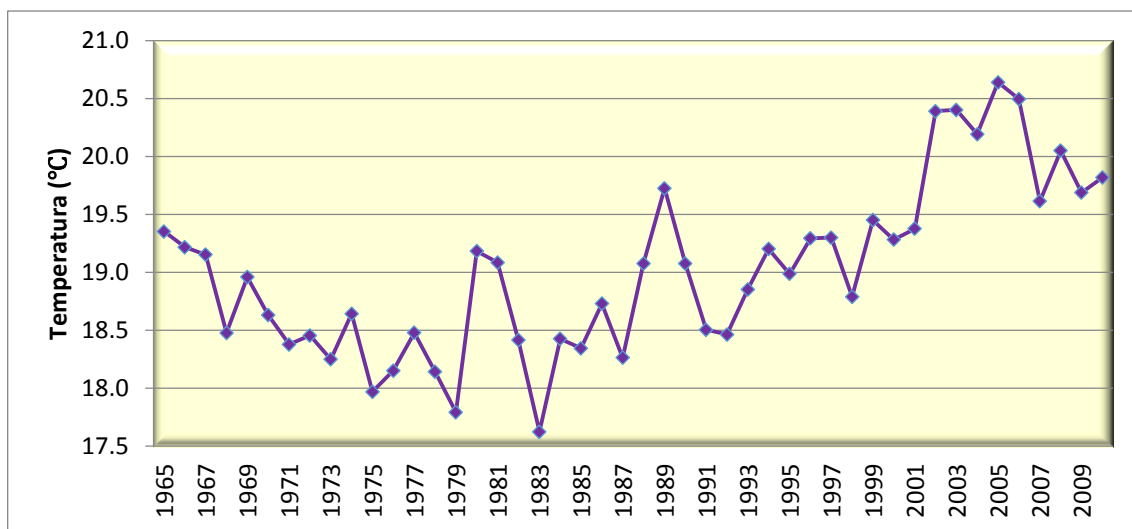
5.1.2. Temperatura media anual

En la subcuenca La Angostura, la temperatura media anual calculada en función de los datos de las estaciones, sin considerar el factor de Thiessen, es de 20.0 °C (Tabla 5.4). La máxima normal se calculó en la estación Paso de Nácori con 22.9°C y la mínima normal fue de 16°C mm en la estación Guapoca. Se obtuvo una temperatura media anual de 19.5°C utilizando factores de Thiessen para corregir.

A su vez se presenta el Gráfico 5.7 donde se observa la temperatura media anual para la subcuenca La Angostura, para un período que abarca 1965 a 2010, con un rango que va desde los 17.5 a los 20.5°C y una tendencia positiva.

Tabla 5.4 Temperatura media anual en la Subcuenca La Angostura

ESTACIÓN	AREA (km ²)	FACTOR DE THIESSEN	TEMP TOTAL (°C)	TEMP MEDIA (°C)
AGUA PRIETA	6918.7	0.29	17.5	5.1
P. NACORI	386.1	0.02	22.9	0.4
BACERAC	5013.6	0.21	19.8	4.2
COL. MORELOS	4627.3	0.20	19.8	4.4
GRANADOS	74.8	0.00	22.6	0.1
GUAPOCA	908.0	0.04	16.0	0.6
NACUZARI	767.8	0.03	20.0	0.6
P. LAZARO C.	776.6	0.03	20.9	0.7
NACO	4180.8	0.18	19.5	3.5
TOTAL	23653.7	1.00	19.9	19.5



Gráfica 5.7 Temperatura media anual para la subcuenca La Angostura

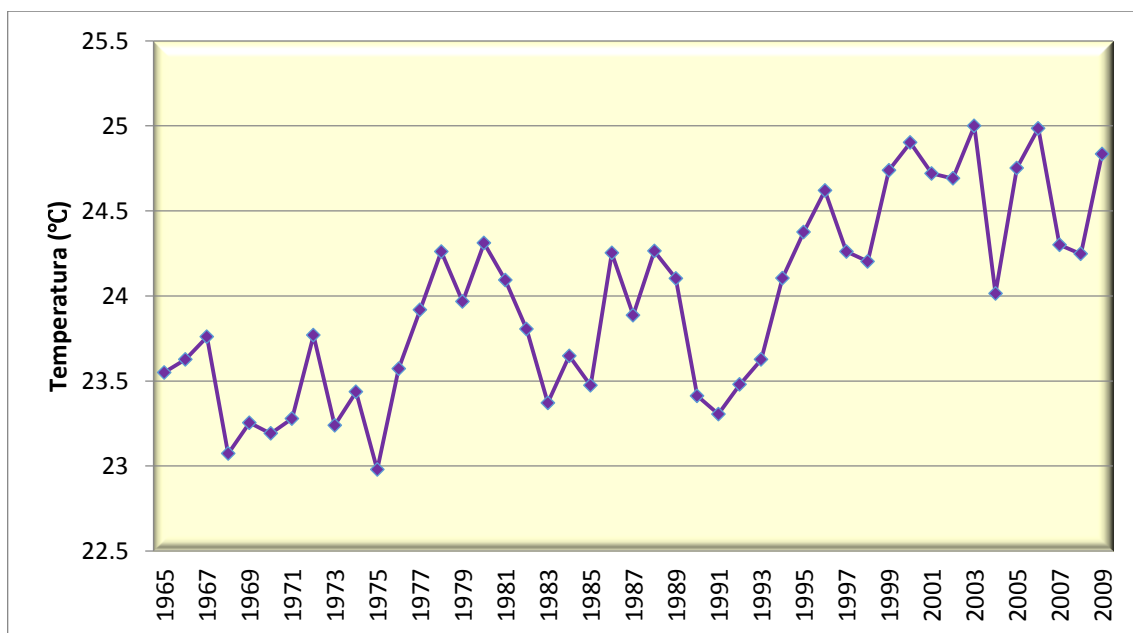


En la subcuenca El Novillo, la temperatura media anual calculada en función de los datos de las estaciones, sin considerar el factor de Thiessen, es de 22.3 °C (Tabla 5.5). La máxima normal se calculó en la estación Álvaro Obregón con 25.7°C y la mínima normal fue de 14.5°C mm en la estación Yécora. Se obtuvo una temperatura media anual de 23.5°C utilizando factores de Thiessen para corregir.

A su vez se presenta el Gráfico 5.8 donde se observa la temperatura media anual para la subcuenca El Novillo, para un período que abarca 1965 a 2010, con un rango que va desde los 22.9 a los 24.9°C.

Tabla 5.5 Temperatura media anual para la subcuenca El Novillo.

ESTACIÓN	FACTOR DE THIESSSEN	TEMP TOTAL (°C)	TEMP MEDIA (°C)
EL NOVILLO	0.04	24.4	0.9
ONAVAS	0.19	24.0	4.5
A. OBREGÓN	0.49	25.7	12.2
SOYOPA	0.06	24.0	1.4
TECORIPA	0.10	22.0	2.2
YECORA	0.07	14.5	1.0
PUNTA DE AGUA	0.06	23.7	1.3
MAZATAN	0.01	20.5	0.1
TOTAL	1.00	22.3	23.5



Gráfica 5.8 Temperatura media anual para la subcuenca El Novillo

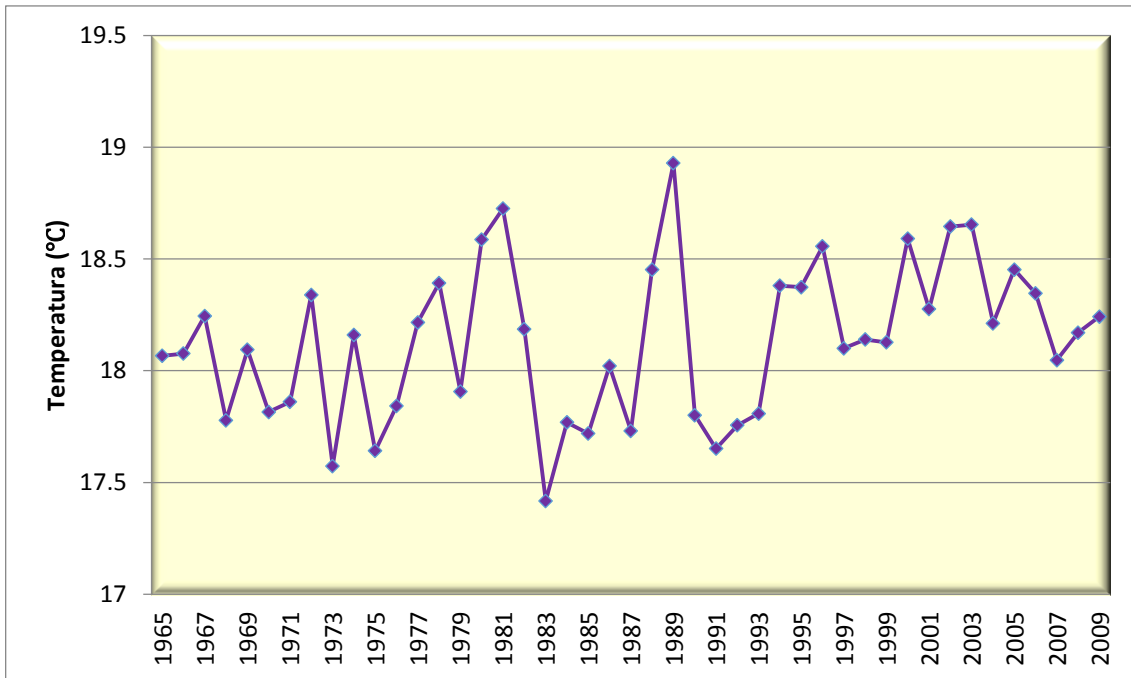


En la subcuenca El Oviachic, la temperatura media anual calculada en función de los datos de las estaciones, sin considerar el factor de Thiessen, es de 22.3 °C (Tabla 5.6). La máxima normal se calculó en la estaciones de Soyopa y Onavas con 24°C y la mínima normal fue de 13.1°C mm en la Presa Abraham González. Para la subcuenca El Oviachic se obtuvo una temperatura media anual de 18.1°C utilizando factores de Thiessen para corregir.

A su vez se presenta el Gráfico 5.9 donde se observa la temperatura media anual para la subcuenca La Angostura, para un período que abarca 1965 a 2010, con un rango que va desde los 17.4 a los 18.9°C.

Tabla 5.6 Temperatura media anual para la subcuenca El Oviachic

ESTACIÓN	FACTOR DE THIESSEN	TEMP TOTAL (°C)	TEMP MEDIA (°C)
GRANADOS	0.09	22.6	2.0
GUAPOCA	0.16	16.0	2.5
NACUZARI	0.03	20.0	0.6
ONAVAS	0.00	24.0	0.1
P.A.GLEZ	0.21	13.1	2.7
P. ANG. L.C.	0.04	20.9	0.8
P. NACORI	0.13	22.9	2.9
SAHUARIPA	0.09	22.5	2.1
SOYOPA	0.00	24.0	0.1
TEMOSACHIC	0.09	12.4	1.2
TERAPA	0.09	21.7	1.9
YECORA	0.04	14.5	0.5
MAZOCAHUI	0.02	21.4	0.4
BANAMICHI	0.01	21.7	0.2
TOTAL	1.00	19.8	18.1

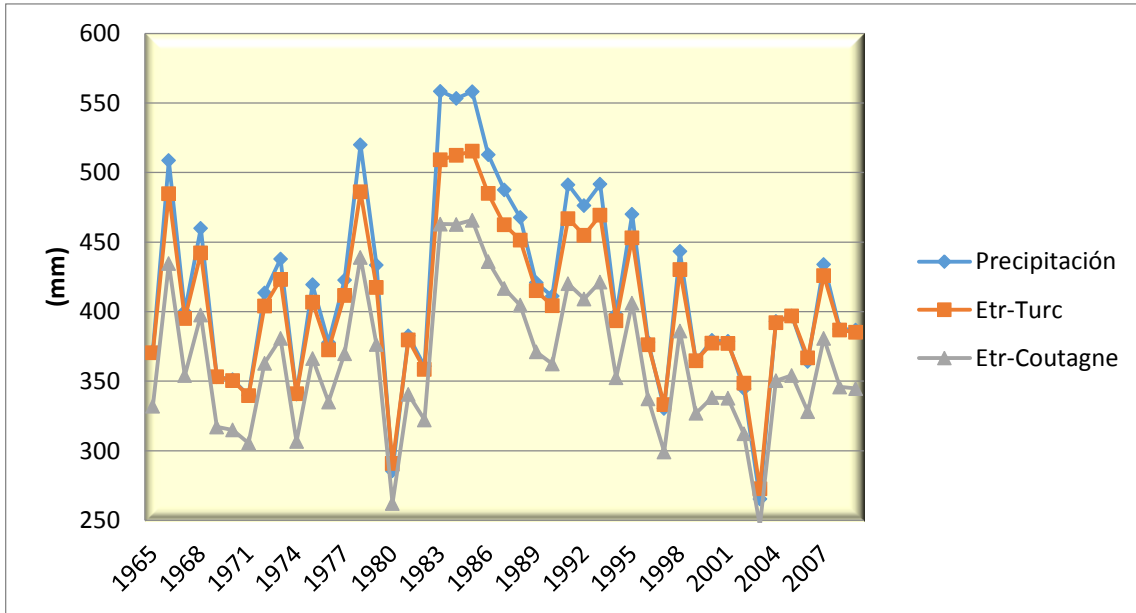


Gráfica 5.9 Temperatura media anual para la subcuenca El Oviachic

5.1.3. Evaporación real media anual

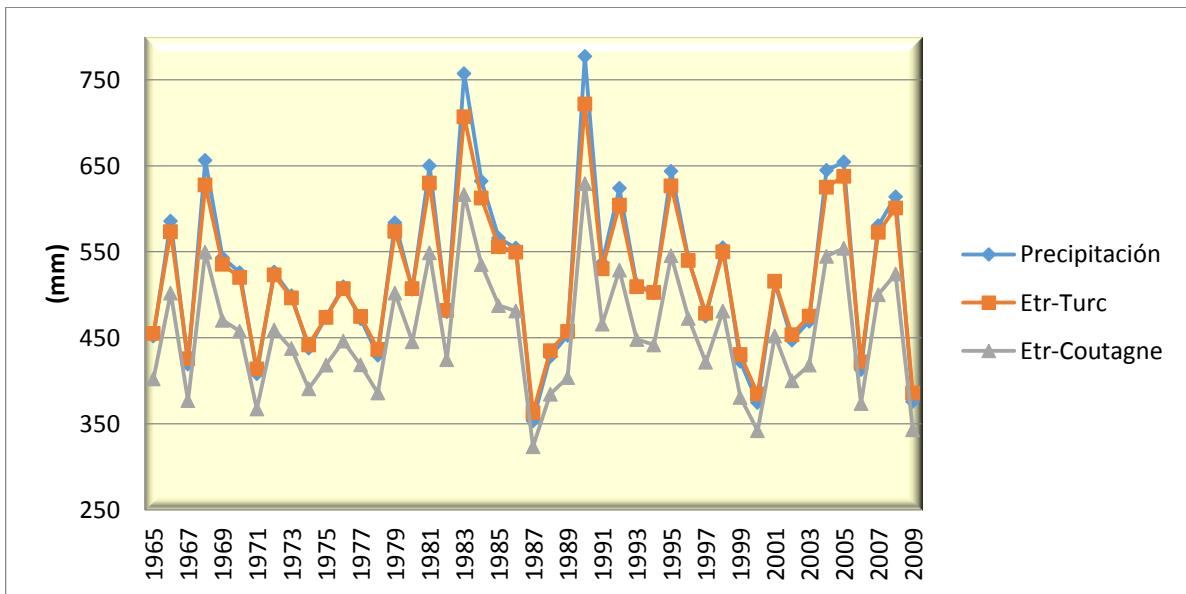
La evaporación es el proceso mediante el cual el agua cambia del estado líquido al gaseoso debido a la radiación solar; se estima que en este proceso del ciclo hidrológico entre el 75 y 90 % de la precipitación total anual que ocurre sobre los continentes, retorna a la atmósfera en forma de vapor. La 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 y se calcula mediante diferentes fórmulas empíricas. En el área de estudio, la evapotranspiración obtenida representa en promedio el 90 % de la precipitación y fue calculada por la fórmula empírica de Turc y Coutagne para las estaciones climatológicas dentro y fuera del acuífero (ecuaciones 2.2 y 2.3).

A continuación se presentan los resultados de evapotranspiración real media anual para la subcuenca La Angostura utilizando las ecuaciones empíricas de Turc y Coutagne. Como se observa en el gráfico 5.10, la evapotranspiración potencial en la zona es bastante alta, representando el 92% de la precipitación total.



Gráfica 5.10 Precipitación y evapotranspiración real anual para la subcuenca La Angostura

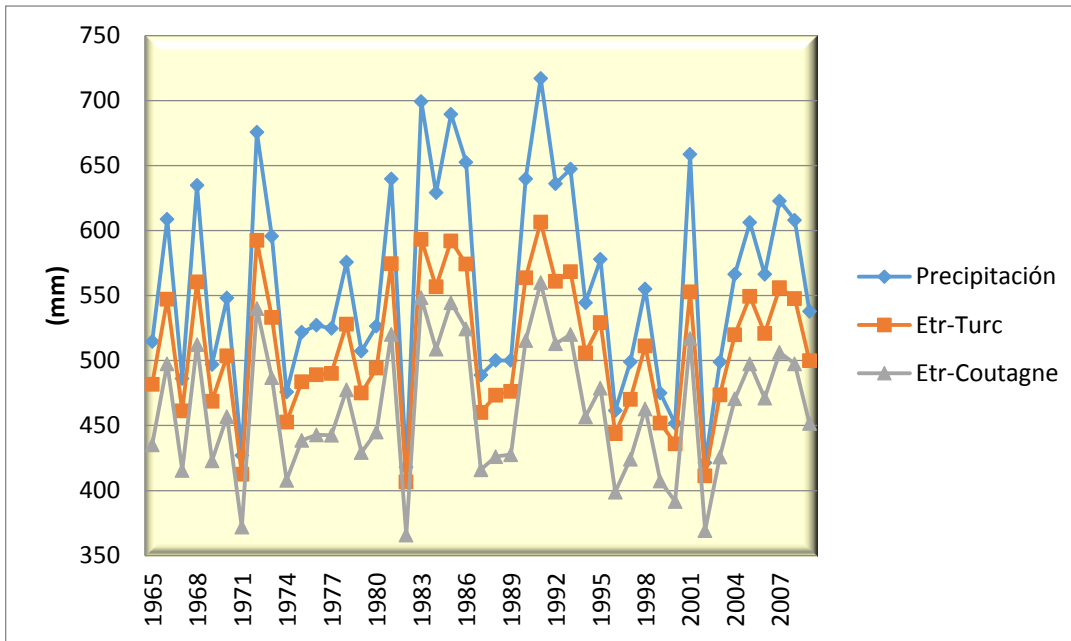
Los resultados de evapotranspiración real media anual para la subcuenca El Novillo utilizando las ecuaciones empíricas de Turc y Coutagne, representan el 93% de la precipitación total y se presentan en el gráfico 5.11.



Gráfica 5.11 Precipitación y evapotranspiración real anual para la subcuenca El Novillo



Los resultados de evapotranspiración potencial para la subcuenca El Novillo representan el 87.1% de la precipitación total para la zona y se presentan en el gráfico 5.12.



Gráfica 5.12 Precipitación y evapotranspiración real anual para la subcuenca El Oviachic

5.2. Validación mensual de los modelos de circulación global

En esta sección, se describirán los resultados de la validación de modelos de circulación global con respecto a la información climatológica histórica determinada en el capítulo anterior para los años de 1965 a 2010.

La asociación entre clima y simulación puede describirse mediante una función matemática que indique su grado de dependencia, como el coeficiente de correlación lineal de Pearson (ecuación 2.1)

La siguiente tabla muestra el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson por Modelo de Circulación Global, que se llevó a cabo utilizando la información de precipitación y temperatura media mensual para las 33 estaciones climatológicas con registros más completos de la cuenca del Río Yaqui (Fig. 5.1).



Tabla 5.7 Coeficiente de Correlación de Pearson por Modelo de Circulación Global

Modelo	Temperatura	Precipitación
miroc3_2_medres	0.84	0.94
ukmo_hadcm3	0.84	0.93
mpi_echam5	0.83	0.92

El valor del coeficiente de correlación de Pearson no depende de las unidades de medida de las variables, está acotado entre -1 y +1; su signo indica la dirección, positiva o negativa, de la asociación lineal y su valor absoluto la intensidad de la misma. En caso de asociación lineal perfecta toma el valor |1|; si no hay asociación lineal toma el valor 0, lo cual no implica que no puede haber asociación de otro tipo.

Como se observa en la tabla anterior, los valores de correlación de Pearson se acercan al valor de 1 que representa una asociación lineal positiva perfecta. Con esta información, y la bibliografía disponible acerca de los modelos de circulación global en el noroeste de la República Mexicana (Arriaga, 2008), en donde se establece que el modelo global UKMO-HADCM3 es uno de los que mejor simula las características del clima observado en la región (consistente con Liang et al., 2008), se seleccionó dicho modelo para presentar las proyecciones de cambio climático.

A pesar de que la validación mensual presenta correlaciones altas y positivas para cada una de las estaciones climatológicas, estudios previos han establecido que los MCG tienen problemas significativos en reproducir las características del monzón ya que la mayoría de los modelos reproducen el cinturón de precipitación y su propagación gradual hacia el norte en el inicio del verano pero sobreestiman la precipitación en la zona núcleo del monzón a través del ciclo estacional y fallan en reproducir la terminación del monzón a principios del otoño (Ruiz-Barradas y Nigam, 2006; Liang et al., 2008; Lin et al., 2008 y Tapia et al., 2010). Por este motivo, además de la evaluación por estación climatológica se presenta un grid de validación estacional con el objetivo de identificar las zonas problemáticas y su porcentaje de error, y así llevar a cabo una corrección de tendencia que permitirá ajustar los datos obtenidos con la información histórica para la zona.

En la columna a de la figura 5.2, se observa el grid observado que se elaboró con las estaciones de CONAGUA para las diferentes estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera). La columna b, muestra el grid de información observada que se utilizó para



ajustar los datos del modelo de circulación global, sin embargo, la resolución de 2° no permite determinar los impactos de fenómenos locales, motivo por el cual se lleva a cabo el proceso de downscaling, en el que se transformará la información a una escala más fina, alcanzando 1/8°. Finalmente se presenta el modelo de circulación global a baja escala (1/8°) para el período histórico de 1985-2005 y el porcentaje de error con respecto a la información histórica de CONAGUA para el mismo período.

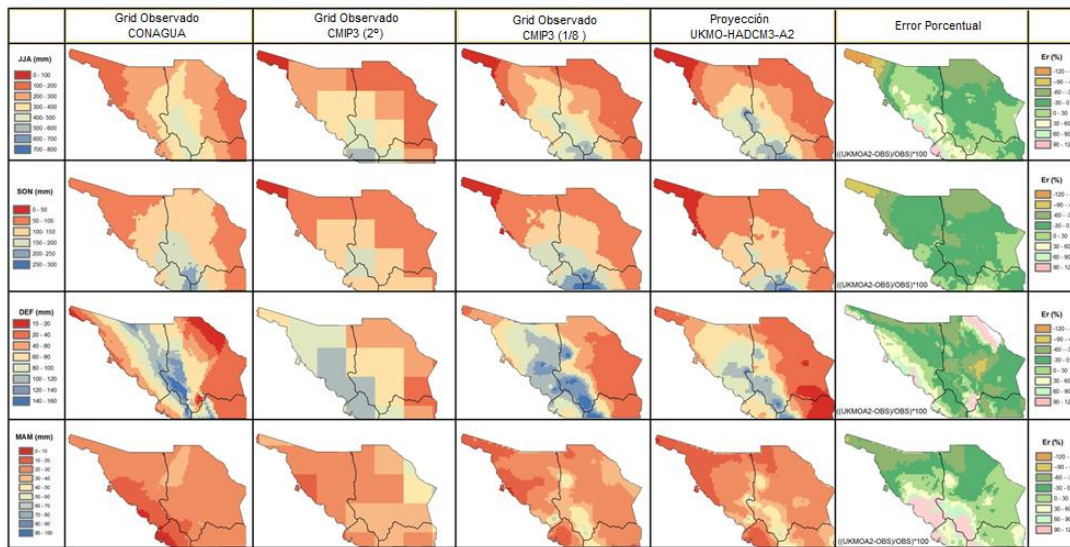


Figura 5.2 Grid de Validación para el Noroeste de México. a) Información climatológica histórica proveniente de las estaciones de CONAGUA. b) Información climatológica histórica proveniente de la base de datos CMIP3 (2°). c) Información climatológica histórica pro



6. PROYECCIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CUENCA DEL RÍO YAQUI

6.1. Escenarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración

Como se ha descrito en capítulos anteriores, la cuenca del Río Yaqui drena el área que abarca el sistema acuífero Valle del Yaqui, motivo por el cual se presentan las proyecciones de cambio climático para las tres subcuencas que abarcan el área de estudio: La Angostura, El Novillo y El Oviachic. Como se indica en la sección anterior, se utilizó el MCG UKMO-HADCM3 a baja escala y los escenarios A2 y B1 para altas y bajas emisiones de gases de efecto invernadero respectivamente.

A continuación se presentan los escenarios UKMO-HADCM3-B1 y UKMO-HADCM3-A2 (favorable) para precipitación y temperatura en las subcuencas de estudio, valores que permitieron calcular la evapotranspiración real anual por medio de la fórmula empírica de Turc y Coutagne (Tabla 6.1 a 6.6 y Gráficos 6.1 a 6.13).

Para una mejor visualización de los posibles cambios en los patrones de precipitación y temperatura se determinó el coeficiente de variación para La Angostura, El Oviachic y el Novillo, durante el período de observación de 1965 a 2010, en contraste con las proyecciones de cambio climático hasta 2099.

El escenario B1 dio como resultado rangos de variación de precipitación que van de 16% a 20% en la subcuenca La Angostura, de 17 a 24% en El Novillo y de 8 a 14% en el Oviachic, para el período de 1965 a 2099, dónde se combina la información observada histórica con la información proyectada. En lo que respecta a la temperatura, se identifican variaciones que van del 2.4% al 4.0% en La Angostura, del 2.3% a 3.2% en el Novillo y del 2.4 al 3.8% en el Oviachic.

En cuanto al escenario menos favorable (A2), se observa un coeficiente de variación que cambia del 16% al 25% en La Angostura, del 18% al 26% en el Novillo y del 14 al 22% en el Oviachic. En lo que respecta a la temperatura, se identifican variaciones que van del 2.7% al 6.4% en La Angostura, del 1.7% al 5.6% en el Novillo y del 2.4 al 3.8% en el Oviachic.



Tabla 6.1 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca Angostura utilizando el MCG UKMO-HADCM3-B1

UKMO-HADCM3-B1														
AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)
1965	371.3	19.4	370.3	332.0	2010	389.1	17.3	378.8	342.0	2055	356.7	17.9	353.4	318.2
1966	508.6	19.2	484.8	434.5	2011	486.5	16.7	451.0	410.9	2056	322.7	18.7	324.9	292.3
1967	399.9	19.2	395.0	354.0	2012	378.0	16.4	366.1	331.8	2057	355.9	18.5	354.4	318.6
1968	459.9	18.5	442.1	397.5	2013	420.0	16.7	401.4	363.8	2058	345.6	18.6	345.4	310.5
1969	353.3	19.0	353.2	317.1	2014	605.8	17.2	535.6	491.4	2059	342.4	17.6	339.9	306.4
1970	351.0	18.6	350.4	314.9	2015	537.8	16.8	487.6	446.0	2060	319.2	19.0	322.1	289.7
1971	339.7	18.4	339.6	305.5	2016	414.7	17.1	398.9	360.8	2061	501.5	18.0	471.3	425.7
1972	413.4	18.5	403.9	362.9	2017	395.3	17.2	383.6	346.5	2062	418.3	18.3	407.3	366.3
1973	437.9	18.3	423.2	380.7	2018	378.6	17.5	370.9	334.5	2063	369.8	18.2	365.5	328.8
1974	340.7	18.6	341.1	306.6	2019	418.4	17.1	402.1	363.6	2064	421.2	18.1	409.0	368.1
1975	419.4	18.0	406.8	366.4	2020	491.9	16.7	454.9	414.6	2065	384.3	17.8	376.9	339.5
1976	377.8	18.2	372.5	335.1	2021	271.7	17.7	275.7	249.2	2066	341.8	19.3	343.5	308.4
1977	422.5	18.5	411.6	369.8	2022	383.8	17.9	376.7	339.2	2067	420.9	18.5	410.4	368.7
1978	520.0	18.1	486.1	439.1	2023	426.5	17.4	410.0	370.3	2068	381.6	18.9	378.1	339.3
1979	433.5	17.8	417.4	376.4	2024	517.5	16.5	471.5	431.4	2069	393.8	18.7	388.2	348.5
1980	285.5	19.2	290.9	262.1	2025	267.7	17.6	271.9	245.8	2070	460.0	18.7	443.3	398.1
1981	382.6	19.1	379.6	340.4	2026	345.6	17.7	343.0	309.1	2071	370.1	18.5	367.0	329.7
1982	360.7	18.4	358.4	322.2	2027	458.6	17.3	434.4	393.3	2072	335.0	19.5	337.8	303.2
1983	558.4	17.6	509.1	463.0	2028	368.0	17.6	362.4	326.6	2073	464.8	18.4	445.7	400.9
1984	553.3	18.4	512.5	462.7	2029	553.7	17.0	500.1	457.2	2074	304.5	17.6	305.9	276.0
1985	558.2	18.3	515.3	465.7	2030	414.3	16.7	396.6	359.5	2075	437.8	18.5	424.3	381.3
1986	512.9	18.7	484.9	436.0	2031	343.8	17.2	340.0	306.9	2076	385.6	18.1	378.9	341.0
1987	487.5	18.3	462.5	416.7	2032	579.9	17.7	524.6	477.4	2077	276.3	18.7	281.4	253.9
1988	467.7	19.1	451.5	404.7	2033	542.7	16.9	491.8	449.6	2078	365.3	19.2	364.5	327.0
1989	420.7	19.7	415.0	371.0	2034	544.2	16.7	491.2	449.9	2079	360.2	18.8	359.0	322.4
1990	411.1	19.1	404.4	362.4	2035	466.2	18.0	444.4	400.7	2080	610.5	18.9	556.6	502.3
1991	491.3	18.5	466.9	420.1	2036	527.4	17.2	484.0	440.7	2081	435.5	18.2	420.8	378.8
1992	476.2	18.5	454.9	409.2	2037	423.5	17.6	408.4	368.5	2082	402.3	18.8	395.7	355.1
1993	491.6	18.9	469.2	421.3	2038	460.5	17.3	436.2	394.8	2083	462.7	18.8	446.2	400.4
1994	398.0	19.2	393.4	352.6	2039	297.2	18.2	300.3	270.8	2084	427.0	19.4	419.3	375.2
1995	470.1	19.0	452.9	406.2	2040	532.3	16.8	483.9	442.3	2085	393.0	18.0	385.0	346.5
1996	378.1	19.3	376.2	337.2	2041	495.4	17.3	462.1	419.3	2086	286.4	19.4	292.0	263.1
1997	330.3	19.3	333.1	299.2	2042	389.0	17.7	380.3	342.8	2087	305.2	19.0	309.2	278.3
1998	443.3	18.8	430.2	386.0	2043	486.2	17.7	458.1	414.2	2088	371.5	18.8	368.9	331.3
1999	364.7	19.5	364.7	326.9	2044	533.2	17.4	489.9	445.4	2089	403.3	19.3	398.4	356.9
2000	379.3	19.3	377.3	338.2	2045	340.5	17.5	338.0	304.8	2090	475.7	18.6	455.1	409.1
2001	378.7	19.4	377.0	337.8	2046	429.3	17.8	414.2	373.4	2091	385.8	18.8	381.5	342.4
2002	344.7	20.4	348.5	312.2	2047	470.7	17.1	442.6	401.4	2092	396.6	20.4	396.1	353.7
2003	265.3	20.4	272.7	246.0	2048	490.3	17.3	458.2	415.6	2093	233.1	20.4	241.0	218.2
2004	392.9	20.2	392.1	350.4	2049	387.9	17.2	377.6	341.0	2094	401.8	19.3	397.0	355.6
2005	396.9	20.6	396.9	354.2	2050	265.8	18.3	270.9	244.7	2095	378.4	18.8	374.9	336.6
2006	364.2	20.5	366.8	328.0	2051	319.4	18.2	320.8	289.0	2096	294.5	19.7	300.2	270.2
2007	433.9	19.6	425.9	380.8	2052	556.2	17.3	504.5	460.1	2097	443.6	19.2	432.4	387.2
2008	387.5	20.0	386.8	345.9	2053	502.0	17.2	465.9	423.4	2098	302.5	19.6	307.7	276.7
2009	386.8	19.7	385.1	344.7	2054	495.2	18.1	467.1	421.5	2099	359.1	19.5	359.9	322.6



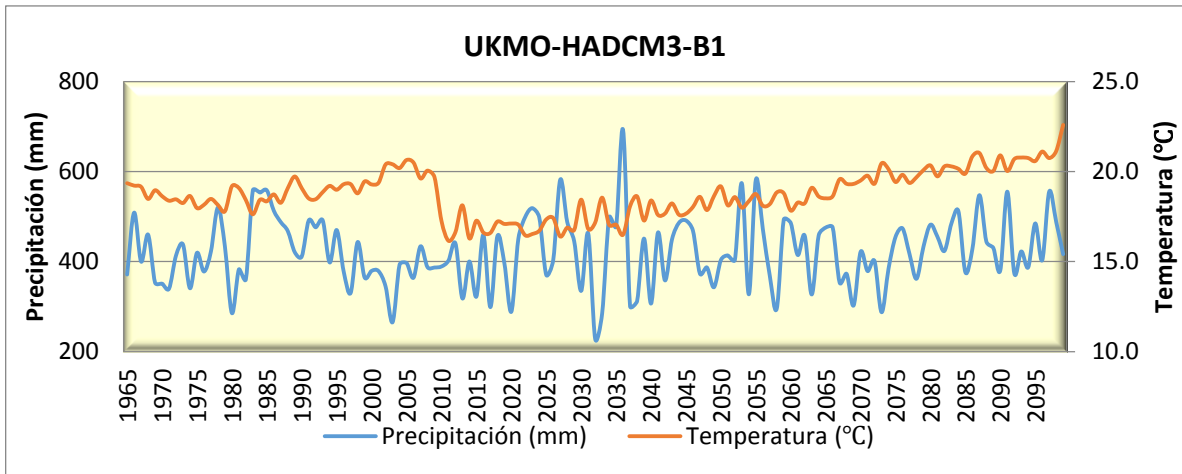
Tabla 6.2 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca El Novillo utilizando el MCG UKMO-HADCM3-B1

UKMO-HADCM3-B1														
AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)
1965	452.0	23.5	455.2	402.1	2010	480.2	24.2	483.1	425.2	2055	619.3	24.6	607.7	529.1
1966	585.5	23.6	573.4	502.1	2011	896.6	23.5	804.4	699.8	2056	600.9	25.0	593.7	516.9
1967	419.5	23.8	425.5	376.8	2012	624.2	23.5	605.0	529.0	2057	630.4	24.8	617.9	537.3
1968	656.4	23.1	627.6	549.5	2013	905.6	23.3	807.4	703.6	2058	479.5	25.4	485.7	426.8
1969	543.2	23.3	535.4	470.4	2014	1100.9	23.5	925.8	804.5	2059	547.5	24.1	542.9	475.6
1970	525.9	23.2	520.1	457.5	2015	989.9	23.8	868.3	752.5	2060	507.4	25.2	510.9	447.9
1971	408.3	23.3	413.9	367.2	2016	753.1	24.2	712.3	617.7	2061	944.2	24.9	857.6	735.9
1972	526.5	23.8	523.1	459.3	2017	549.1	24.1	544.2	476.8	2062	929.9	24.8	847.4	727.7
1973	498.8	23.2	496.5	437.4	2018	594.3	24.1	583.6	509.8	2063	525.3	24.8	525.9	460.7
1974	437.8	23.4	441.8	390.8	2019	731.3	23.8	692.1	601.9	2064	706.9	25.0	682.8	590.6
1975	474.4	23.0	473.8	418.4	2020	805.9	23.9	747.9	649.1	2065	716.9	24.3	684.9	594.5
1976	509.3	23.6	507.1	446.1	2021	470.8	24.4	474.9	418.2	2066	614.0	25.6	608.4	528.1
1977	472.3	23.9	474.9	418.5	2022	667.2	24.6	647.2	562.1	2067	761.8	25.0	727.0	627.1
1978	429.8	24.3	436.3	385.8	2023	827.2	23.9	763.5	662.2	2068	784.8	25.3	747.0	642.8
1979	583.8	24.0	573.8	501.8	2024	909.1	23.2	808.0	704.8	2069	741.0	25.3	712.6	614.5
1980	506.6	24.3	507.3	445.5	2025	525.5	23.8	522.4	458.7	2070	741.7	25.4	714.2	615.4
1981	650.1	24.1	630.0	548.8	2026	512.9	24.4	513.5	450.6	2071	644.0	25.3	632.5	548.5
1982	480.3	23.8	481.9	424.5	2027	854.9	23.7	779.6	677.2	2072	666.2	26.3	657.0	567.0
1983	757.4	23.4	707.0	616.5	2028	589.2	24.4	580.4	506.7	2073	910.4	25.0	836.5	717.7
1984	632.2	23.6	612.4	535.0	2029	844.3	24.2	779.9	674.4	2074	551.2	24.4	547.4	479.1
1985	565.9	23.5	555.9	487.5	2030	739.1	23.5	694.4	605.3	2075	726.7	25.3	701.6	605.3
1986	554.3	24.3	549.6	481.1	2031	614.8	23.9	599.8	523.8	2076	746.8	24.9	713.6	616.5
1987	353.5	23.9	362.7	323.4	2032	887.7	24.9	818.7	703.6	2077	500.7	25.6	506.0	443.6
1988	428.2	24.3	434.8	384.5	2033	950.6	24.1	850.4	734.5	2078	587.6	25.9	586.2	509.6
1989	452.7	24.1	457.3	403.6	2034	889.3	23.7	802.7	697.0	2079	630.4	25.6	622.3	539.6
1990	777.4	23.4	722.1	629.2	2035	679.8	24.3	655.9	570.0	2080	1329.8	25.9	1109.6	930.2
1991	536.8	23.3	530.1	465.8	2036	756.6	23.9	711.7	618.4	2081	830.9	24.9	778.1	669.8
1992	623.8	23.5	604.4	528.6	2037	692.7	24.2	665.3	578.2	2082	630.4	25.3	621.1	539.0
1993	511.8	23.6	509.5	448.0	2038	742.2	24.3	705.3	611.3	2083	765.0	25.8	736.1	632.3
1994	502.2	24.1	502.7	441.8	2039	603.5	24.5	593.7	517.5	2084	726.5	26.3	708.5	608.8
1995	643.8	24.4	626.7	545.4	2040	1062.2	23.7	910.1	788.6	2085	739.8	24.5	704.8	610.4
1996	541.7	24.6	540.0	472.6	2041	703.0	24.3	674.5	585.5	2086	582.5	25.7	580.9	505.4
1997	475.3	24.3	478.7	421.5	2042	829.9	24.4	771.1	666.4	2087	584.6	25.7	582.7	506.9
1998	554.7	24.2	549.8	481.3	2043	870.9	24.5	802.1	691.7	2088	599.0	25.1	592.8	515.9
1999	422.5	24.7	430.4	380.7	2044	789.1	24.4	741.6	641.5	2089	643.0	26.1	635.8	550.0
2000	374.7	24.9	384.6	341.9	2045	653.2	24.3	634.0	551.7	2090	849.1	25.0	792.7	681.5
2001	514.2	24.7	515.7	452.2	2046	920.4	24.6	837.7	720.9	2091	599.4	25.5	595.2	517.3
2002	447.1	24.7	453.6	400.2	2047	900.7	24.1	817.0	706.4	2092	764.8	26.6	742.2	635.4
2003	469.3	25.0	475.1	418.0	2048	927.3	24.1	835.0	721.5	2093	409.4	26.4	420.6	372.1
2004	644.7	24.0	625.1	544.8	2049	682.5	23.7	652.9	569.3	2094	921.7	25.6	853.2	728.2
2005	654.4	24.8	638.0	554.0	2050	564.4	24.6	560.0	489.3	2095	565.9	25.3	564.3	492.1
2006	413.1	25.0	421.9	373.4	2051	585.8	24.5	578.3	504.7	2096	602.6	26.3	601.4	521.6
2007	580.4	24.3	572.5	500.2	2052	847.1	23.8	776.3	673.6	2097	814.8	25.4	771.8	662.6
2008	614.0	24.2	601.0	524.1	2053	841.6	23.9	773.4	670.7	2098	717.9	25.7	697.1	600.7
2009	375.9	24.8	385.8	342.9	2054	970.9	24.8	875.2	750.6	2099	696.6	25.8	679.9	586.5

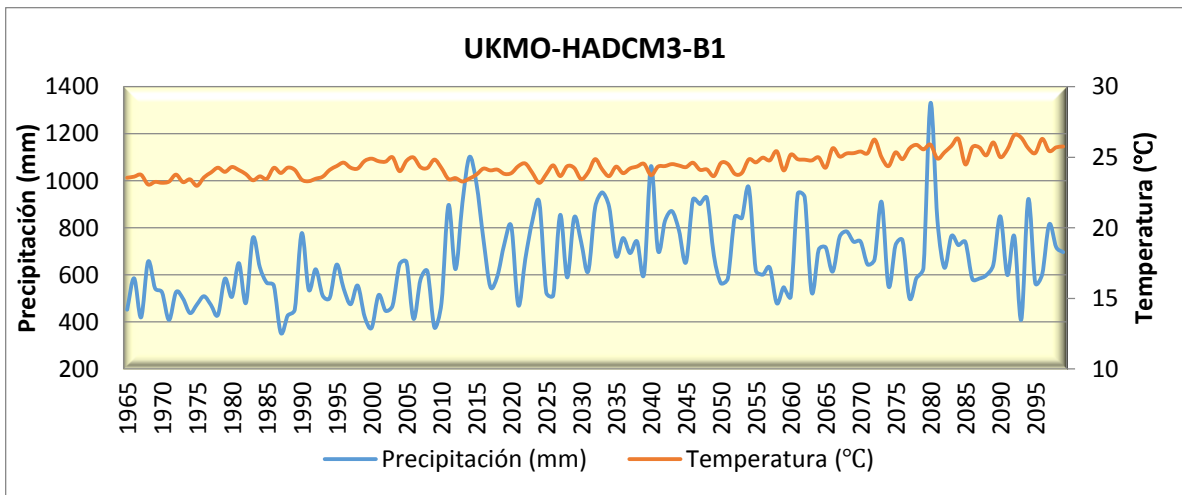


Tabla 6.3 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca El Oviachic utilizando el MCG UKMO-HADCM3-B1

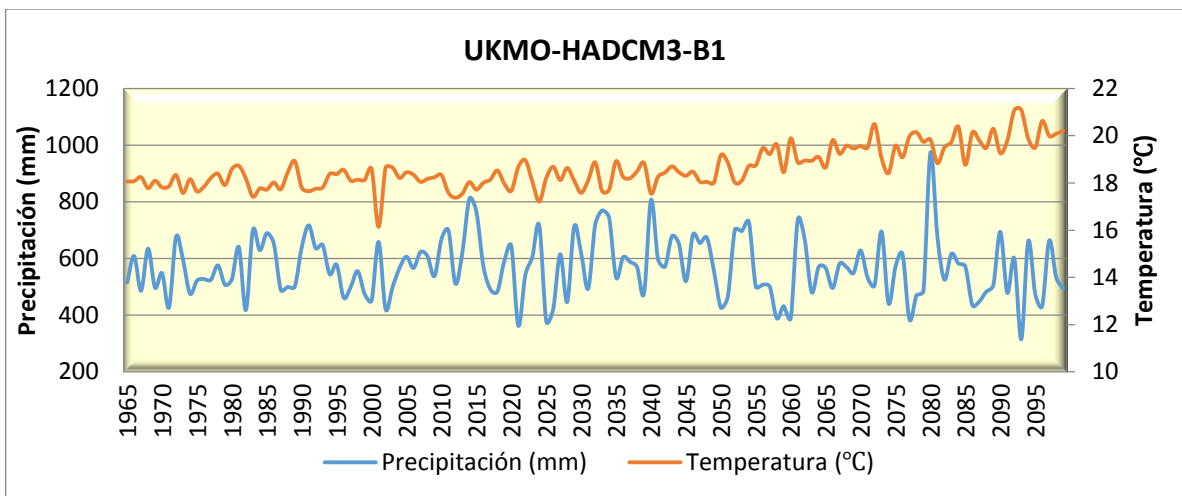
UKMO-HADCM3-B1														
AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)
1965	514.8	18.1	481.8	435.2	2010	668.0	18.3	587.6	535.5	2055	500.5	18.8	475.6	427.4
1966	608.8	18.1	547.2	497.5	2011	699.3	17.6	595.7	549.4	2056	507.5	19.5	485.5	434.5
1967	486.1	18.2	461.3	415.6	2012	511.1	17.4	473.9	430.3	2057	500.4	19.2	478.4	428.7
1968	634.9	17.8	560.4	512.3	2013	622.7	17.6	550.2	503.6	2058	388.8	19.6	386.8	346.2
1969	497.1	18.1	468.7	423.0	2014	811.4	18.0	661.6	613.4	2059	431.6	18.5	419.0	376.6
1970	548.2	17.8	503.7	456.9	2015	765.4	17.7	633.0	586.8	2060	388.9	19.9	387.6	346.7
1971	427.2	17.9	412.7	371.9	2016	572.3	18.0	522.1	473.6	2061	735.7	18.9	635.4	578.5
1972	675.7	18.3	592.4	540.1	2017	491.2	18.1	464.6	419.0	2062	666.3	19.0	594.1	537.7
1973	595.6	17.6	533.3	486.8	2018	482.8	18.5	460.5	414.1	2063	480.9	18.9	461.4	413.9
1974	475.7	18.2	452.8	408.0	2019	591.5	18.0	534.7	486.0	2064	570.1	19.1	530.2	476.5
1975	521.8	17.6	483.7	438.5	2020	643.6	17.7	564.5	517.1	2065	566.4	18.7	523.8	472.4
1976	527.2	17.8	489.1	443.0	2021	362.7	18.7	360.9	324.2	2066	495.6	19.8	478.0	426.9
1977	524.8	18.2	490.2	442.6	2022	540.3	19.0	507.2	455.8	2067	581.7	19.2	539.7	484.8
1978	575.7	18.4	528.0	477.5	2023	604.8	18.1	544.4	494.9	2068	569.3	19.6	533.5	477.8
1979	507.2	17.9	475.0	429.4	2024	716.5	17.2	599.3	556.5	2069	549.2	19.5	517.6	463.6
1980	526.6	18.6	494.3	445.1	2025	378.2	18.2	373.1	335.5	2070	628.4	19.6	575.7	516.8
1981	639.8	18.7	574.4	520.2	2026	421.7	18.7	411.8	369.7	2071	532.6	19.5	505.2	452.3
1982	417.9	18.2	406.6	365.7	2027	614.9	18.1	551.7	501.6	2072	505.8	20.5	489.9	436.1
1983	699.3	17.4	593.3	548.3	2028	446.7	18.6	432.2	388.1	2073	695.2	19.1	613.5	555.8
1984	629.1	17.8	556.7	508.7	2029	712.9	18.1	610.8	560.4	2074	441.1	18.4	426.6	383.5
1985	689.5	17.7	592.1	544.6	2030	618.5	17.6	548.0	501.2	2075	571.3	19.6	534.9	479.1
1986	652.5	18.0	574.2	524.4	2031	493.5	18.1	466.1	420.4	2076	615.3	19.1	561.9	506.3
1987	488.8	17.7	460.1	416.0	2032	718.5	18.9	625.2	568.5	2077	384.6	20.0	384.0	343.4
1988	500.1	18.5	473.3	426.2	2033	769.6	17.7	634.0	588.5	2078	470.4	20.1	459.0	409.3
1989	500.1	18.9	476.4	427.6	2034	744.0	17.7	621.9	575.2	2079	485.9	19.7	469.7	419.7
1990	639.7	17.8	563.7	515.4	2035	533.0	18.9	501.4	450.6	2080	973.8	19.8	776.1	708.7
1991	717.1	17.7	606.5	559.9	2036	604.1	18.3	546.0	495.4	2081	676.0	18.8	598.9	543.0
1992	636.1	17.8	560.9	513.0	2037	588.0	18.2	534.6	484.7	2082	525.5	19.5	499.7	447.3
1993	647.3	17.8	568.4	520.1	2038	569.8	18.5	524.7	474.0	2083	616.3	19.7	568.8	509.7
1994	544.6	18.4	505.8	456.7	2039	477.0	18.8	457.7	410.8	2084	582.1	20.4	549.4	489.4
1995	577.9	18.4	529.3	478.8	2040	806.7	17.6	650.2	606.9	2085	571.1	18.8	528.0	475.9
1996	461.6	18.6	443.8	398.9	2041	597.4	18.3	541.6	491.1	2086	435.0	20.1	428.9	382.7
1997	498.9	18.1	470.1	424.2	2042	571.2	18.4	525.2	474.7	2087	448.3	19.8	438.8	392.0
1998	555.1	18.1	511.4	462.8	2043	678.8	18.7	599.0	544.0	2088	482.9	19.5	466.0	416.8
1999	475.0	18.1	452.0	407.4	2044	651.2	18.5	578.6	525.9	2089	505.7	20.3	488.8	435.4
2000	451.6	18.6	436.0	391.6	2045	520.0	18.3	487.3	439.6	2090	694.0	19.3	615.5	556.2
2001	658.6	18.1	552.7	516.8	2046	684.5	18.5	599.5	546.2	2091	478.7	19.8	464.1	414.5
2002	421.3	18.6	411.3	369.3	2047	654.6	18.1	575.9	525.8	2092	600.4	21.1	568.6	504.3
2003	498.9	18.7	473.7	425.9	2048	673.4	18.0	587.2	537.1	2093	314.8	21.1	321.5	288.4
2004	566.4	18.2	519.9	470.6	2049	556.6	18.0	511.3	463.3	2094	661.5	19.9	601.6	539.4
2005	606.2	18.5	549.3	497.6	2050	426.3	19.2	417.7	374.2	2095	474.6	19.5	459.2	410.8
2006	566.3	18.3	521.0	471.1	2051	466.6	18.9	449.5	403.3	2096	432.3	20.6	428.3	381.6
2007	622.9	18.0	556.0	506.2	2052	701.2	18.0	603.1	553.2	2097	663.1	20.0	603.9	540.9
2008	608.1	18.2	547.7	497.5	2053	696.5	18.1	601.5	551.0	2098	533.5	20.1	509.8	454.7
2009	537.9	18.2	499.9	451.6	2054	729.4	18.7	629.4	573.9	2099	493.7	20.2	478.6	426.6



Gráfica 6.1 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca La Angostura-SRES B1



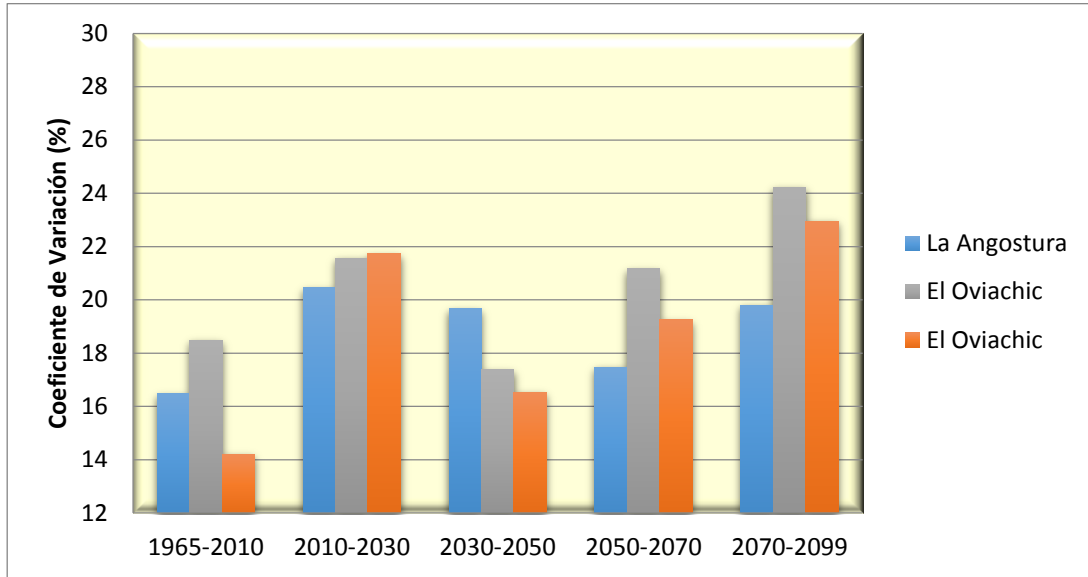
Gráfica 6.2 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Novillo-SRES B1



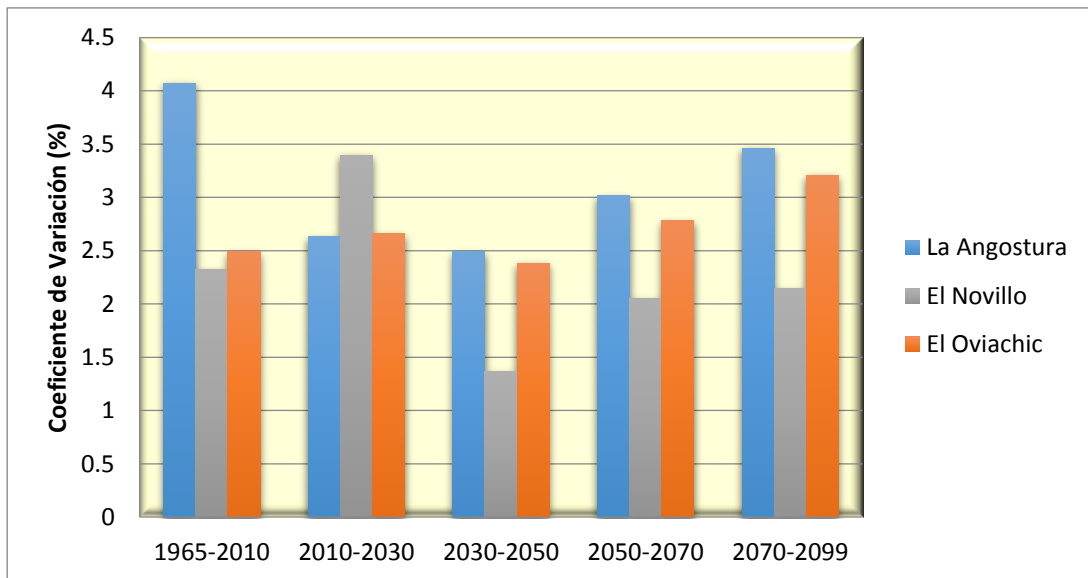
Gráfica 6.3 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Oviachic-SRES B1



Aunado a las proyecciones de precipitación y temperatura, se presenta el coeficiente de variación para precipitación y temperatura para las subcuencas evaluadas, observándose rangos de variación 3.9 a 8.7% para precipitación, y variaciones de temperatura de 0.8 a 2.1% (Gráfica 6.4 y 6.5).



Gráfica 6.4 Coeficiente de Variación para Precipitación-SRES B1



Gráfica 6.5 Coeficiente de Variación para Temperatura-SRES B1



Tabla 6.4 Precipitación, temperatura y evapotranspiración proyectada para la subcuenca Angostura utilizando el MCG UKMO-HADCM3-A2

UKMO-HADCM3-A2														
AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)
1965	371.3	19.4	370.3	332.0	2010	389.1	17.3	378.8	342.0	2055	581.4	18.8	535.2	482.7
1966	508.6	19.2	484.8	434.5	2011	402.1	16.2	384.5	349.3	2056	472.7	18.1	450.1	405.7
1967	399.9	19.2	395.0	354.0	2012	440.4	16.6	416.7	378.4	2057	368.4	18.2	364.4	327.8
1968	459.9	18.5	442.1	397.5	2013	318.0	18.1	319.4	287.7	2058	295.7	18.8	299.9	270.2
1969	353.3	19.0	353.2	317.1	2014	400.3	16.3	383.7	348.3	2059	493.1	18.8	470.1	422.2
1970	351.0	18.6	350.4	314.9	2015	322.2	17.3	321.2	289.9	2060	486.0	17.8	458.6	414.3
1971	339.7	18.4	339.6	305.5	2016	459.3	16.6	430.8	391.8	2061	414.6	18.3	404.1	363.4
1972	413.4	18.5	403.9	362.9	2017	298.7	16.6	298.7	270.2	2062	457.5	18.2	438.9	395.1
1973	437.9	18.3	423.2	380.7	2018	456.1	17.2	432.1	391.3	2063	326.8	19.1	329.4	296.1
1974	340.7	18.6	341.1	306.6	2019	396.8	17.1	384.5	347.5	2064	458.0	18.6	441.3	396.4
1975	419.4	18.0	406.8	366.4	2020	288.4	17.1	290.3	262.4	2065	475.4	18.5	454.6	408.8
1976	377.8	18.2	372.5	335.1	2021	449.9	17.0	426.4	386.4	2066	475.8	18.6	455.5	409.4
1977	422.5	18.5	411.6	369.8	2022	499.3	16.5	458.5	419.0	2067	353.3	19.6	354.7	318.0
1978	520.0	18.1	486.1	439.1	2023	518.6	16.5	472.5	432.3	2068	372.6	19.3	371.5	333.0
1979	433.5	17.8	417.4	376.4	2024	498.0	16.7	459.6	419.0	2069	302.4	19.3	307.1	276.3
1980	285.5	19.2	290.9	262.1	2025	370.3	17.3	363.3	327.8	2070	421.5	19.5	414.8	371.2
1981	382.6	19.1	379.6	340.4	2026	403.5	17.4	391.4	353.3	2071	378.8	19.8	378.3	338.6
1982	360.7	18.4	358.4	322.2	2027	581.8	16.4	511.9	472.4	2072	401.0	19.3	396.5	355.1
1983	558.4	17.6	509.1	463.0	2028	488.0	16.9	453.7	412.8	2073	287.5	20.5	294.4	264.9
1984	553.3	18.4	512.5	462.7	2029	444.9	16.8	420.9	382.0	2074	384.4	20.1	384.3	343.6
1985	558.2	18.3	515.3	465.7	2030	334.8	18.4	335.3	301.6	2075	454.9	19.4	442.6	396.1
1986	512.9	18.7	484.9	436.0	2031	462.8	16.8	434.7	394.9	2076	473.8	19.8	460.2	411.0
1987	487.5	18.3	462.5	416.7	2032	228.6	17.2	234.0	212.2	2077	416.9	19.4	410.4	367.4
1988	467.7	19.1	451.5	404.7	2033	284.7	18.6	289.2	260.8	2078	361.8	19.7	362.7	325.0
1989	420.7	19.7	415.0	371.0	2034	498.2	17.0	462.2	420.3	2079	433.1	20.1	427.0	381.2
1990	411.1	19.1	404.4	362.4	2035	478.0	17.0	447.6	406.3	2080	481.9	20.3	469.4	418.2
1991	491.3	18.5	466.9	420.1	2036	692.1	16.5	575.5	538.0	2081	455.1	19.7	444.2	396.9
1992	476.2	18.5	454.9	409.2	2037	300.7	18.1	303.4	273.6	2082	423.5	20.3	419.4	374.3
1993	491.6	18.9	469.2	421.3	2038	311.6	18.6	314.5	283.1	2083	484.4	20.3	471.3	420.0
1994	398.0	19.2	393.4	352.6	2039	451.1	17.3	428.6	387.8	2084	512.0	20.1	493.1	439.6
1995	470.1	19.0	452.9	406.2	2040	306.6	18.4	309.4	278.8	2085	376.3	19.9	376.3	336.8
1996	378.1	19.3	376.2	337.2	2041	464.6	17.6	440.8	398.4	2086	427.5	20.8	424.8	378.3
1997	330.3	19.3	333.1	299.2	2042	358.1	17.7	353.9	318.9	2087	547.4	21.0	526.8	467.4
1998	443.3	18.8	430.2	386.0	2043	449.1	18.2	432.1	388.9	2088	444.8	20.2	437.5	390.2
1999	364.7	19.5	364.7	326.9	2044	486.1	17.6	457.2	413.7	2089	430.4	20.0	424.5	379.0
2000	379.3	19.3	377.3	338.2	2045	491.2	17.7	461.4	417.5	2090	380.6	20.9	382.8	341.7
2001	378.7	19.4	377.0	337.8	2046	468.6	18.0	446.5	402.5	2091	555.3	20.0	526.3	469.7
2002	344.7	20.4	348.5	312.2	2047	373.1	18.6	369.8	332.2	2092	374.0	20.7	376.3	336.2
2003	265.3	20.4	272.7	246.0	2048	386.9	17.9	379.3	341.6	2093	422.5	20.8	420.2	374.4
2004	392.9	20.2	392.1	350.4	2049	342.8	18.6	343.0	308.3	2094	387.4	20.7	388.6	346.9
2005	396.9	20.6	396.9	354.2	2050	403.4	19.2	398.1	356.7	2095	484.7	20.6	473.0	420.9
2006	364.2	20.5	366.8	328.0	2051	413.7	18.1	402.7	362.4	2096	402.9	21.1	403.7	359.7
2007	433.9	19.6	425.9	380.8	2052	403.6	18.6	396.1	355.7	2097	555.4	20.7	531.3	472.1
2008	387.5	20.0	386.8	345.9	2053	573.8	18.0	523.0	474.6	2098	488.2	21.1	478.5	424.8
2009	386.8	19.7	385.1	344.7	2054	327.1	18.4	328.1	295.4	2099	416.4	22.6	419.9	372.7



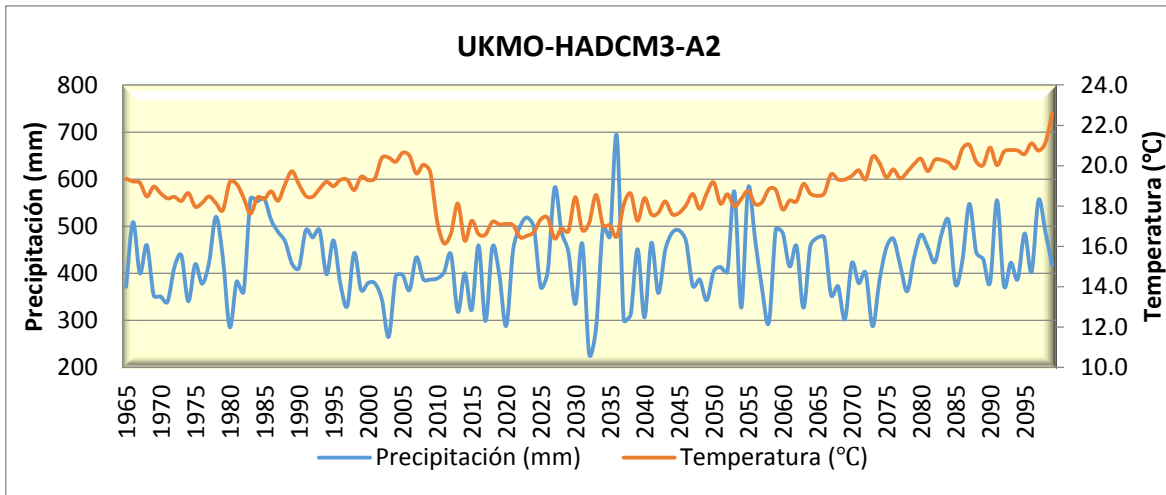
Tabla 6.5 Precipitación, temperatura y evapotranspiración para la subcuenca El Novillo utilizando el MCG UKMO-HADCM3-A2

UKMO-HADCM3-A2														
AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)
1965	452.0	23.5	455.2	402.1	2010	480.2	24.2	483.1	425.2	2055	1133.9	25.4	987.8	838.8
1966	585.5	23.6	573.4	502.1	2011	768.7	23.0	711.3	621.8	2056	1004.2	24.9	897.0	768.6
1967	419.5	23.8	425.5	376.8	2012	813.9	23.4	748.3	651.6	2057	616.8	25.1	608.3	528.8
1968	656.4	23.1	627.6	549.5	2013	609.7	24.9	600.8	522.9	2058	591.6	25.6	588.3	511.7
1969	543.2	23.3	535.4	470.4	2014	726.5	23.2	682.7	596.2	2059	870.6	25.7	816.3	698.0
1970	525.9	23.2	520.1	457.5	2015	678.4	24.0	652.2	567.7	2060	700.1	24.7	675.3	585.1
1971	408.3	23.3	413.9	367.2	2016	831.2	23.6	762.7	663.0	2061	721.4	24.9	694.0	600.1
1972	526.5	23.8	523.1	459.3	2017	559.4	22.8	546.7	480.9	2062	709.2	24.9	684.2	592.0
1973	498.8	23.2	496.5	437.4	2018	946.8	23.8	842.2	729.9	2063	850.6	25.4	797.8	684.2
1974	437.8	23.4	441.8	390.8	2019	766.3	23.6	716.2	623.3	2064	684.0	25.1	664.7	575.5
1975	474.4	23.0	473.8	413.4	2020	552.6	23.5	544.4	477.8	2065	887.7	25.5	826.6	707.2
1976	509.3	23.6	507.1	446.1	2021	741.9	24.2	703.9	610.5	2066	601.9	25.6	597.4	519.2
1977	472.3	23.9	474.9	413.5	2022	908.9	23.3	809.4	705.4	2067	669.4	26.1	658.6	568.6
1978	429.8	24.3	436.3	385.8	2023	960.9	23.6	846.8	735.6	2068	582.1	25.5	579.8	504.7
1979	583.8	24.0	573.8	501.8	2024	895.5	23.9	811.1	702.4	2069	559.2	26.2	561.6	489.1
1980	506.6	24.3	507.3	445.5	2025	659.4	24.3	638.8	555.8	2070	779.3	26.0	749.2	642.5
1981	650.1	24.1	630.0	548.8	2026	812.3	24.2	756.4	654.7	2071	662.1	26.0	652.3	563.5
1982	480.3	23.8	481.9	424.5	2027	948.7	23.3	834.2	727.0	2072	718.0	25.9	698.3	601.4
1983	757.4	23.4	707.0	616.5	2028	772.7	24.1	725.9	629.6	2073	515.0	26.8	522.6	456.7
1984	632.2	23.6	612.4	535.0	2029	953.2	23.7	843.7	732.3	2074	666.4	26.3	657.3	567.3
1985	565.9	23.5	555.9	487.5	2030	478.4	24.8	483.1	424.9	2075	860.0	26.1	813.1	693.9
1986	554.3	24.3	549.6	481.1	2031	693.4	23.9	663.5	577.5	2076	856.4	26.4	813.7	693.2
1987	353.5	23.9	362.7	323.4	2032	495.3	23.8	495.6	436.0	2077	665.9	25.9	654.8	565.8
1988	428.2	24.3	434.8	384.5	2033	525.3	25.1	527.1	461.4	2078	671.2	25.9	659.0	569.2
1989	452.7	24.1	457.3	403.6	2034	814.1	23.9	754.5	654.4	2079	878.4	26.8	835.1	708.9
1990	777.4	23.4	722.1	629.2	2035	871.5	24.4	801.7	691.6	2080	763.4	27.1	745.3	636.6
1991	536.8	23.3	530.1	465.8	2036	1081.6	23.4	912.8	794.4	2081	690.8	26.6	680.4	585.4
1992	623.8	23.5	604.4	528.6	2037	467.7	25.0	473.5	416.8	2082	682.7	27.0	675.3	580.8
1993	511.8	23.6	509.5	448.0	2038	645.3	25.1	632.7	548.9	2083	1006.7	26.8	929.5	783.8
1994	502.2	24.1	502.7	441.8	2039	687.8	23.9	658.5	573.5	2084	752.7	27.2	736.6	629.7
1995	643.8	24.4	626.7	545.4	2040	577.7	24.9	573.1	499.8	2085	717.1	26.4	701.5	602.8
1996	541.7	24.6	540.0	472.6	2041	786.7	24.0	735.2	637.8	2086	585.6	27.6	590.9	512.1
1997	475.3	24.3	478.7	421.5	2042	749.3	24.2	709.7	615.4	2087	954.8	27.2	898.2	757.2
1998	554.7	24.2	549.8	481.3	2043	952.7	24.8	862.8	740.4	2088	758.7	26.9	739.4	632.5
1999	422.5	24.7	430.4	380.7	2044	1039.6	24.3	909.2	782.7	2089	769.7	26.3	743.8	637.4
2000	374.7	24.9	384.6	341.9	2045	883.4	24.9	816.7	701.6	2090	793.8	27.1	770.0	656.5
2001	514.2	24.7	515.7	452.2	2046	702.4	24.7	676.7	586.4	2091	1004.7	26.7	926.8	782.1
2002	447.1	24.7	453.6	400.2	2047	727.0	25.3	701.8	605.5	2092	755.6	27.1	738.5	631.3
2003	469.3	25.0	475.1	413.0	2048	771.7	24.7	731.8	632.1	2093	794.3	27.2	771.6	657.5
2004	644.7	24.0	625.1	544.8	2049	678.6	25.2	661.2	572.3	2094	801.1	27.1	776.1	661.3
2005	654.4	24.8	638.0	554.0	2050	758.2	25.9	731.6	628.3	2095	805.5	27.0	779.4	664.0
2006	413.1	25.0	421.9	373.4	2051	647.7	24.9	633.1	549.8	2096	796.3	27.7	777.0	660.7
2007	580.4	24.3	572.5	500.2	2052	664.7	25.4	650.7	563.3	2097	802.7	27.4	779.9	663.6
2008	614.0	24.2	601.0	524.1	2053	1074.3	24.9	941.7	805.1	2098	885.4	28.0	852.8	719.4
2009	375.9	24.8	385.8	342.9	2054	560.4	24.8	557.2	486.8	2099	663.8	29.1	668.2	573.2

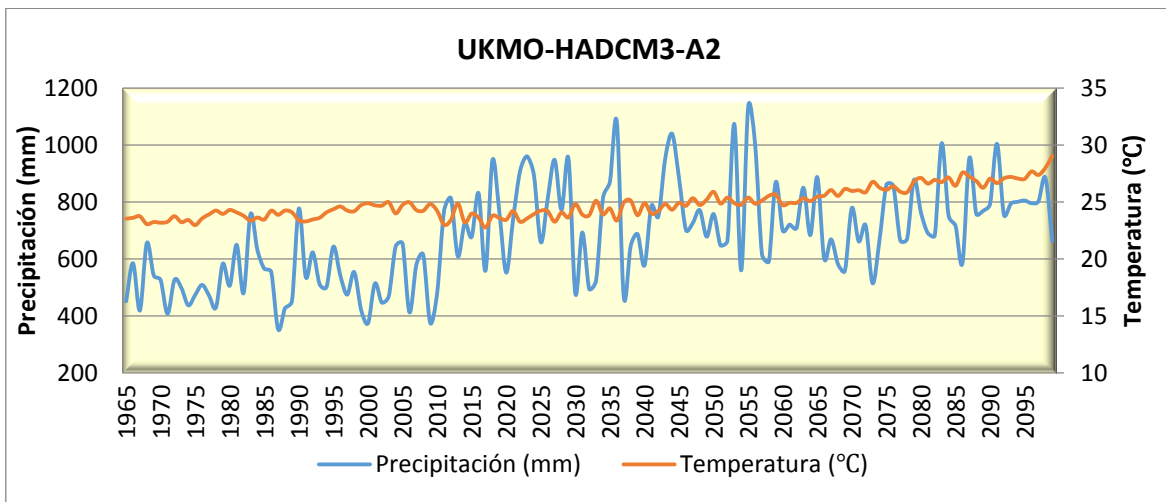


Tabla 6.6 Precipitación, temperatura y evapotranspiración para la subcuenca El Oviachic utilizando el MCG UKMO-HADCM3-A2

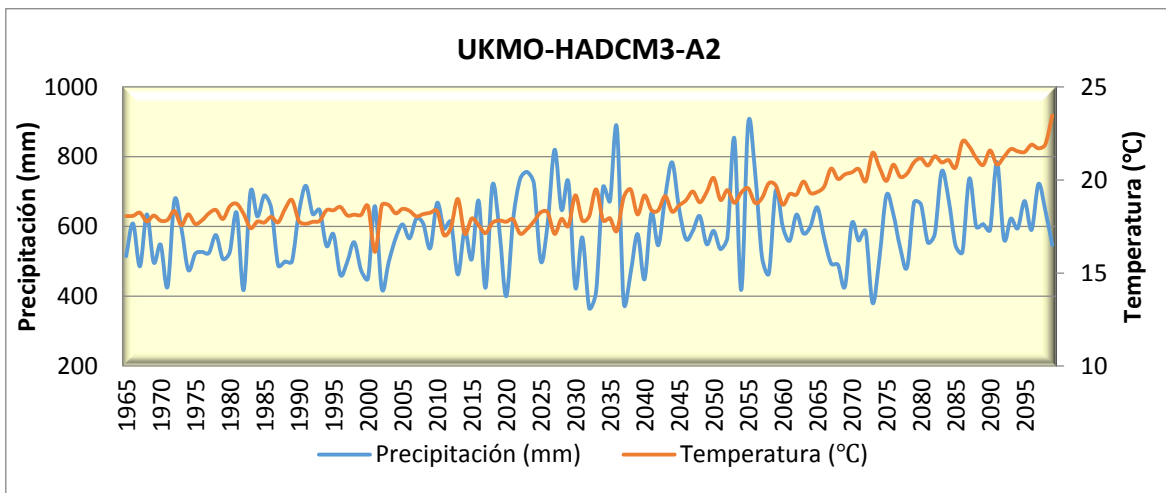
UKMO-HADCM3-A2														
AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)	AÑO	PPT (mm)	TEMP (°C)	Etr-TURC (mm)	Etr-CTG (mm)
1965	514.82	18.1	481.751	435.2	2010	668	18.334	587.61	535.5	2055	895.49	19.557	732.88	668.8
1966	608.773	18.1	547.533	497.5	2011	593.97	17.038	526.56	483.2	2056	756.51	18.773	645.66	589.6
1967	486.057	18.2	461.274	415.6	2012	613.09	17.444	543.01	497.2	2057	513.05	19.033	487.05	437.1
1968	634.905	17.8	560.4472	512.3	2013	462.64	18.984	446.91	400.7	2058	465.8	19.83	453.64	405.1
1969	497.105	18.1	468.7256	423.0	2014	590.32	17.113	525.06	481.3	2059	703.47	19.705	627.12	564.4
1970	548.167	17.8	503.7172	456.9	2015	506.05	17.931	474.30	428.7	2060	600.28	18.678	547.58	494.8
1971	427.16	17.9	412.658	371.9	2016	674.21	17.57	581.29	534.8	2061	559.14	19.244	523.30	469.7
1972	675.74	18.3	592.4012	540.1	2017	424.47	17.149	407.08	368.2	2062	634.45	19.227	576.33	519.2
1973	595.569	17.6	533.2861	486.8	2018	718.99	17.701	608.31	561.3	2063	580.62	19.918	544.55	486.7
1974	475.714	18.2	452.7689	408.0	2019	591.73	17.824	533.36	485.5	2064	599.97	19.312	553.35	497.2
1975	521.82	17.6	483.6629	438.5	2020	400.08	17.76	389.95	351.4	2065	655.21	19.359	591.63	532.9
1976	527.245	17.8	489.1147	443.0	2021	620.81	17.887	552.86	504.2	2066	566.52	19.653	531.97	476.1
1977	524.778	18.2	490.1706	442.6	2022	735.87	17.123	607.99	566.5	2067	494.15	20.618	481.02	427.9
1978	575.705	18.4	527.9677	477.5	2023	756.75	17.362	622.56	579.5	2068	490.33	20.061	475.01	423.7
1979	507.203	17.9	474.9872	429.4	2024	723.68	17.775	611.99	564.4	2069	427.97	20.307	423.38	377.7
1980	526.624	18.6	494.2558	445.1	2025	500.2	18.266	472.20	425.7	2070	609.39	20.415	569.96	507.9
1981	639.8	18.7	574.4391	520.2	2026	610.37	18.259	550.11	499.4	2071	559.78	20.59	533.69	474.7
1982	417.944	18.2	406.5547	365.7	2027	820.35	17.107	647.82	609.7	2072	586.21	19.934	548.82	490.5
1983	699.339	17.4	593.2961	548.3	2028	647.91	17.913	570.08	521.0	2073	381.03	21.463	384.51	342.9
1984	629.056	17.8	556.7045	508.7	2029	726.93	17.538	610.05	564.6	2074	510.95	20.675	495.17	440.3
1985	689.464	17.7	592.1019	544.6	2030	424.53	19.179	416.17	372.8	2075	689.56	19.954	621.16	557.2
1986	652.548	18.0	574.2425	524.4	2031	568.92	17.829	518.14	470.7	2076	635.9	20.825	593.02	527.1
1987	488.85	17.7	460.1167	416.0	2032	366.39	18.057	362.29	326.0	2077	539.29	20.174	514.89	459.0
1988	500.091	18.5	473.3349	426.2	2033	413.66	19.502	408.08	365.2	2078	483.72	20.353	471.04	419.6
1989	500.112	18.9	476.3703	427.6	2034	712.3	17.843	606.76	558.5	2079	669.16	20.955	618.20	549.2
1990	639.674	17.8	563.6599	515.4	2035	672.75	17.947	585.49	536.1	2080	663.52	21.164	616.25	546.5
1991	717.077	17.7	606.5076	559.9	2036	884.31	17.264	678.30	641.2	2081	554.19	20.781	530.59	471.4
1992	636.117	17.8	560.9279	513.0	2037	381.76	19.079	378.87	339.8	2082	578.76	21.281	553.33	490.1
1993	647.314	17.8	568.4251	520.1	2038	467.69	19.496	453.59	405.7	2083	758.09	20.95	678.37	604.1
1994	544.576	18.4	505.8344	456.7	2039	578.69	18.152	527.80	478.5	2084	677.88	21.069	625.55	555.3
1995	577.854	18.4	529.2908	478.8	2040	448.81	19.175	436.50	391.0	2085	545.68	20.667	523.12	465.1
1996	461.583	18.6	443.8466	398.9	2041	638.66	18.39	569.91	517.8	2086	527.25	22.073	516.03	455.8
1997	498.884	18.1	470.1063	424.2	2042	546.5	18.379	507.21	458.0	2087	737.93	21.794	675.51	596.5
1998	555.116	18.1	511.3546	462.8	2043	685.47	19.134	608.52	550.4	2088	599.71	21.183	568.90	504.2
1999	474.961	18.1	451.987	407.4	2044	784.01	18.303	652.71	601.2	2089	607.28	20.81	571.70	508.0
2000	451.576	18.6	435.9662	391.6	2045	652.04	18.638	581.33	527.3	2090	590.46	21.591	564.71	499.3
2001	658.584	18.1	552.7371	516.8	2046	564.08	18.91	524.22	471.8	2091	785.1	20.839	693.92	619.3
2002	421.345	18.6	411.3132	369.3	2047	588.1	19.385	545.55	489.7	2092	564.52	21.241	541.80	480.1
2003	498.867	18.7	473.689	425.9	2048	630	18.806	568.88	514.4	2093	622.82	21.666	590.41	521.6
2004	566.406	18.2	519.8892	470.6	2049	549.41	19.357	516.93	463.4	2094	595.1	21.544	568.01	502.3
2005	606.19	18.5	549.3322	497.6	2050	587.89	20.115	551.55	492.3	2095	673.39	21.511	626.78	554.4
2006	566.275	18.3	520.9776	471.1	2051	535.09	18.934	503.10	452.1	2096	590.52	21.898	566.89	500.3
2007	622.87	18.0	555.9584	506.2	2052	569.1	19.458	532.34	477.2	2097	722.25	21.706	663.60	586.4
2008	608.087	18.2	547.6915	497.5	2053	853.16	18.776	696.34	640.9	2098	645.66	21.92	609.92	537.9
2009	537.917	18.2	499.9303	451.6	2054	418.05	19.328	411.22	368.2	2099	547.25	23.472	539.91	474.0



Gráfica 6.6 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca La Angostura-SRES A2



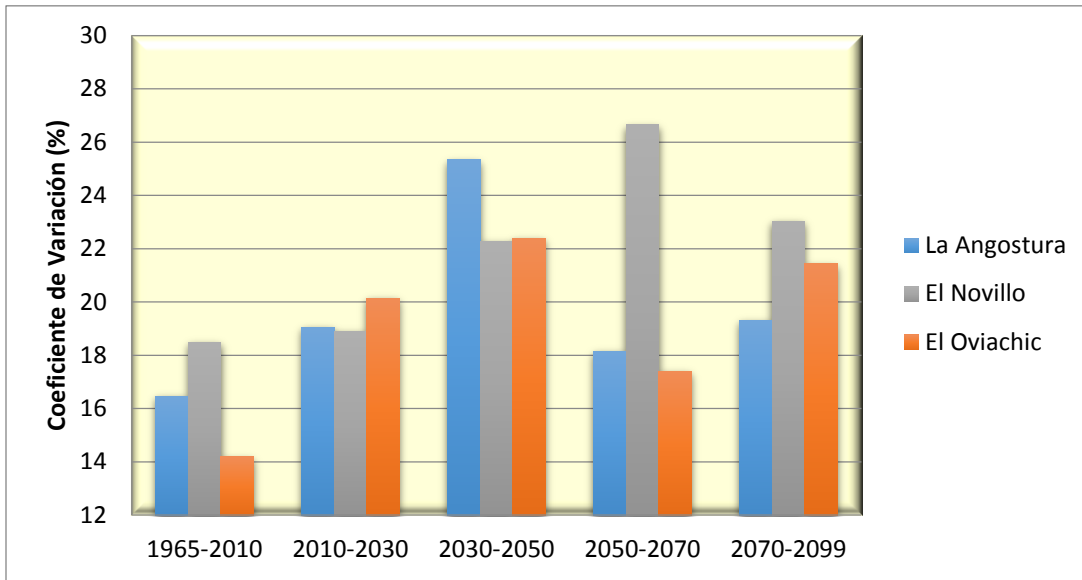
Gráfica 6.7 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Novillo-SRES A2



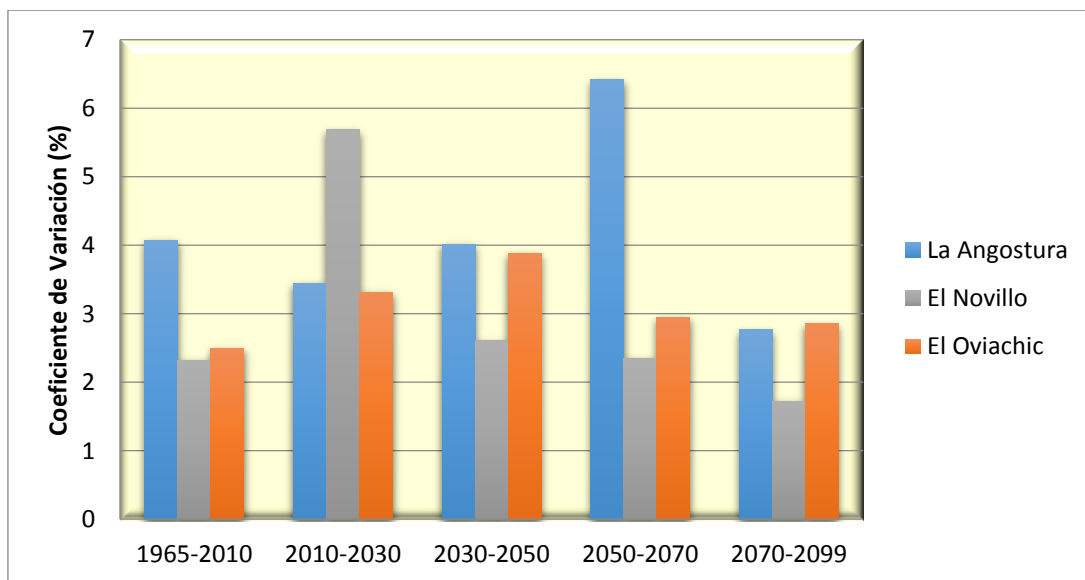
Gráfica 6.8 Precipitación y temperatura proyectada para la subcuenca El Oviachic-SRES A2



En los siguientes gráficos se presenta el coeficiente de variación para precipitación y temperatura utilizando el escenario UKMO-HACDM3-A2 (menos favorable), donde observa con claridad un rango de variación de 8% para las tres subcuencas durante el período de 1965-2099. En menor proporción se observan las variaciones de temperatura con rangos que van desde 1.3 a 3.9%, siendo La Angostura y el Novillo, las subcuencas que presentan mayores cambios.



Gráfica 6.9 Coeficiente de Variación para Precipitación (UKMO-HADCM3-A2)



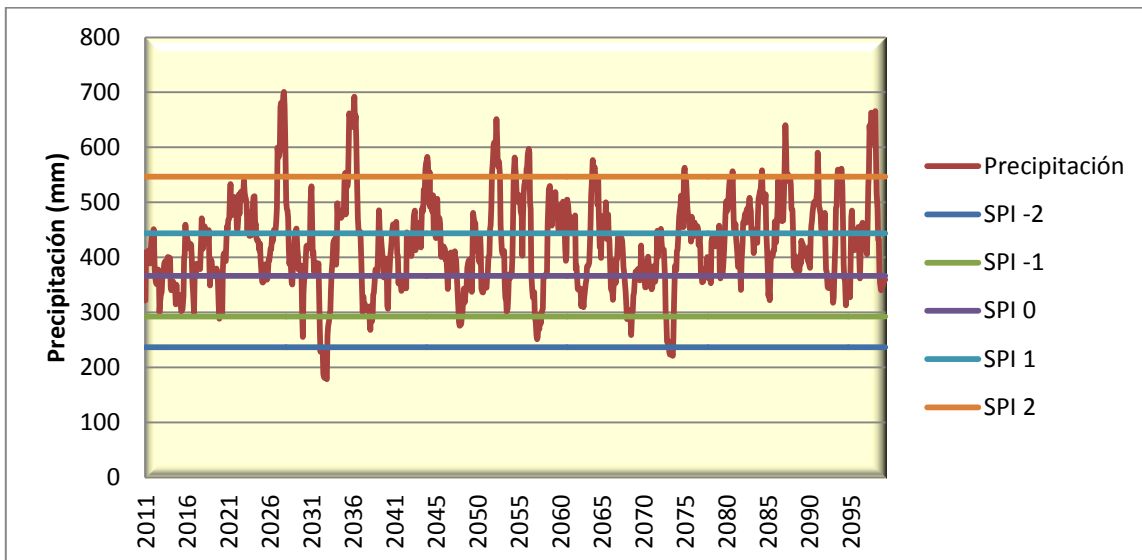
Gráfica 6.10 Coeficiente de Variación para Temperatura (UKMO-HADCM3-A2)



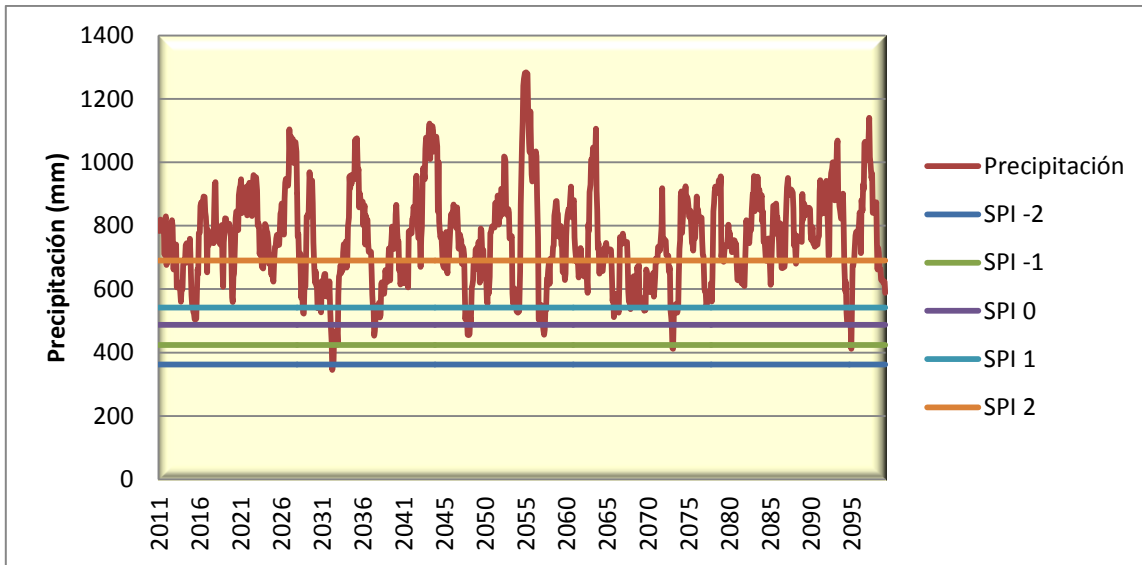
Se definieron las precipitaciones anuales umbrales para la definición de las categorías del índice Estandarizado de Precipitación SPI (McKee, 1992) para el período histórico 1965-2010, con el fin de establecer un nivel de comparación con los resultados proyectados del MCG.

En las gráficas 6.11 a 6.13, se muestran las proyecciones de precipitación hasta el año 2099 y su referencia con el SPI. En estas se identificaron períodos de sequía extrema y excepcional para las proyecciones del escenario A2 (menos favorable) alternados con períodos donde la precipitación supera dos desviaciones estándar con respecto a la media histórica, comportamiento que se repite para las tres subcuencas de estudio.

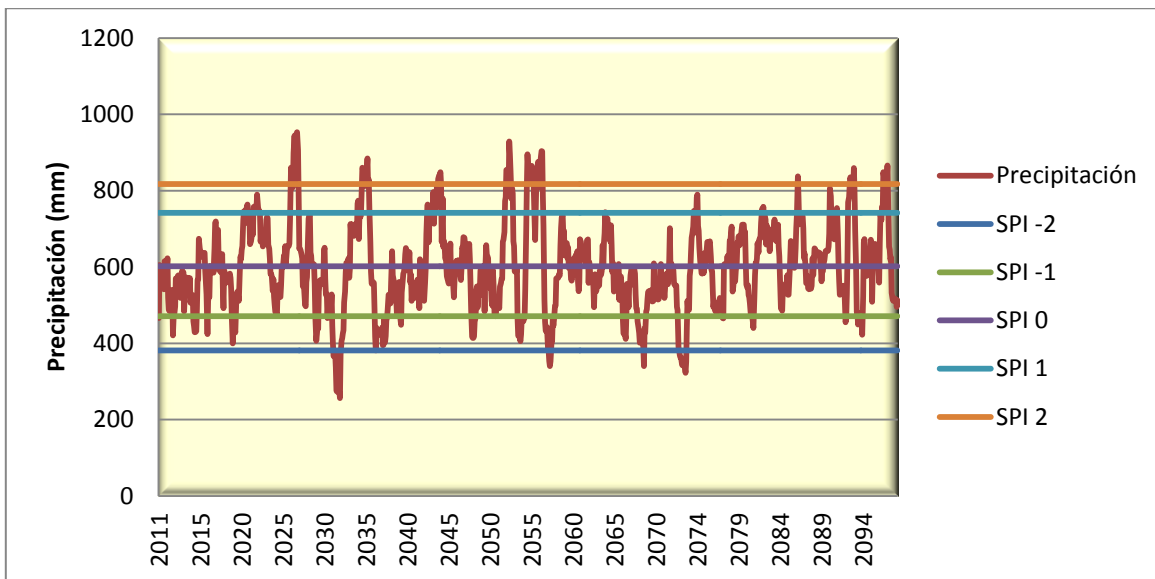
Se hace notar que de acuerdo con estos gráficos, alrededor del 50% de las proyecciones para el Novillo superarán el umbral de sequía 2.0 que se obtuvo con base en la información histórica de 1965 a 2010, superando 690 mm de precipitación en 12 meses.



Gráfica 6.11 Precipitación Proyectada (UKMO-HADCM3-A2) vs. umbrales de sequía para período de observación (1965-2010) en la Subcuenca La Angostura



Gráfica 6.12 Precipitación Proyectada (UKMO-HADCM3-A2) vs. umbrales de sequía para período de observación (1965-2010) en la Subcuenca El Novillo



Gráfica 6.13 Precipitación Proyectada (UKMO-HADCM3-A2) vs. umbrales de sequía para período de observación (1965-2010) en la Subcuenca El Oviachic



6.2. Escenarios de escurrimiento

En este capítulo se presentarán los escenarios de escurrimiento en la cuenca del Río Yaqui, determinados mediante la utilización del software de modelación dinámica Stella 9.0.2. En la figura 6.1 se presenta la interfaz gráfica que sirvió como base para determinar las proyecciones de escurrimiento y almacenamiento en presas.

Para llevar a cabo esta simulación, se asumieron las siguientes convenciones y premisas:

- a) Se partió de los datos históricos de almacenamiento en las presas del Río Yaqui partiendo desde el año 1965, que es cuando se construyó la Presa Plutarco Elías Calles (El Novillo) y el sistema de presas estuvo completo.
- b) Dada la dificultad de modelar la política de transferencias de agua entre presas, debido a que no existe en los datos históricos correlación con un criterio objetivo, se utilizó el promedio histórico de transferencia de agua entre presas para determinar la modelación del almacenamiento la Presa El Oviachic.
- c) Utilizando las proyecciones de cambio climático para la zona, se modeló el comportamiento a futuro del almacenamiento en el Sistema y en la Presa El Oviachic.
- d) Asimismo, para efectos de la modelación se asumió como salidas anuales los promedios históricos de las deducciones: evaporación en presas y cauces, y requerimientos: consumo de pueblos ribereños, gasto comprometido para las colonias yaquis, agua potable para Ciudad Obregón y el volumen concesionado al Distrito de Riego 041 Valle del Yaqui, considerando las pérdidas de conducción al punto de control (Tabla 6.7).



Tabla 6.7 Deducciones y Requerimientos en el Sistema de Presas del Río Yaqui

Presa/Usuario	Volumen Necesario (hm ³)
Deducciones	
Evaporación Presas	332.30
Evaporación e Infiltración de Cauces	197.20
Requerimientos	
Pueblos Ribereños	120
Colonias Yaquis	250
Ciudad Obregón	97
Distrito de Riego	1,910
TOTAL	2,377

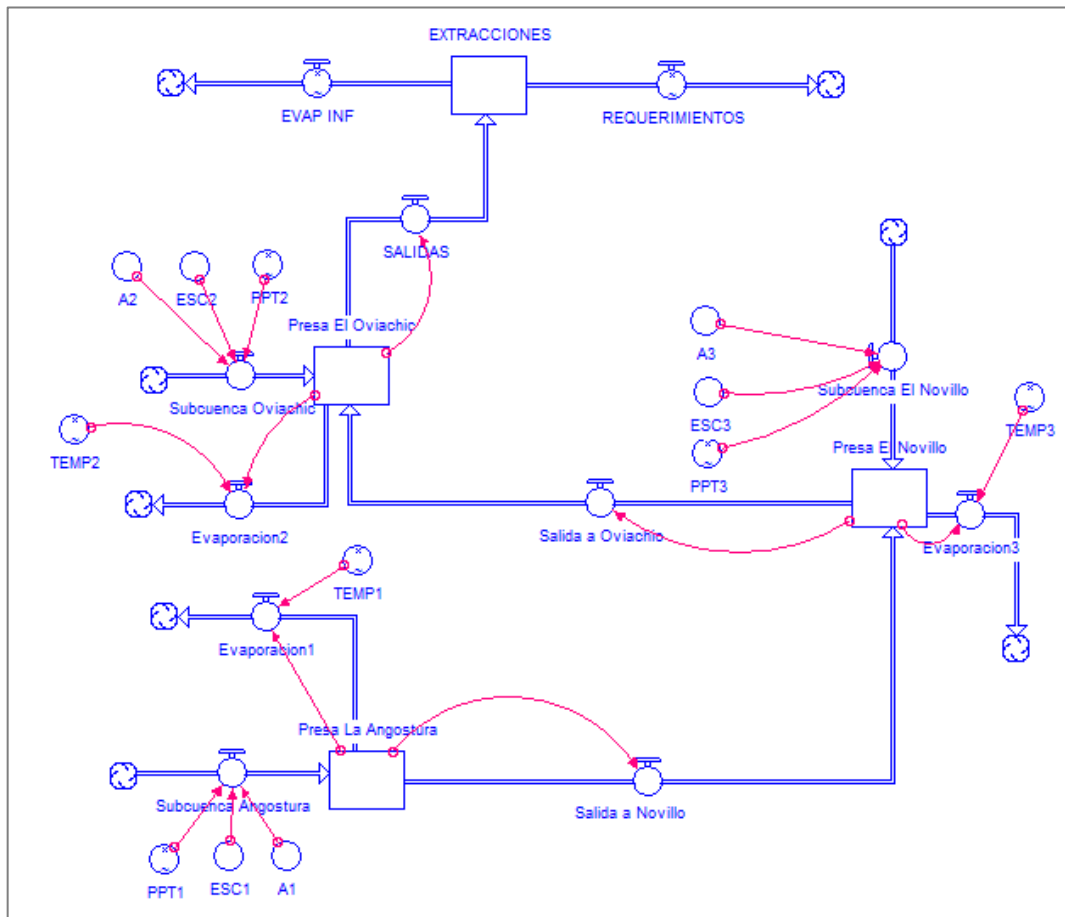
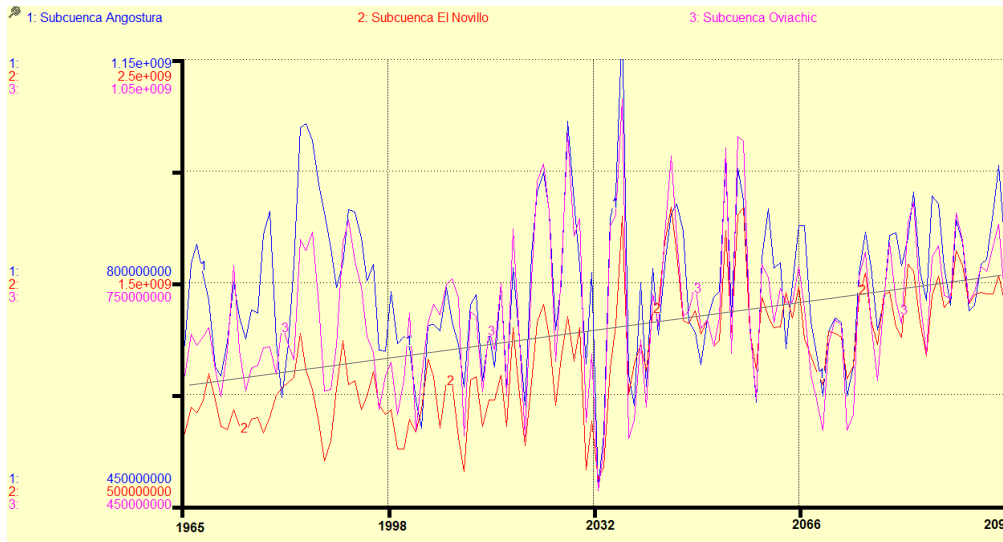


Figura 6.1 Interfaz gráfica para las proyecciones de escorrentía de la Cuenca del Río Yaqui



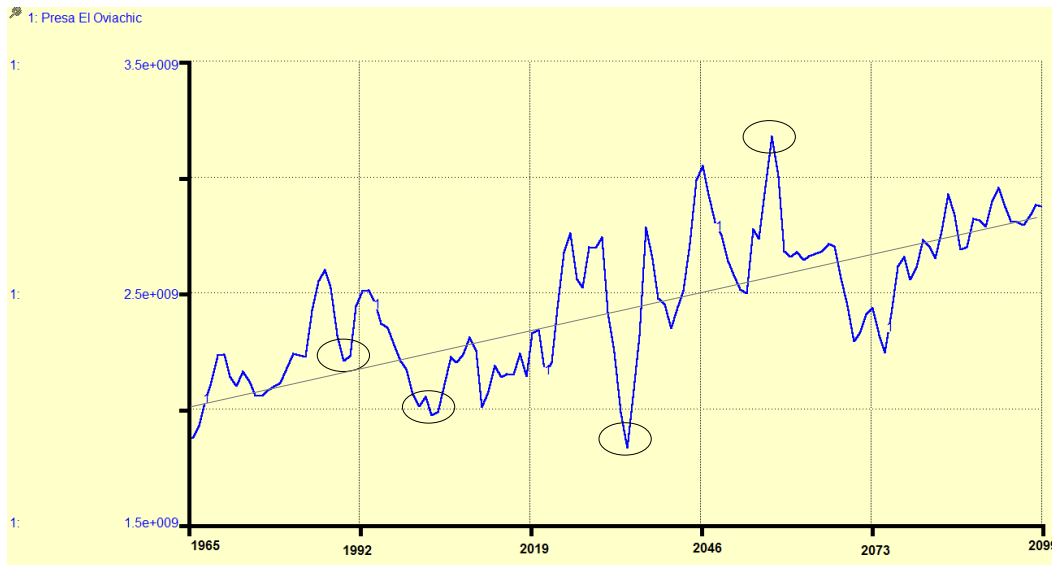
A continuación se presenta la Gráfica 6.14, donde se observa el escurrimiento histórico para los años de 1965 a 2010, así como el escurrimiento proyectado para los años de 2011 a 2099 en La Subcuenca La Angostura, El Novillo y El Oviachic, obtenido mediante la proyección del escenario UKMO-HADC3-A2 para emisiones altas de gases de efecto invernadero.



Gráfica 6.14 Proyecciones de escurrimiento para las subcuencas La Angostura, El Oviachic y El Novillo

Como se observa en el gráfico anterior, se presentan variaciones anuales para el período de tiempo evaluado en metros cúbicos, pero también se observa una tendencia positiva comprobada mediante una regresión lineal, que vendría siendo efecto de un cambio climático en curso.

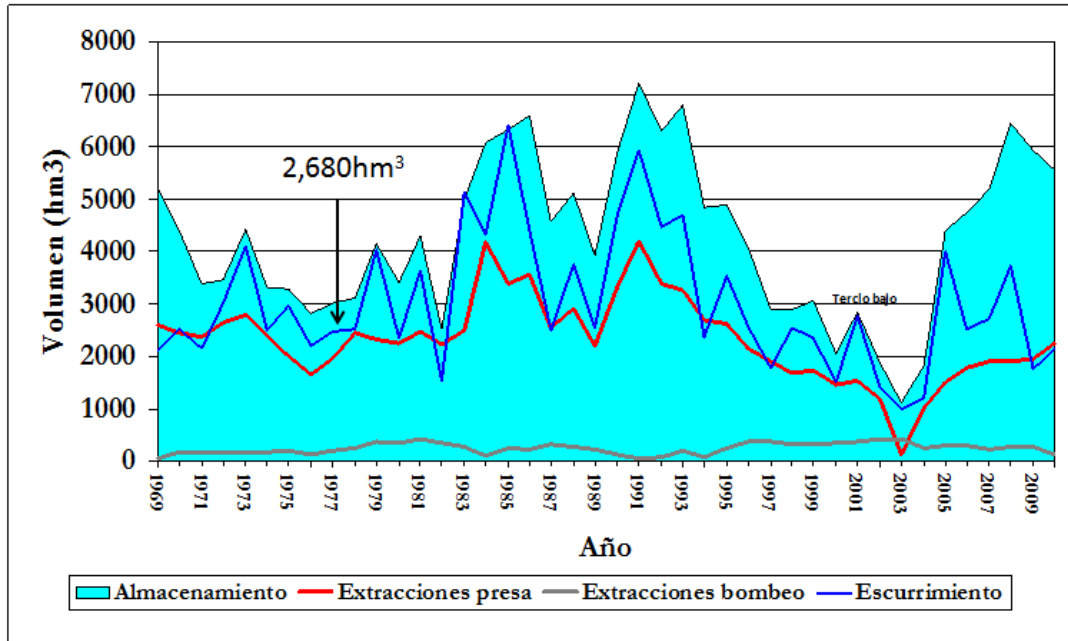
Además de los escenarios de escurrimiento, se presenta gráfico de almacenamiento para la Presa El Oviachic, tomando en cuenta las salidas por evaporación e infiltración de cauces, así como las extracciones para cubrir con los requerimientos anuales por parte de los Pueblos Ribereños, Colonias Yaquis, Ciudad Obregón y el Distrito de Riego del Río Yaqui, (Tabla 6.16).



Gráfica 6.15 Almacenamiento proyectado para la presa el Oviachic

Como se observa en la gráfica anterior, las proyecciones de escurrimiento presentan una tendencia positiva marcada así como variaciones anuales. Se determinaron períodos históricos de escasez de agua para los años de 1989, 1990, 2000, 2001, 2002 y 2003, que son reflejo de los años menos lluviosos, pero también de las políticas de almacenamiento de agua. Se estima que a pesar de las deficiencias de almacenamiento para los años de 2034, 2070 y 2074, los niveles proyectados cubrirán con los requerimientos anuales de ciudad Obregón, Colonias Yaquis, los Pueblos Ribereños y el Distrito de Riego del Río Yaqui (Tabla 6.7), utilizando como volumen de transferencia el promedio histórico de 1965 a 2010. Para el año 2057, se proyecta un almacenamiento de $3,177 \text{ Hm}^3$, contando las salidas por deducciones y requerimientos, valor que se acerca al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) para la presa del Oviachic, que es de $3,226.7 \text{ Hm}^3$.

La siguiente gráfica, muestra el almacenamiento histórico para la presa, que concuerda con la información modelada, en donde se observa que hubo problemas para cubrir con los requerimientos durante los años de 1989, 1990, 2000, 2001, 2002 y 2003, y no fue necesariamente por deberse a un año seco, sino a problemas en el manejo de las transferencias de agua.



Gráfica 6.16 Almacenamiento en la Presa el Oviachic 1965-2010 (Minjarez Lugo, comunicación personal, GRNO-CONAGUA)



7. IMPACTO DE LAS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA RECARGA SISTEMA ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI

7.1. Calculo de recarga

Como ya fue descrito en el apartado de metodología, para evaluar el posible impacto en el acuífero se evaluó el cambio de almacenamiento anual del Sistema Acuífero tanto en el período histórico como en el proyectado.

Esto se realizó mediante la ecuación 2.5:

$$Rl+Fs+Rr+Ic-Etr-Br-Fb=Ca \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Dónde

Rl= Recarga de ladera en millones de metros cúbicos (calculada con base en las proyecciones de cambio climático para precipitación y temperatura)

Fs=Flujo subterráneo en millones de metros cúbicos (tomado de Monreal y otros, 2003).

Rr= Retorno de riego en millones de metros cúbicos (tomado de Monreal y otros, 2003).

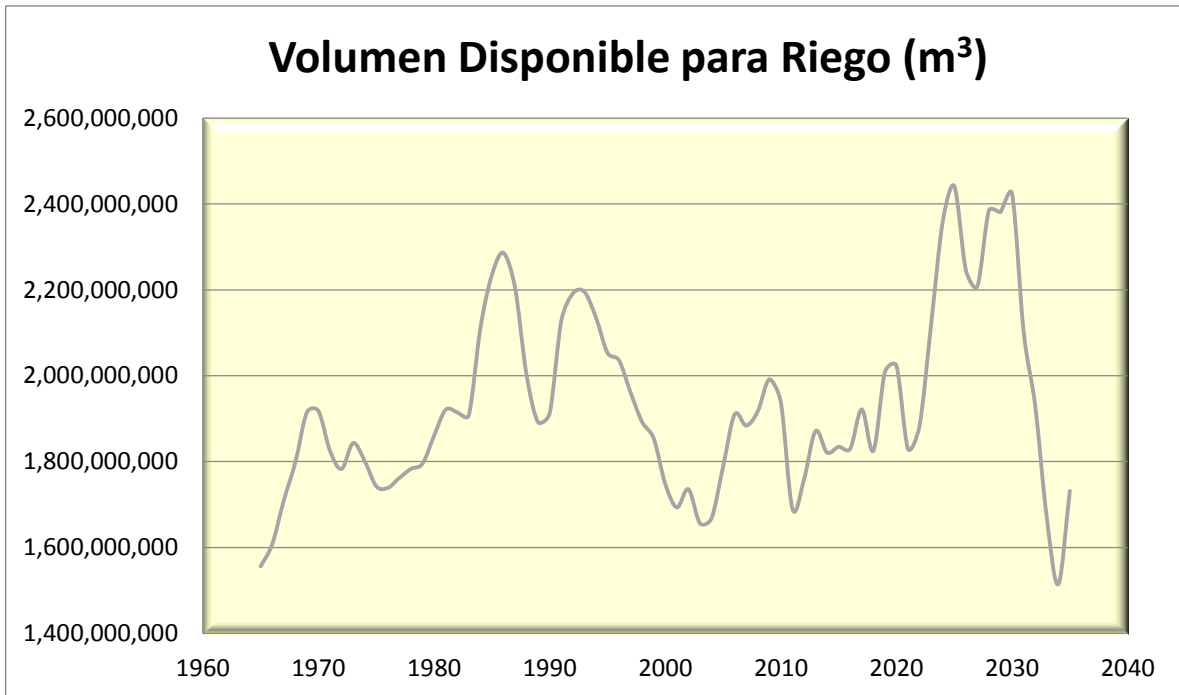
Ic= Infiltración en canales en millones de metros cúbicos (tomado de Monreal y otros, 2003).

Etr= Evapotranspiración (calculada con base en las proyecciones de cambio climático para precipitación y temperatura).

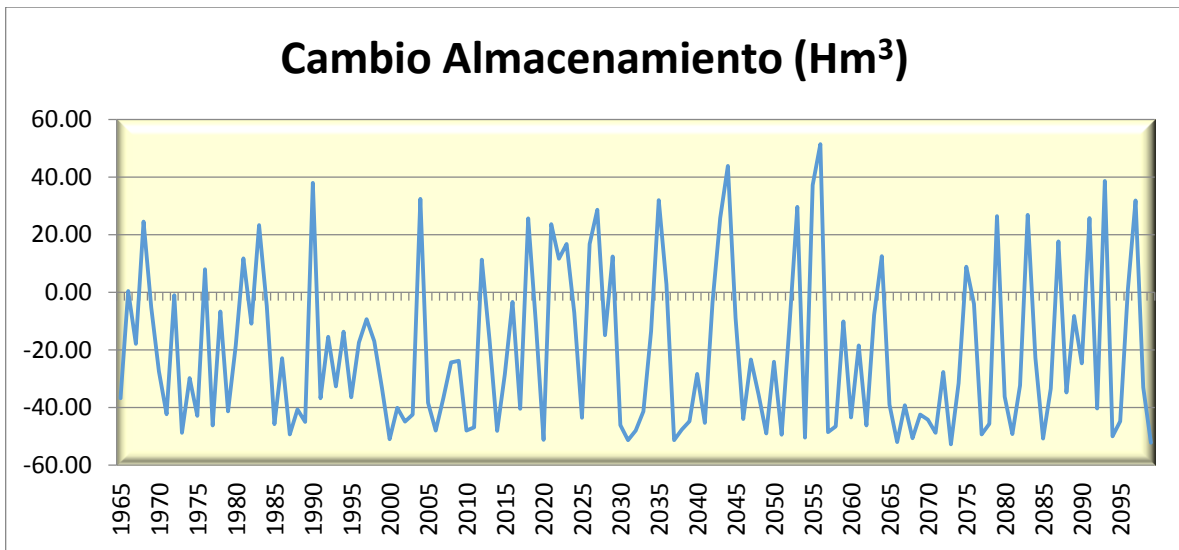
Br= Bombeo requerido (tomado de Monreal y otros, 2003).

Fb= Flujo base (tomado de Monreal y otros, 2003).

A partir de esta ecuación se procedió a evaluar el volumen disponible para riego y el Cambio en Almacenamiento para cada año considerando los valores promedio descritos por Monreal y otros (2003). Los resultados de la mencionada simulación se presentan a continuación:



Gráfica 7.1 Volumen Disponible para Riego



Gráfica 7.2 Cambio de Almacenamiento en la Presa El Oviachic

Del comportamiento de la gráfica puede deducirse en lo general los siguientes aspectos:



- a) Los datos positivos en los años históricos permiten deducir que la evaluación de la salida por drenes o flujo base esta subvaluada, dado que de lo contrario estaría el acuífero con una continua alza de niveles.
- b) En lo general el comportamiento establece que el acuífero resistiría los cambios climáticos modelados, si conserva la misma política de explotación, es decir que estaría cerca de su sustentabilidad como recurso.



8. VULNERABILIDAD AL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR EN EL SISTEMA ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI

El cambio climático, especialmente el causado por un incremento en la temperatura media global de la superficie del mar, puede producir que la actual tendencia al ascenso del nivel del mar aumente significativamente (IPCC 2001). De acuerdo con lo previsto por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático en 2001, se espera un incremento en el nivel del mar de 20 cm para el año 2030 y 88 cm para finales de siglo, utilizando el escenario menos favorable (A2) información que se presenta en la figura 8.1.

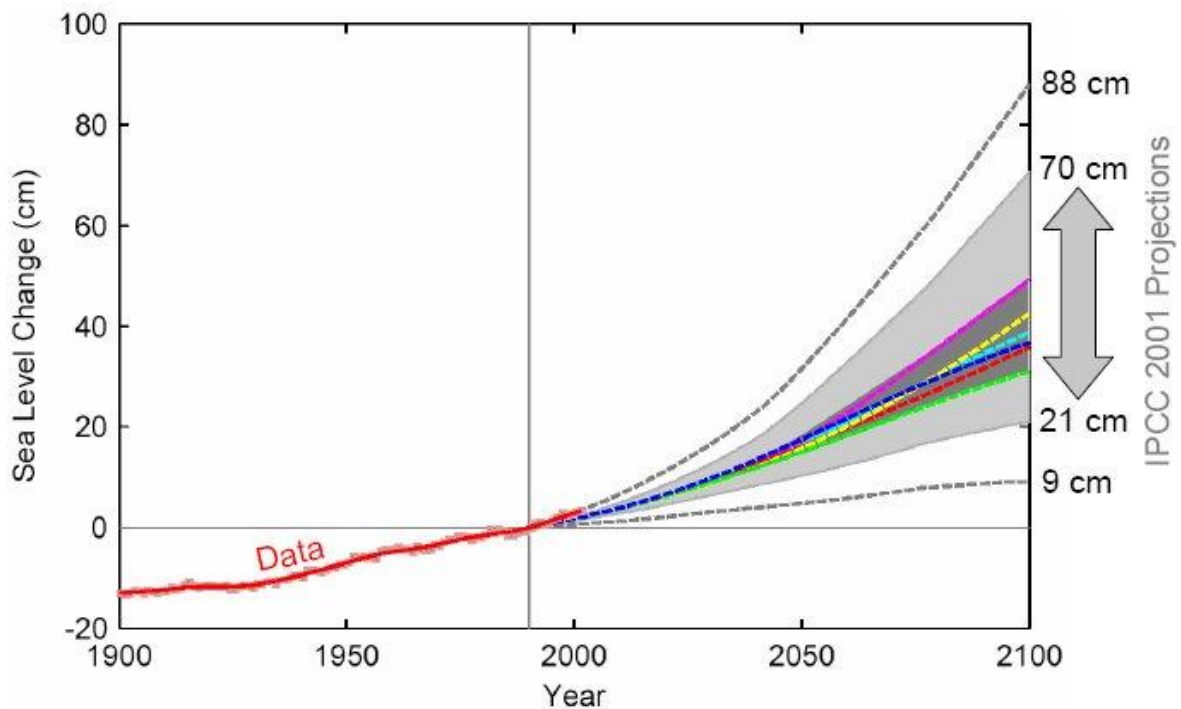


Figura 8.1 Aumento del nivel del mar (m) en el próximo siglo de acuerdo a la IPCC

En este capítulo se determinará la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar por medio de la utilización del que exige una adaptación numérica de datos oceanográficos y geológicos, que resultan de la observación directa, información bibliográfica y de muestreo.



8.1. Criterio de Gornitz para la determinación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar.

El criterio de Gornitz se basa en la utilización de 7 variables principales y se resuelve mediante la ecuación 2.6:

$$V = \sqrt{(a1*a2*a3*a4*a5*a6*a7)/7} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Dónde:

a1) Altura máxima de la ola: Representa la energía del medio marino y su capacidad erosiva.

a2) Cambio del Nivel del Mar: Representada por valores de altitud e indicadores de peligro de inundación.

a3) Geología: Representa la resistencia a la erosión de los afloramientos del área costera dependiendo de la litología y características estructurales de la roca.

a4) Geomorfología: Permite prever la evolución del paisaje, posible degradación a partir de inundación y erosión y condiciones energéticas.

a5) Desplazamiento de la línea de costa: Dato que representa el comportamiento histórico de la línea de costa y su tendencia evolutiva respecto a la componente horizontal.

a6) Altura máxima de ola: Esencial para la determinación de la energía involucrada en la incidencia de olas sobre las áreas costeras, pues es proporcional al cuadrado de la altura de las olas.

a7) Rango de mareas: Junto con los episodios de tormenta permite identificar las variaciones episódicas del nivel del mar. Se relaciona tanto a inundación como al riesgo de erosión.



8.2. Evaluación de los componentes de la base de datos

8.2.1. Valores de altitud representados por mapas topográficos

Para la determinación de los valores de altitud se utilizó el modelo de elevación digital del SRTM para la zona. Obteniéndose alturas que van de los 0 a los 130 metros sobre el nivel del mar (Figura 3.5 Hipsometría).

8.2.2. Cambio del nivel del mar

Para esta sección se utilizará el máximo aumento en el nivel del mar establecido por el IPCC en 2001, equivalente a 0.88 metros en caso de presentarse el peor de los escenarios de cambio climático (Fig. 8.1).

8.2.3. Geología

La descripción de la geología del área de estudio se hace con especial cuidado de resaltar las características litológicas de cada tipo de roca, debido a las condiciones geotectónicas de los mismos representan la fuerza de resistencia a la erosión ante la incidencia de las olas y de las corrientes. Las características litológicas del área de estudio se presentan en la figura 3.6. Geología.

8.2.4. Geomorfología

Para la determinación de la geomorfología e la zona se utilizaron varios parámetros para la clasificación de unidades, como son: geoforma, drenaje, altura relativa, pendiente, litología y edad (Gutiérrez, 2010). Para el Sistema Acuífero Valle del Yaqui se determinaron 15 unidades geomorfológicas que se describen con mayor detalle en la figura 3.6. Geomorfología.

8.2.5. Desplazamiento de la línea de costa

Debido a la topografía de la zona, geomorfología y características litológicas se determinó que el área de estudio representa una zona de acreción o acumulación de material sedimentario en la línea de costa.

8.2.6. Olas

Para la altura máxima de olas se utilizaron los registros históricos para el año 2011, obtenidos del fotomareógrafo de la Secretaría de Marina para la estación Guaymas y los



registros de CICESE para la de la estación Yávaros, Sonora, obteniéndose una altura máxima de 1.28 metros.

8.2.7. Rango de Marea

Para la altura máxima de olas se utilizaron los registros históricos para el año 2011, obtenidos del fotomareógrafo de la Secretaría de Marina para la estación Guaymas y los registros de CICESE para la de la estación Yávaros, Sonora, obteniéndose un rango de marea de 0.66 metros.

8.3. Resultados del criterio de Gornitz para el acuífero Valle del Yaqui

A continuación se presentan resultados del criterio de Gornitz para la determinación de la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en el Sistema Acuífero Valle del Yaqui. Como se observa en la figura, los resultados varían desde Muy Alta a Muy Baja, predominando la vulnerabilidad Muy Alta en toda la zona, debido principalmente a la topografía de la zona y las características litológicas.

Esta metodología permitió identificar de manera práctica y sencilla las zonas agrícolas, acuícolas y poblaciones vulnerables al ascenso del nivel del mar, que en este caso incluyen las localidades de Las Guásimas, Los Algodones, Libia, Lobos, Médanos, Paredoncito, entre otras, lo que permitirá llevar a cabo las medidas pertinentes, para aquellos asentamientos en riesgo.

También servirá como herramienta básica para las planeaciones urbanas subsecuentes, con el objetivo de evitar las zonas altamente vulnerables.

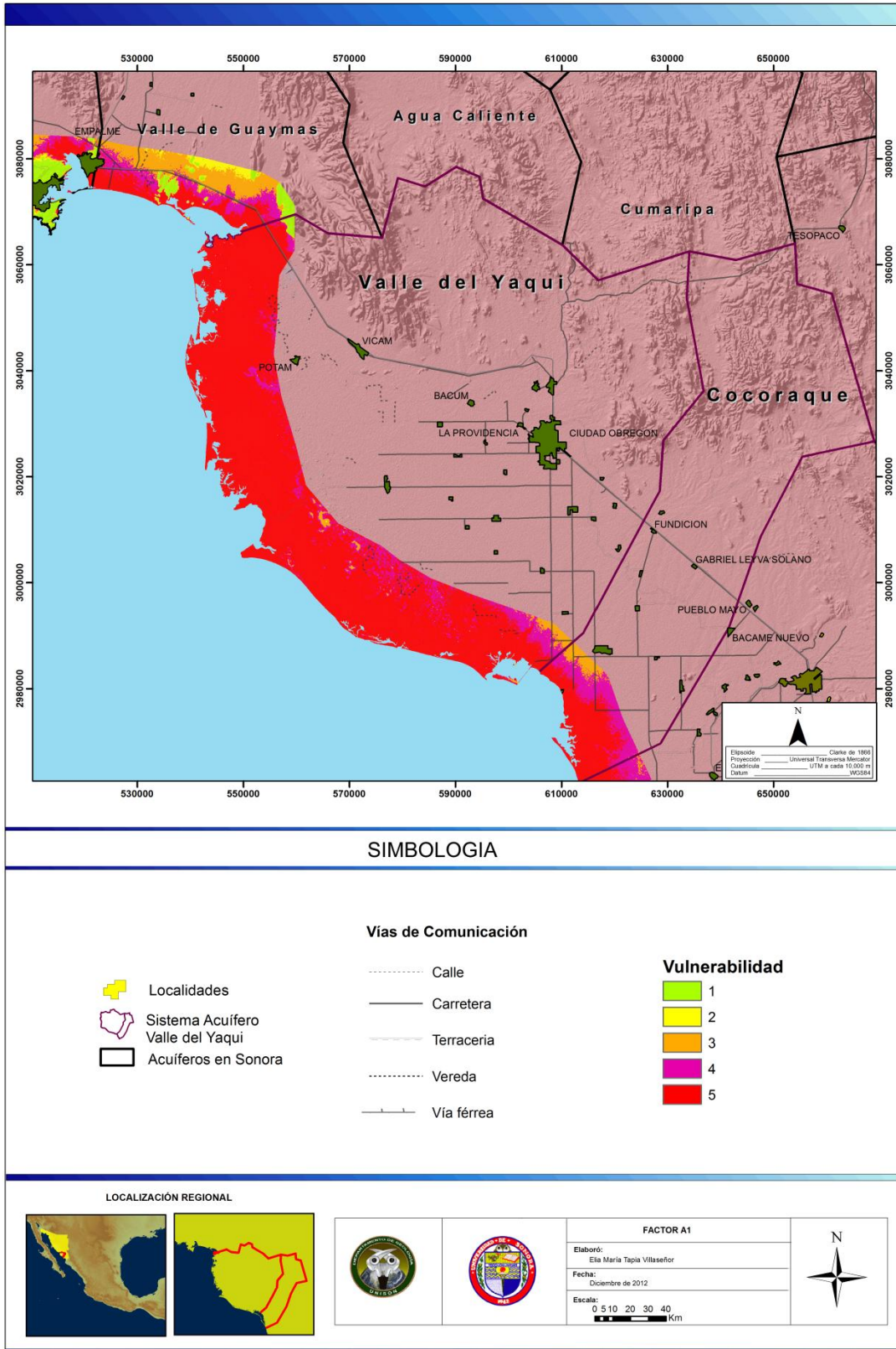


Figura 8.2 Factor A1

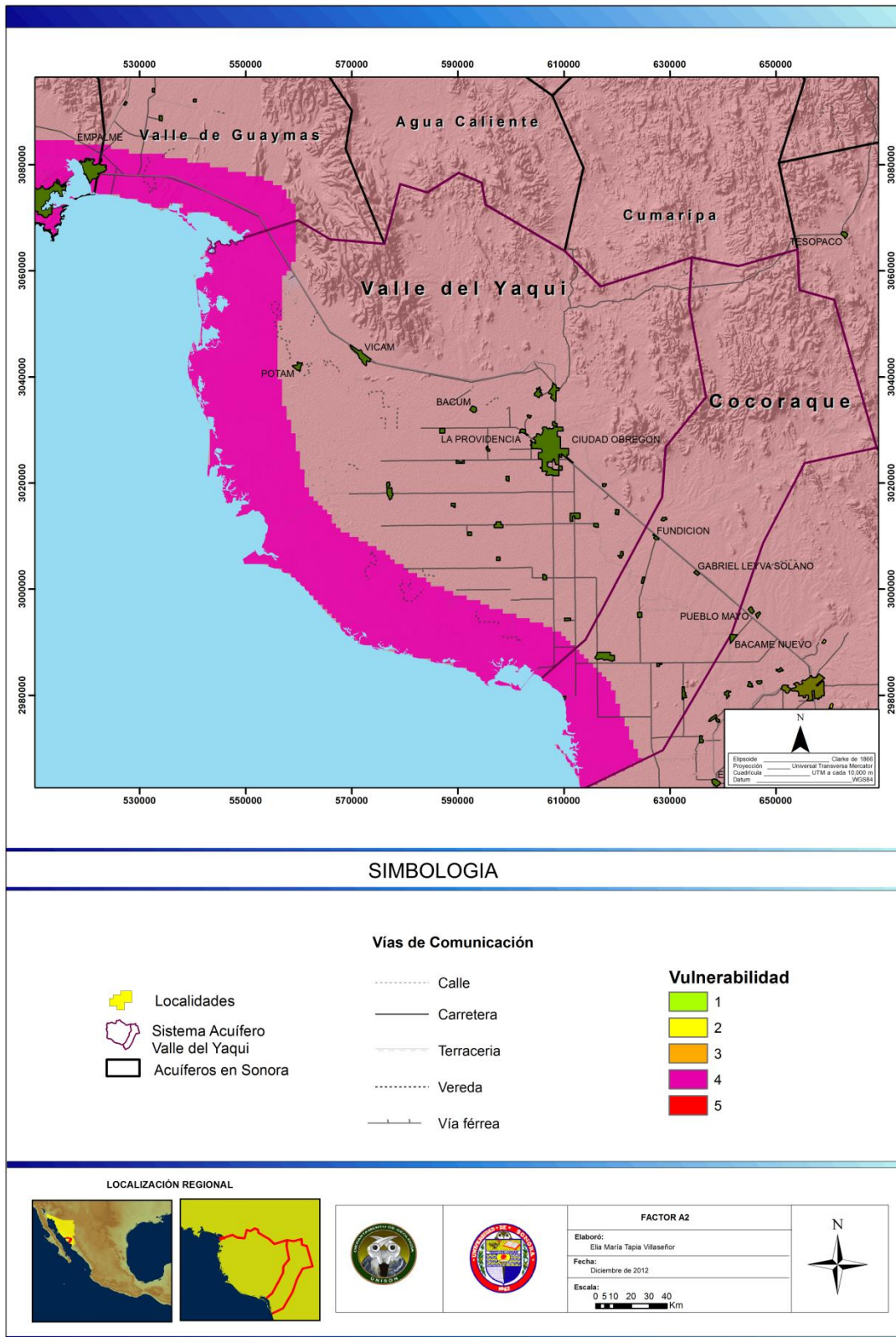


Figura 8.3 Factor A2

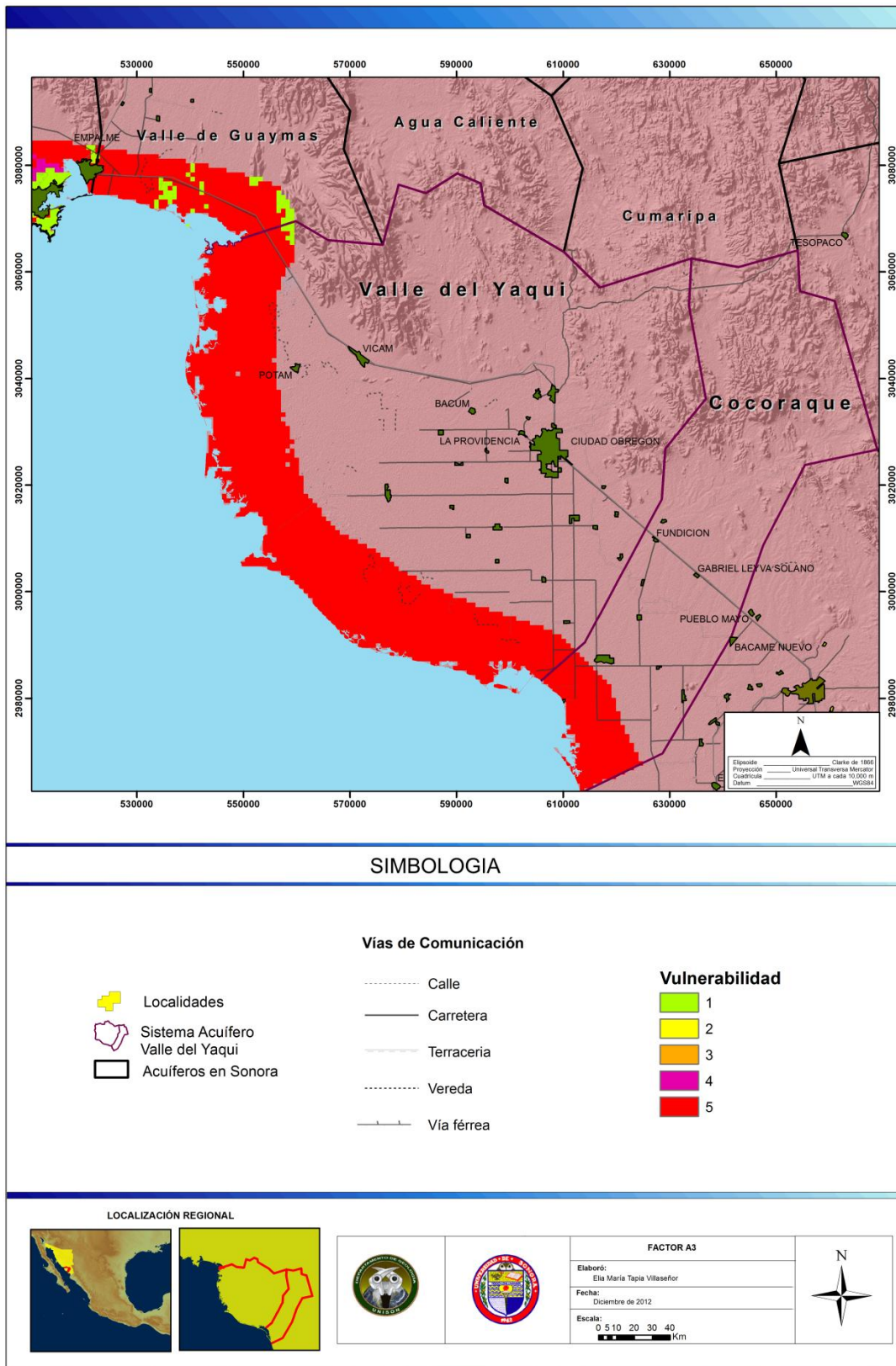


Figura 8.4 Factor A3

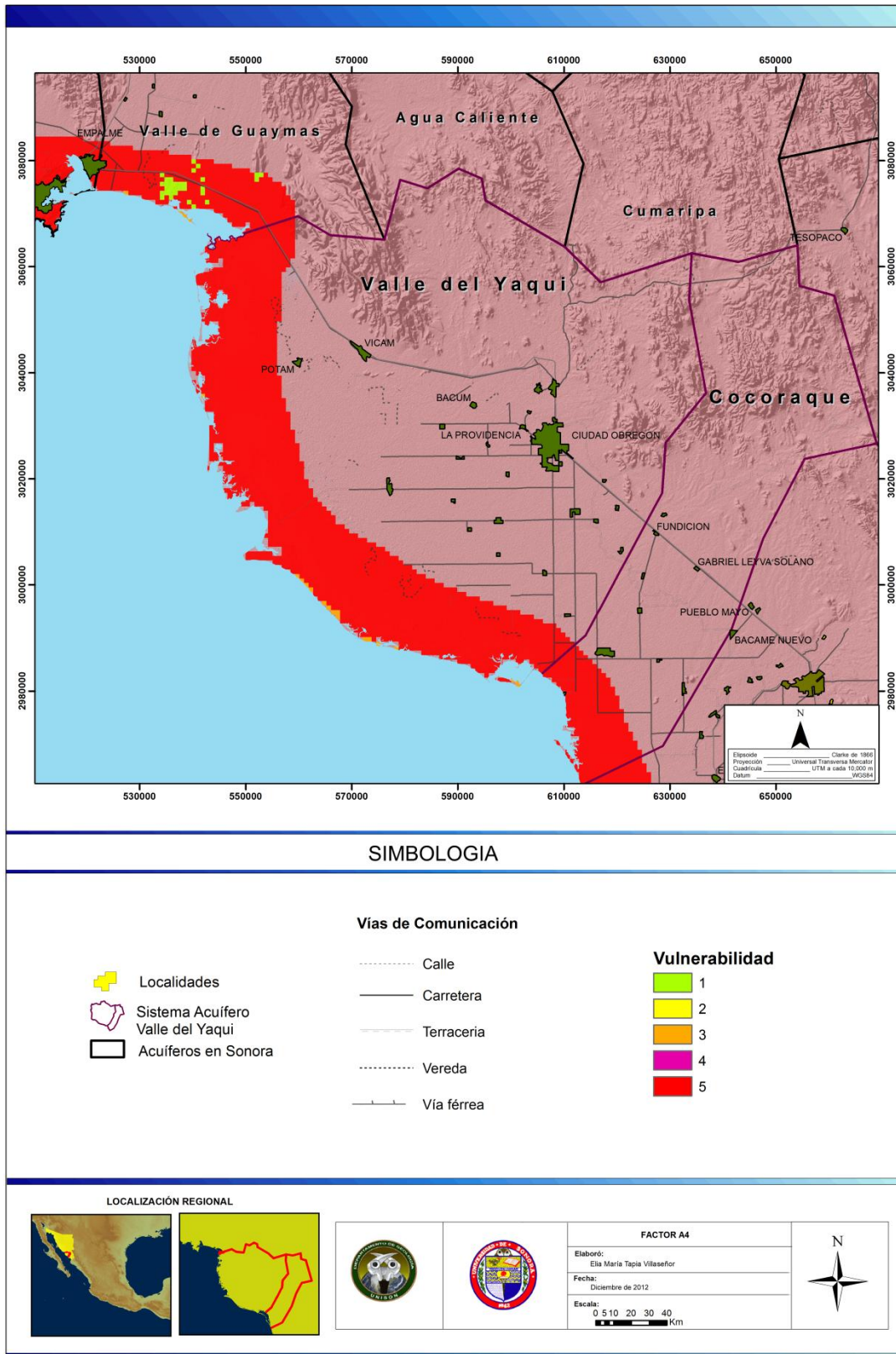


Figura 8.5 Factor A4

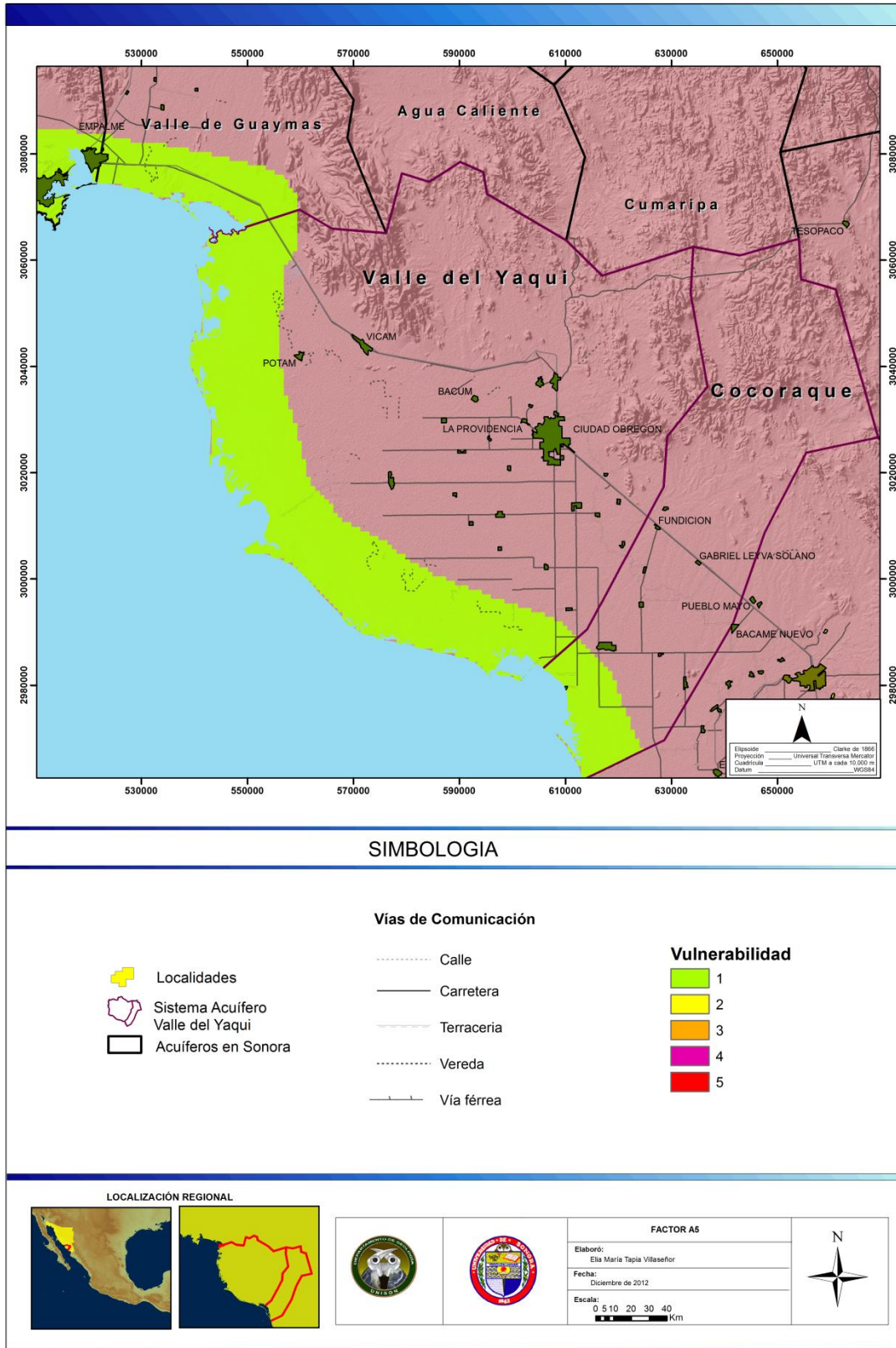


Figura 8.6 Factor A5

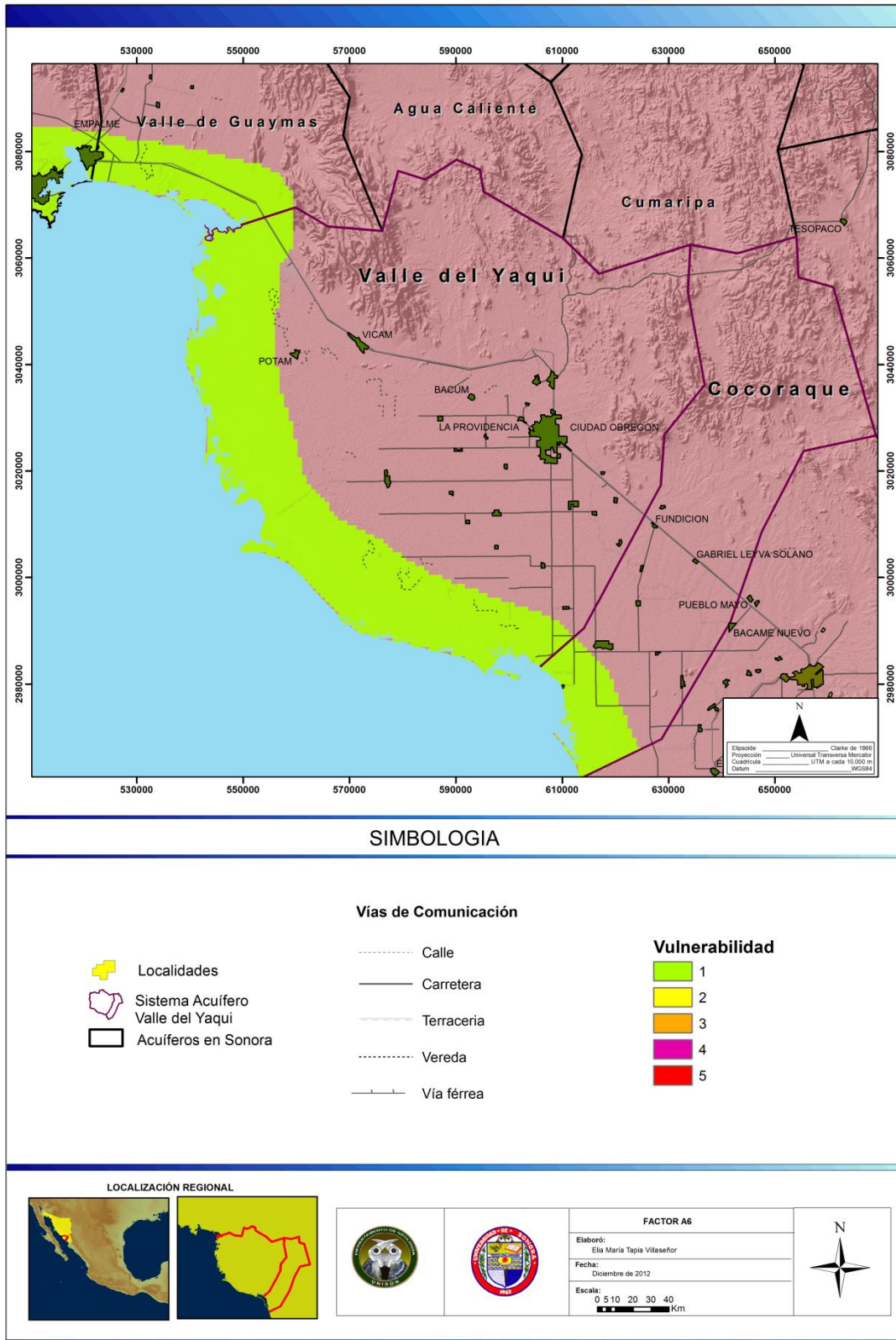


Figura 8.7 Factor A6

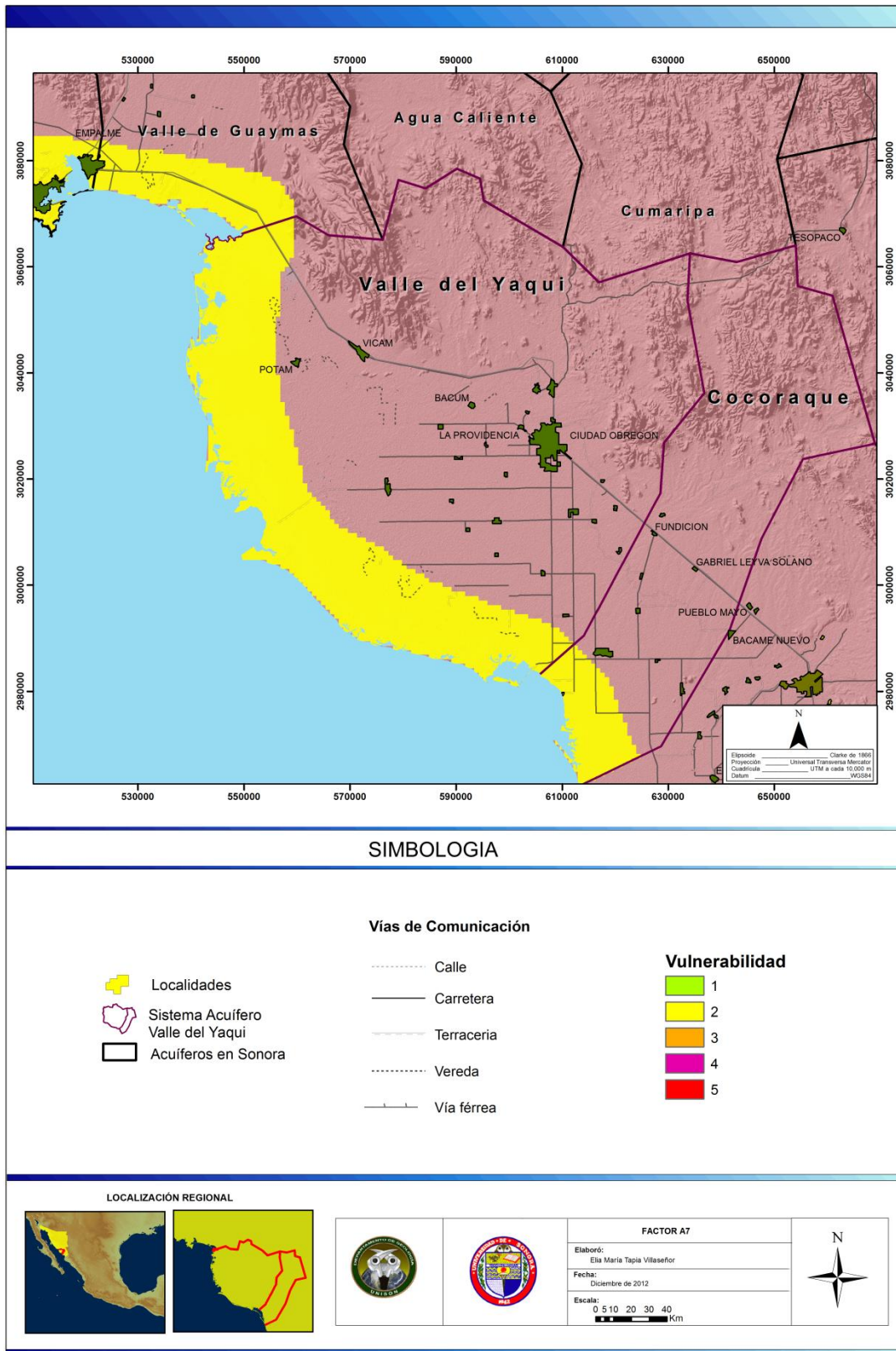


Figura 8.8 Factor A7

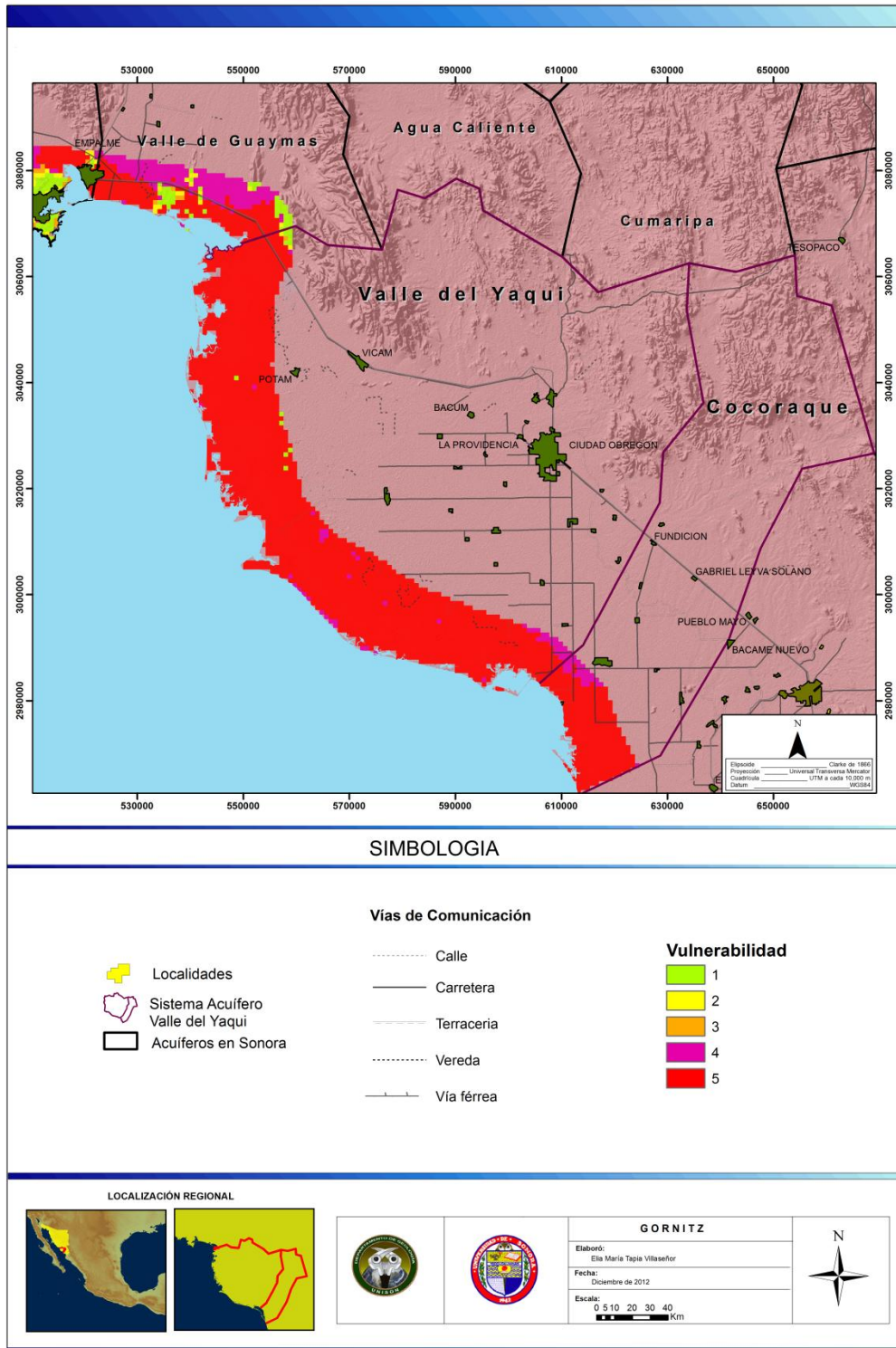


Figura 8.9 Vulnerabilidad al Ascenso del Nivel del Mar de acuerdo con el Criterio de Gornitz



9. VULNERABILIDAD A LA INTRUSIÓN SALINA EN EL SISTEMA ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI

9.1. Índice GALTIT para el acuífero Valle del Yaqui

Los acuíferos costeros conservan una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que empuja por penetrar tierra adentro (Figura 9.1). Esta relación se presenta, generalmente, en forma de cuña. La penetración de la cuña de agua salada (intrusión marina) depende de características del acuífero como la geometría y las propiedades hidráulicas (permeabilidad, nivel piezométrico, etc.); y es función inversa del flujo de agua dulce que descarga al mar a lo largo de la costa. La intrusión marina es un proceso dinámico, en el que el frente de agua salada avanza tierra adentro durante los períodos de menor recarga del acuífero, y retrocede hacia el mar cuando la recarga aumenta.



Figura 9.1 Equilibrio agua dulce-agua salada

Sin embargo, las actividades humanas pueden afectar el equilibrio natural de los acuíferos costeros, dado que las extracciones por bombeo del acuífero de agua dulce producen descensos en la superficie piezométrica, provocando una menor descarga de agua dulce al mar y, consecuentemente, produciendo la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro (Figura 9.2). Esta intrusión provocará la contaminación del acuífero costero como consecuencia del aumento de la salinidad en las aguas subterráneas y, posteriormente, la limitación de su aprovechamiento para determinados usos.



Figura 9.2 Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación

La invasión de agua marina puede producirse de diferentes formas, siendo las dos más frecuentes: (1) el avance horizontal de la interface hacia el interior y (2) el ascenso vertical en forma de cono de la interface por bombeo intensivo. Por lo tanto, la posición de la interface es una variable de decisión a tener en cuenta a la hora de gestionar los recursos del acuífero.

Para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la intrusión marina, existen muchos métodos, pero en este estudio sólo se hará referencia al método GALDIT (ecuación 2.7), el cual comprende los parámetros descritos a continuación.

9.2. Evaluación de los componentes de la base de datos

9.2.1. Tipo de Acuífero (G)

El sistema acuífero Valle del Yaqui está compuesto por dos acuíferos; uno de tipo libre (freático) en la zona próxima a la superficie, y un acuífero regional, que varía de libre a semiconfinado y confinado. Cabe recalcar que en caso de presentarse sistemas acuíferos múltiples se utiliza la ponderación más alta disponible, en este caso 10 (Figura 9.3).

9.2.2. Conductividad Hidráulica del Acuífero (A)

Este parámetro fue evaluado utilizando la información de pozos disponibles para el acuífero Valle del Yaqui. Los valores más altos de conductividad se encuentran al norte y sureste del valle como se observa en la Figura 9.4.

9.2.3. Nivel de agua subterránea sobre el mar (L)

Este parámetro fue evaluado utilizando los niveles piezométricos disponibles para el acuífero Valle del Yaqui, predominando el factor 5 en el área de estudio (Figura 9.5).



9.2.4. Distancia Tierra Adentro Perpendicular a la Costa (D)

Este parámetro fue evaluado utilizando el modelo digital de elevación del acuífero Valle del Yaqui (Figura 9.6). Los valores más altos se observan cerca de la costa, mientras que los valores bajos son los predominantes, ya que la valoración de este parámetro está muy limitada a la cercanía con la línea de costa.

9.2.5. Impacto existente de la intrusión marina (I)

Este parámetro fue evaluado utilizando los datos de hidrogeoquímica disponibles para el acuífero Valle del Yaqui (Figura 9.7). La distribución del cociente $Cl^{-}/[HCO_3^{-} + CO_3^{2-}]$ fue determinada y cartografiada, en lo que se muestra como las concentraciones mayores de Cl^{-} las cuales parten de la línea de costa. La tendencia de los valores evaluados para este parámetro se adapta sin problemas a la realidad del acuífero, ya que la zona roja de la cuadrícula coincide con la línea de costa y las zonas de extracción agrícola del Valle del Yaqui.

9.2.6. Espesor del Acuífero (T)

Este parámetro fue evaluado utilizando los estudios de geofísica disponibles para el acuífero Valle del Yaqui (Figura 9.8), donde se reportan espesores promedio de hasta 200 metros, valores que sobrepasan la escala del método GALDIT, por lo que el valor de 2.5 se consideró para toda la cuadrícula.

9.1. Resultados del índice GALDIT para determinar la vulnerabilidad a la intrusión salina en el acuífero Valle del Yaqui

El índice GALDIT fue calculado utilizando los pesos estandarizados para cada parámetro, y los resultados finales muestran que para el acuífero Valle del Yaqui se presenta una vulnerabilidad baja y moderada a la intrusión salina. La vulnerabilidad moderada se extiende un kilómetro a partir de la línea de costa, y en puntos aislados tierra adentro, que no representarán mayor afectación por su lejanía con la línea de costa. El resto del acuífero no se encuentra vulnerable a este fenómeno.

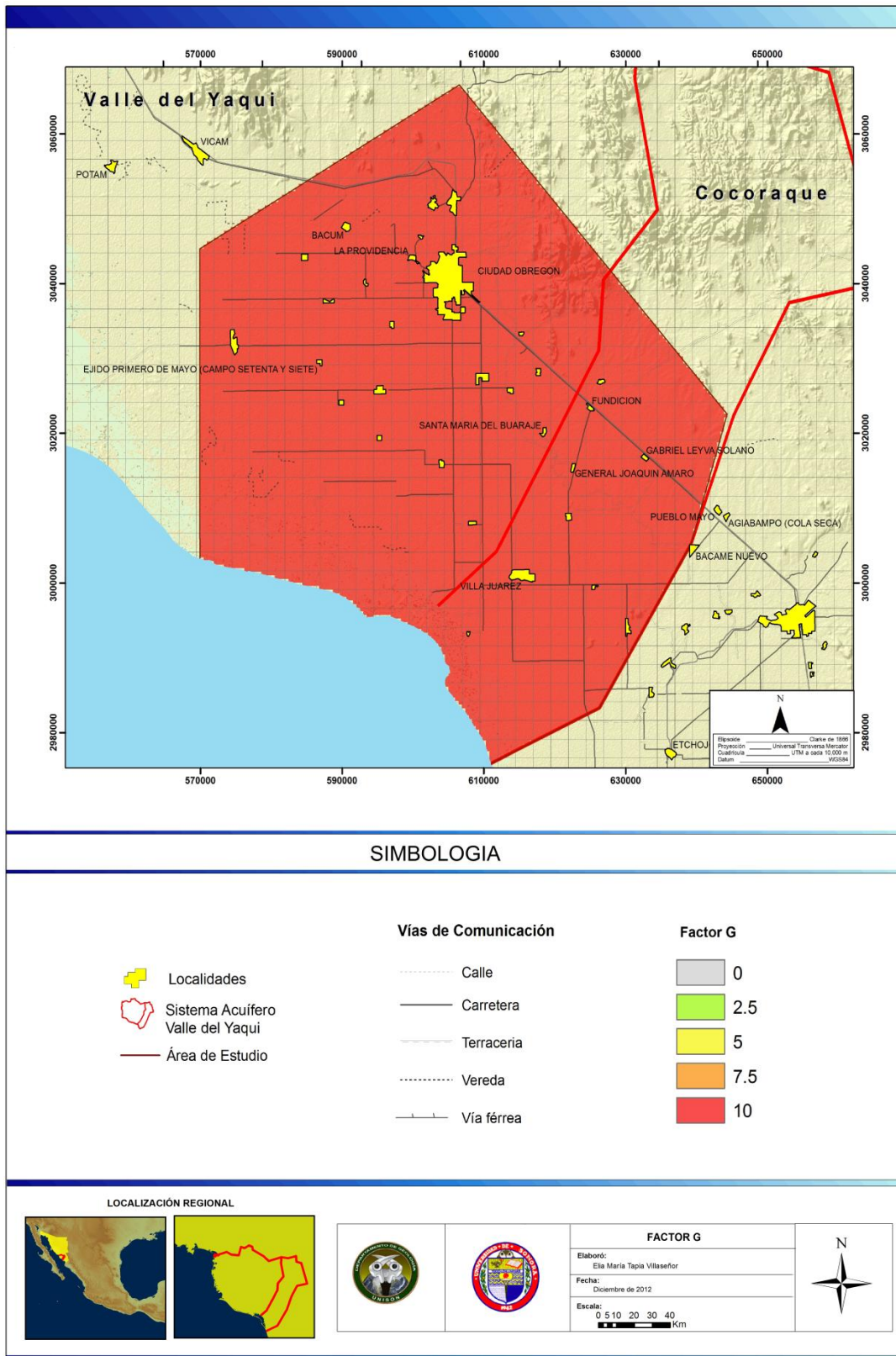


Figura 9.3 Parámetro G, Sistema Acuífero Valle del Yaqui

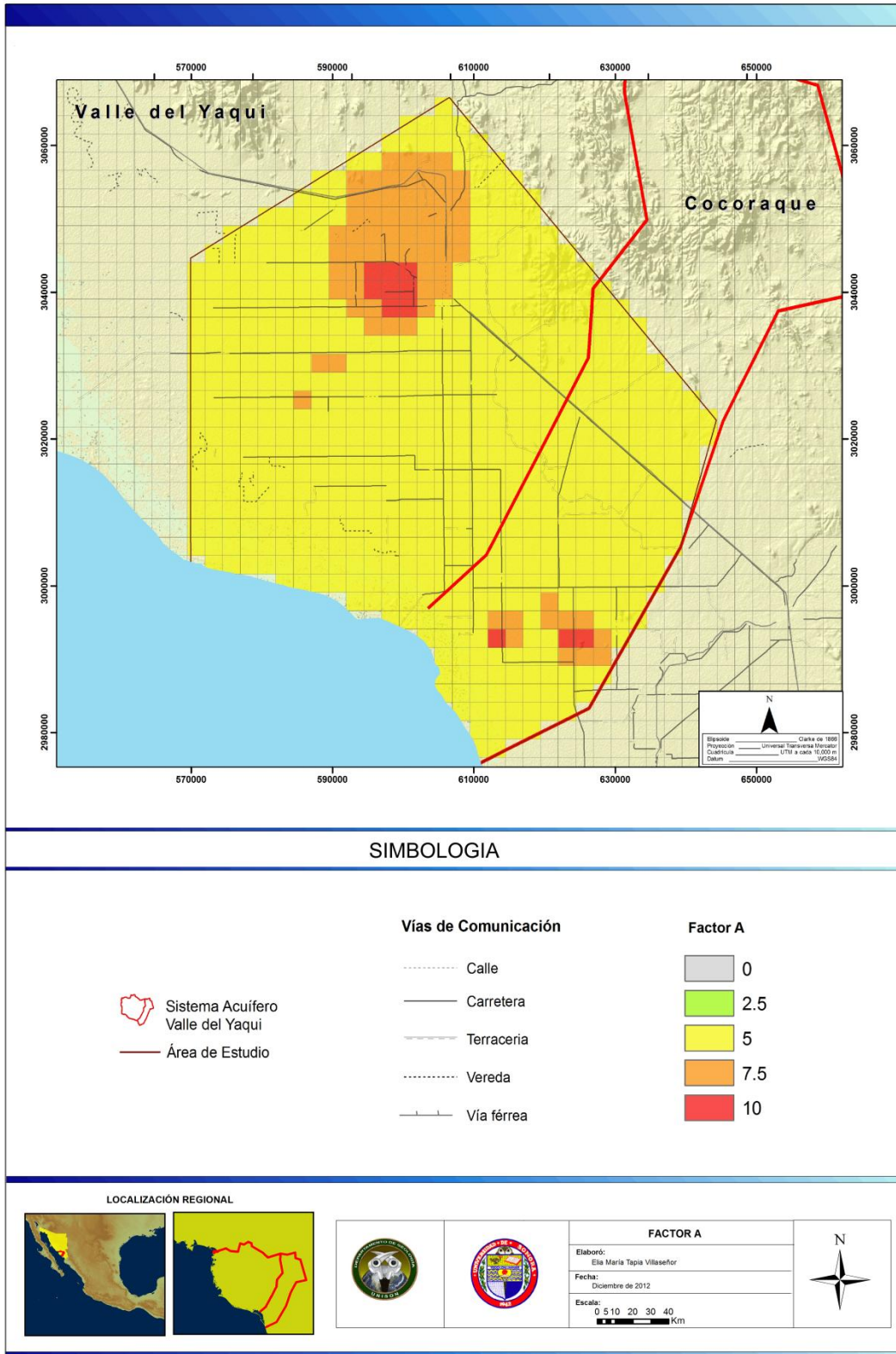


Figura 9.4 Parámetro A, Sistema Acuífero Valle del Yaqui

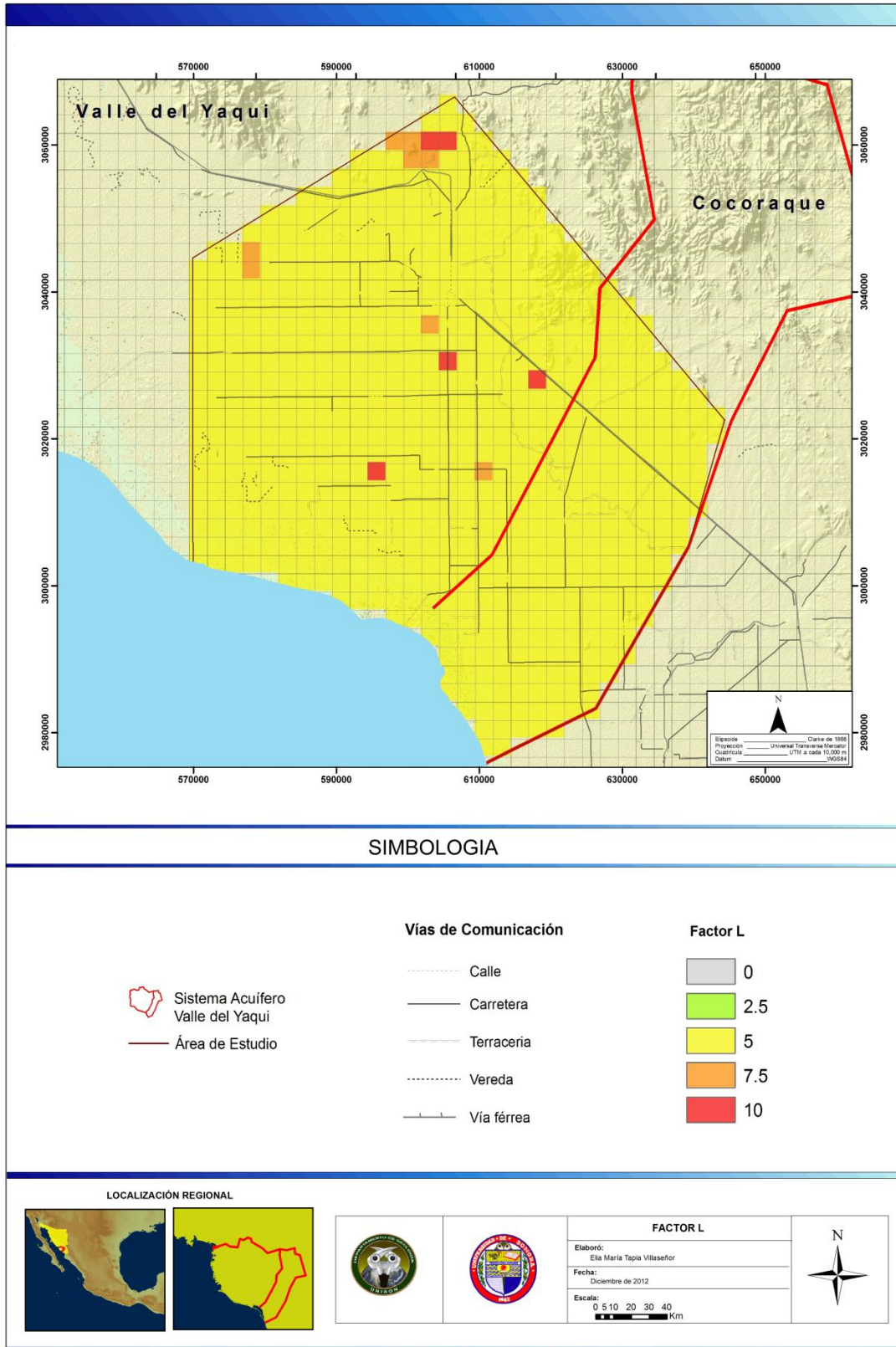


Figura 9.5 Parámetro L, Sistema Acuífero Valle del Yaqui

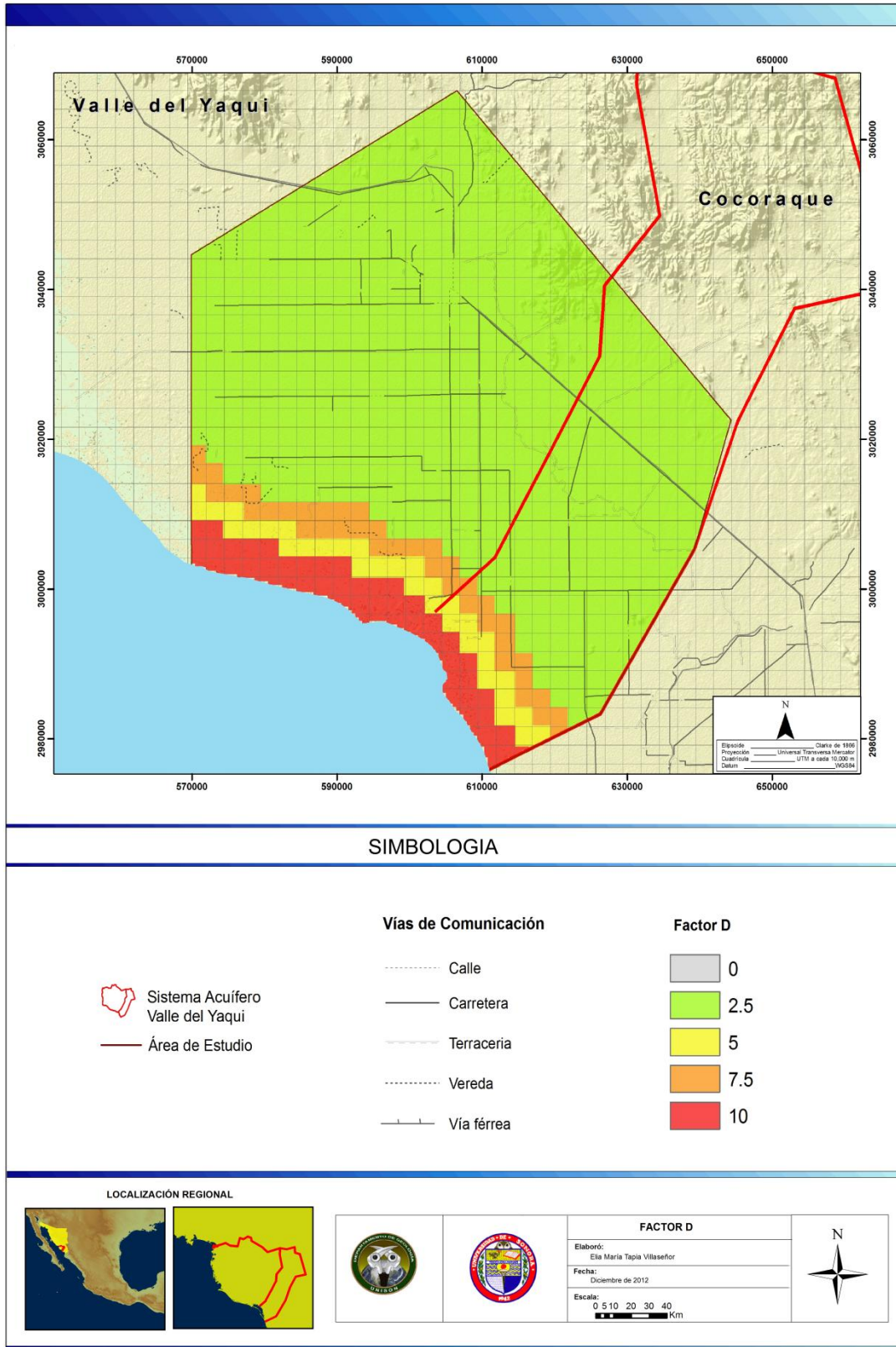


Figura 9.6 Parámetro D, Sistema Acuífero Valle del Yaqui

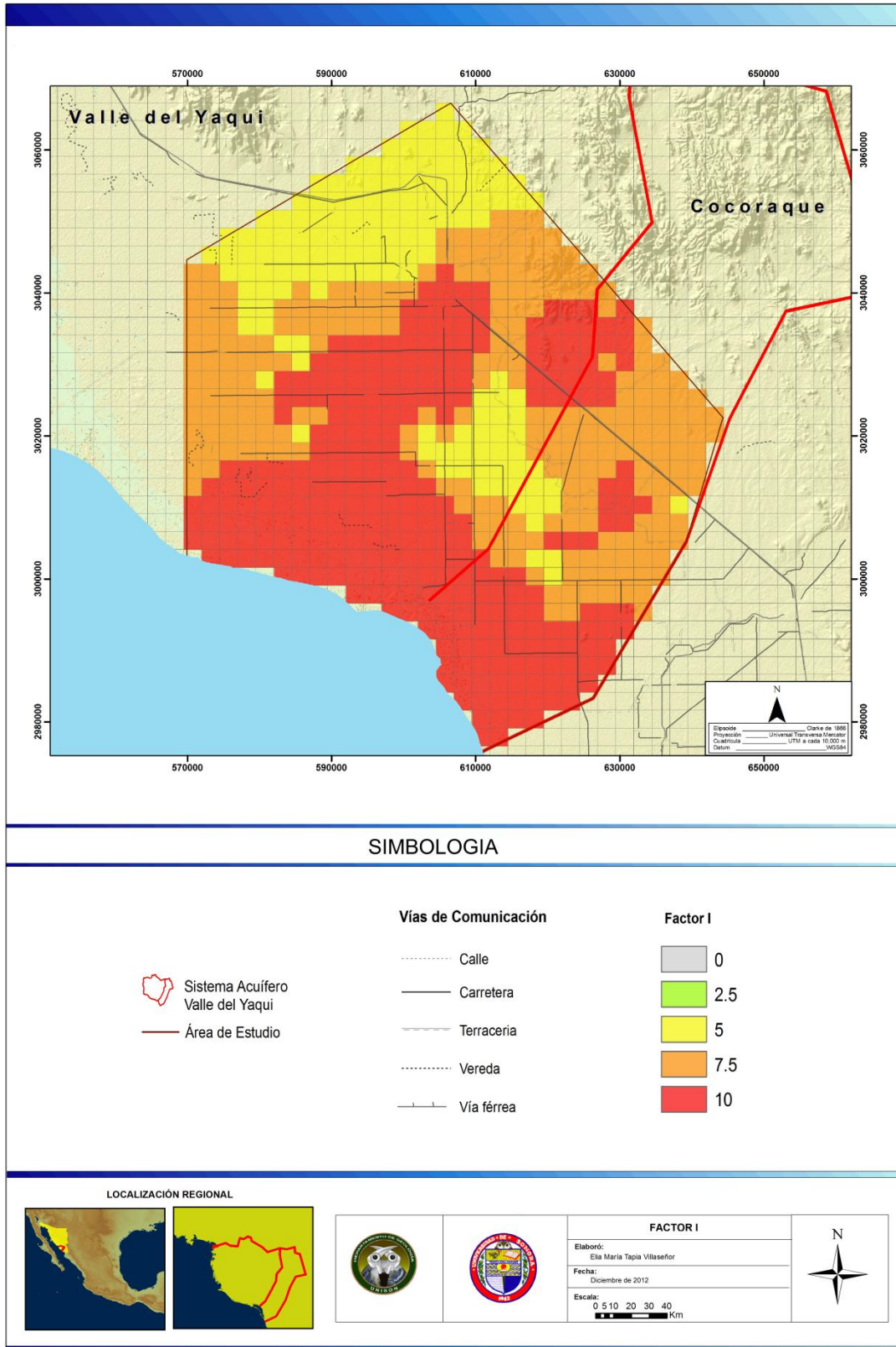


Figura 9.7 Parámetro I, Sistema Acuífero Valle del Yaqui

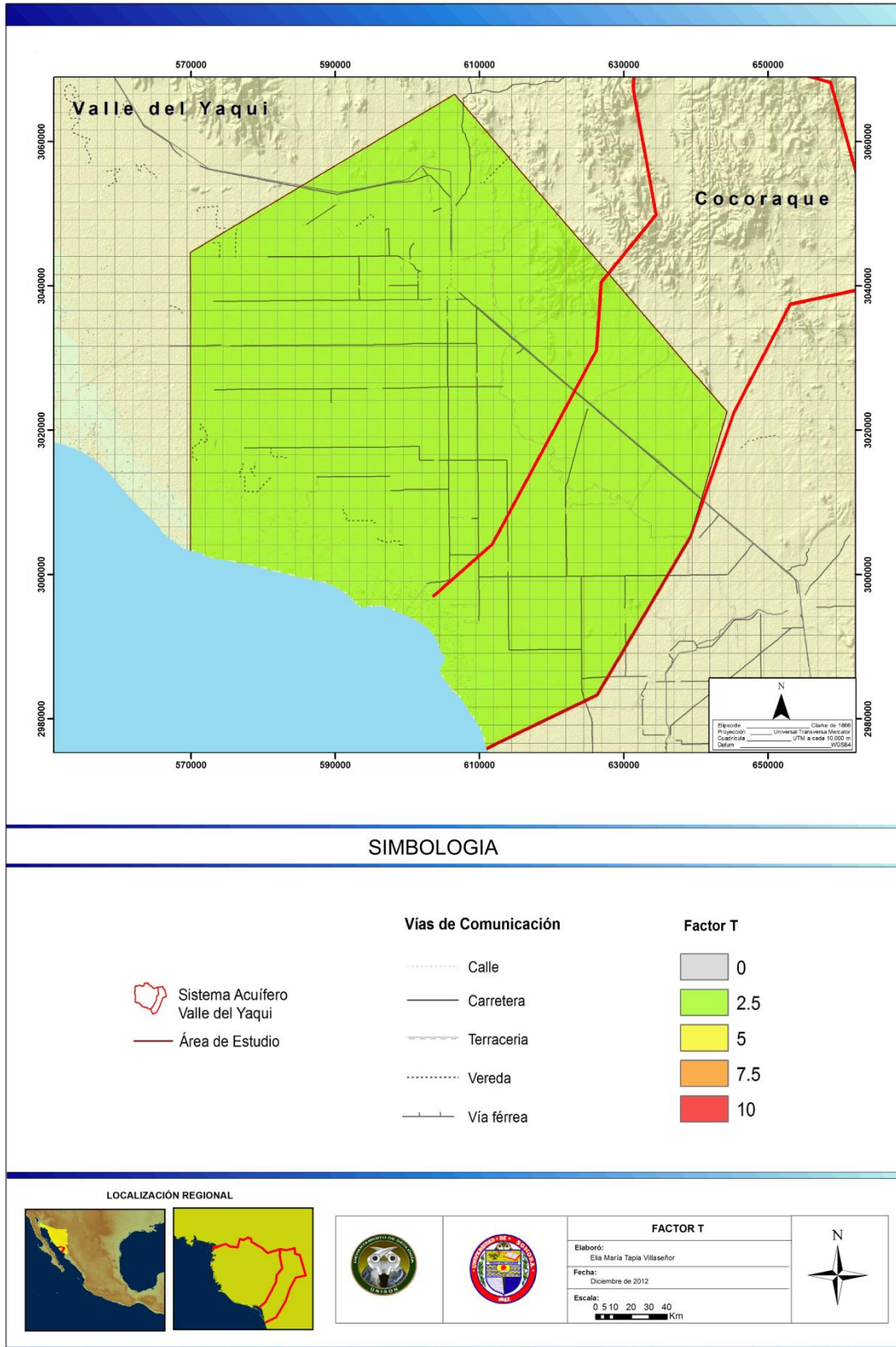


Figura 9.8 Parámetro T, Sistema Acuífero Valle del Yaqui

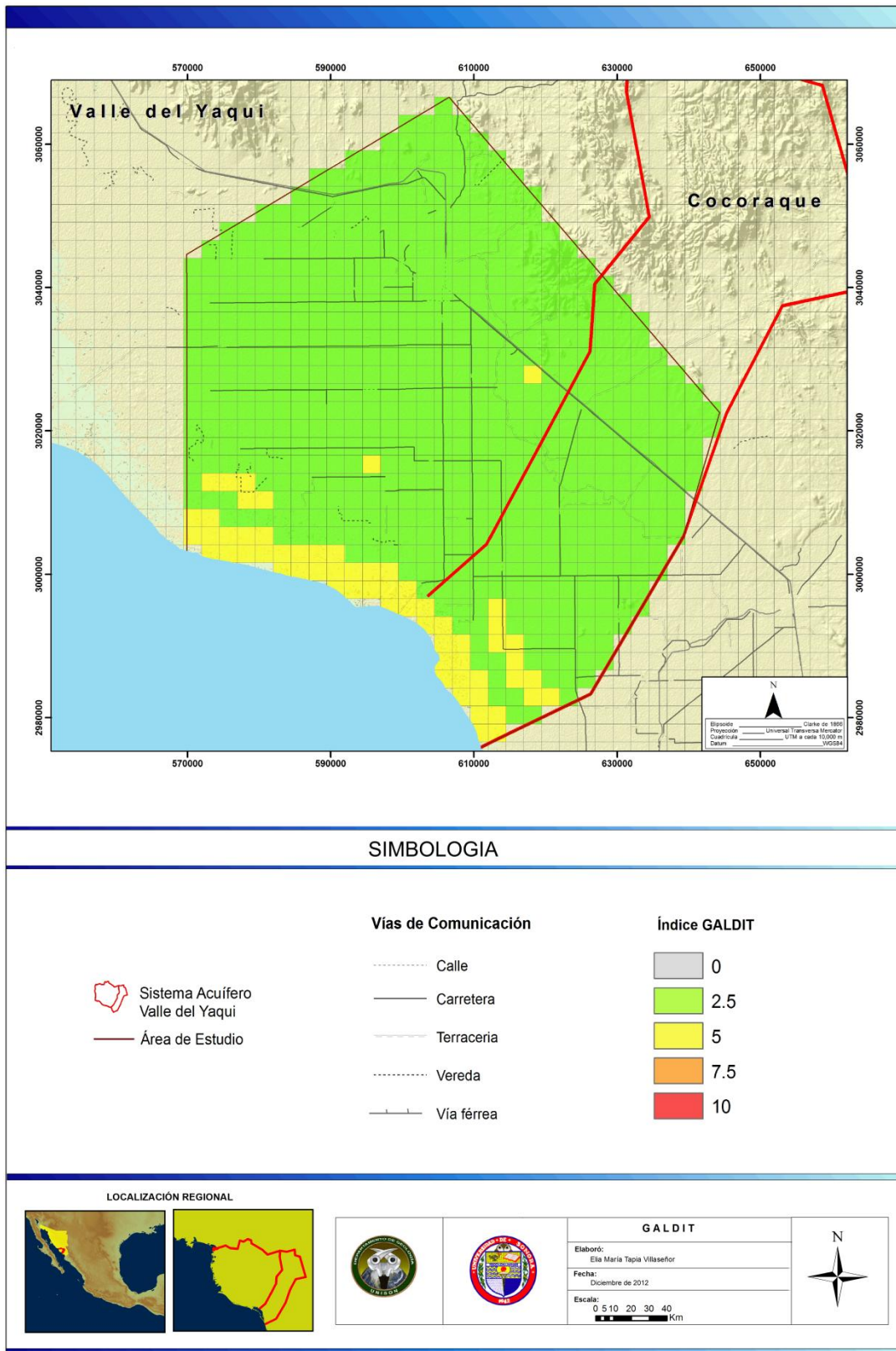


Figura 9.9 Índice GALDIT para la evaluación de vulnerabilidad intrínseca por intrusión salina, Sistema Acuífero Valle del Yaqui



10. CONCLUSIONES

Se presenta un análisis de las vulnerabilidades del Sistema Acuífero Valle del Yaqui al impacto del Cambio Climático, en particular a los aspectos de recarga, intrusión marina y elevación del nivel del mar.

Esto se realizó a partir de la información histórica disponible y los escenarios de Cambio Climático del IPCC. Los análisis se realizaron mediante la modelación del escurrimiento y las consecuencias en la recarga vertical en el Sistema Acuífero, el método de Gornitz para analizar la vulnerabilidad al alza del nivel del mar de la costa y el método GALDIT para análisis de vulnerabilidad a la intrusión.

Se utilizaron escenarios A2 y B1, para altas y bajas emisiones de gases de efecto invernadero respectivamente, lo que generó los siguientes resultados:

De acuerdo con los umbrales de precipitación determinados por medio del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para el período histórico de 1965 a 2010, se identificaron períodos de sequía extrema y excepcional para los escenarios de 2011 a 2099 utilizando el escenario A2 (menos favorable), alternados con períodos donde la precipitación supera dos desviaciones estándar con respecto a la media histórica. Se determinó el coeficiente de variación para precipitación y temperatura en La Angostura, El Oviachic y el Novillo, durante el período de observación de 1965 a 2010, en contraste con las proyecciones de cambio climático hasta 2099, obteniendo rangos de variación que van del 16% al 25% en La Angostura, del 18% al 26% en el Novillo y del 14 al 22% en el Oviachic. En lo que respecta a la temperatura, se identifican variaciones que van del 2.7% al 6.4% en La Angostura, del 1.7% al 5.6% en el Novillo y del 2.4 al 3.8% en el Oviachic.

El Escenario B1 (favorable) describe un comportamiento semejante al A2, con ligeros incrementos en precipitación media anual, y un coeficiente de variación que haciende de 16% a 20% en la subcuenca La Angostura, de 17 a 24% en El Novillo y de 8 a 14% en el Oviachic. La temperatura media anual en la Angostura y en El Oviachic será un grado centígrado menor en el escenario B1.

Se calculó el coeficiente de escurrimiento histórico para cada una las subcuencas de estudio de acuerdo con los registros de precipitación y de almacenamiento en presas, dando como resultado un coeficiente de 0.08 para La Angostura, 0.03 para El Oviachic, y 0.10 para El Novillo.



El escurrimiento en el área de estudio presenta variaciones producidas por los cambios de precipitación y temperatura en la zona, sin embargo, las proyecciones de recarga indican que utilizar políticas de transferencia adecuadas, el agua será suficiente para cubrir los requerimientos anuales de ciudad Obregón, Colonias Yaquis, los Pueblos Ribereños y el Distrito de Riego del Río Yaqui.

Además de los escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura, se calcula la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en el área de estudio, de acuerdo con el criterio Gornitz (1990) que exige una adaptación numérica de datos oceanográficos y geológicos, que resultan de la observación directa, información bibliográfica y de muestreo. Los resultados para vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar varían desde Muy Alta a Muy Baja, predominando la vulnerabilidad Muy Alta en toda la zona, debido principalmente a la topografía de la zona y las características litológicas.

En lo que respecta a la vulnerabilidad a la intrusión marina, se implementó el método indexado GALDIT para cartografiar la vulnerabilidad del Sistema Acuífero Valle del Yaqui a la intrusión salina. De acuerdo con el método indexado GALDIT, el Sistema Acuífero Valle del Yaqui presenta una vulnerabilidad baja a moderada a la intrusión salina.



11. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, L.**, 2009, Estimación Hidrológica Bajo Escenarios de Cambio Climático en Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.
- Adams, D. K., y A. C. Comrie**, 1997, The North American monsoon: Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 2197–2213.
- Alencáster, G.**, 1961, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del Estado de Sonora: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Paleontología Mexicana 11.
- Allen D. M., D.C. Mackie and M. Wei.**, 2004, Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada: Hydrogeology Journal, 12:270-290.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. and Petty, R.J.**, 1987, DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings: U.S. EPA Report 600/2-85/018.
- Anderson, B.E.; Greene, C.E.; Jones, D.C., and Dawson, J.E. Ehrlichiaewingii**, 1992, The etiologic agent of canine granulocytic ehrlichiosis: Int J Syst Bacteriol.
- Anderson, M.D. & Wossner, N.**, 1992, Applied ground water modeling: simulation.
- Anderson, T.H., Silver, L.T.**, 1977, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: Economic Geology, v. 72; 827-836.
- Ansaldo-Leyva, J.C.**, 1999, Estimación de la aportación media por infiltración del canal principal bajo en la sección de la batería de pozos que abastecen a Guaymas – Empalme en el acuífero del valle aluvial del río Yaqui: Ciudad Obregón, Sonora, México, Instituto Tecnológico de Sonora, Tesis de Maestría
- Arriaga, S. y T. Cavazos.**, 2009, Proyecciones Regionales de Cambio Climático para Baja California. Plan Estatal de Acción Climática para Baja California (PEAC): Comunicaciones Académicas, CICESE.
- Arriaga, S.**, 2008, Observed trends in extreme precipitation events on northwestern Mexico and southwestern United States and climate change scenarios: Ensenada, Baja California, México.
- Castro M.**, 2007, Los modelos climáticos globales [Conferencia] // Cursos de Verano de la Universidad de Cantabria. Proyección Regional de Escenarios de Cambio Climático. Técnicas y Proyectos en Curso. - Suances: [s.n.].



- Cavazos, T. y S. Arriaga., 2012,** Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the 21st century: *J. Climate*, 25, 5904–5915.
- Chachadi A.G & Lobo-Ferreira, J.P., 2005,** Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicator Descriptions. IAHS and LNEC, Proceedings of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources: Universidad e do Minho, Guimarães, Portugal.
- COST: Action 620, 2003,** Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: European Commission, Directorate-General for Research, Report EUR 20912, Luxemburg.
- Custodio, E. y Llamas, M. R., 1996,** Hidrología subterránea: Editorial Omega, Barcelona, Tomos I y II.
- Custodio, E., 1997,** Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos en la evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación Hidrológica: Asoc. Intern. Hidrogeólogos-Grupo Español.
- Damon, P.E., et al., 1983.** El Batolito Larámide (90-40 Ma) de Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional, Guadalajara, Jal., Memorias.
- Demek, J., (Ed.), 1972,** Manual of detailed geomorphological mapping, International Geographical Union, Commission on Geomorphological Survey and Mapping, Prague.
- Domenico, P. A. y F.W., Schwartz., 1998,** Physical and chemical hydrogeology: John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Douglas M., R. Maddox, K. Howard, y S. Reyes, 1993,** The Mexican monsoon: *J. Climate*, 6, 1665–1667.
- Fernández, M.A., Monreal, R., y S. Grijalva., 1993,** Carta Geológica de Sonora: Hermosillo, Son., Gobierno del Estado de Sonora, escala 1:500,000 (map).
- Freed, R., Furlow, J., 2005,** Sea level rise and groundwater sourced community water supplies in Florida.
- Freeze, R. A. & Cherry, J., 1979,** Groundwater: Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.
- Gastil, R. G., y Krummenacher, D., 1977,** Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahia Kino: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 88.



- Gogu, R. C. and Dassargues, A.,** 2000, Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods: *Environmental Geology*, 39, 549–559.
- Grijalva-Montoya.,** 2008, *Hidroestratigrafía del Valle del Río Yaqui, Sonora*: Universidad de Sonora, Departamento de Geología.
- Gutiérrez-Anguamea.,** 2011. Metodología para la Elaboración del Mapa Hidrogeomorfológico de la cuenca del Río Asunción: Universidad de Sonora, Departamento de Geología.
- Gutiérrez-Heredia.,** 2007, Uso de registros geofísicos y sondeos eléctricos verticales en la modelación de la salinidad y parámetros hidráulicos en el Valle del Río Yaqui: Universidad de Sonora, Departamento de Geología.
- Haertle, A.,** 1983, Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps: *IAHS Publ.* 142(2).
- Henry, C. D.,** 1986, East-northeast trending structures in western Mexico: Evidence for oblique convergence in the late Mesozoic: *Geology*, V. 14, p. 314 - 317.
- Horton R.E.,** 1945, Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology: *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 56
- ICATEC Consultores,** 1970, *Estudio Geohidrológico del Valle del Yaqui, Sonora (Distrito de Riego 041)*: Hermosillo, Sonora, México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Informe Interno para la Dirección de Aguas Subterráneas
- INEGI,** 1970, Carta de Suelos. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- INEGI,** 1991, Carta Edafológica. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- INEGI,** 1991, Carta Fisiográfica. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- IPCC Emissions Scenarios.,** 2000, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 570 pp.
- IPCC-SRES,** 2000, Special Report on Emissions Scenarios: A Special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press.
- IPCC-Climate Change,** 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.



- IPCC-WGI**, 2007, Global Climate Projections. In: Climate Change, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, [s.n.].
- Johnpeer G.D.**, 1977, Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, México: M. Sc. Thesis, Arizona State University.
- Johnpeer, G.D.**, 1977, Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, Mexico: M. Sc. Thesis, Arizona State University.
- Liggett J.E., and Talwar, S.**, 2009, Groundwater Vulnerability Assessments and Integrated Water Resource Management, Streamline Watershed Management: Vol. 13/no.1 Bulletin Fall 2009, article 4, 18-29.
- Lugo Hubp, J.I.**, 1988, Elementos de geomorfológica aplicada (Métodos cartográficos): Instituto de Geografía, UNAM, 128 p.
- Maurer, E. P., L. Brekke, T. Pruitt, and P. B. Duffy.**, 2007, Fine-resolution climate projections enhance regional climate change impact studies: Eos Trans. AGU, 88(47), 504.
- Maurer, E.P., A.W. Wood, J.C. Adam, D.P. Lettenmaier, and B. Nijssen**, 2002, A Long-Term Hydrologically-Based Data Set of Land Surface Fluxes and States for the Conterminous United States: J. Climate, 15(22), 3237-325.
- McDonald, M.G.; Harbaugh, A.W.**, 1984, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: USGS Open-File Report
- Menzel L., A. H. Thielen, D. Schwandtmd, G. Burger.**, 2003, Impact of Climate Change on the Regional Hydrology – Scenario-Based Modelling Studies in the German Rhine Catchment: Natural Hazards, 38: 45–61.
- Minjárez, J. I., et al.**, 2000, Carta Geológico Minera Ciudad Obregón G12-3: Servicio Geológico Mexicano.
- Minjarez J. I, Rangel M., Monreal R., Grijalva, F.J.**, 2003, Piezometría y censo de aprovechamientos de los acuíferos ubicados en las partes medias de las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo, Sonora: Instancia Revisora: Comisión Nacional del Agua.
- Minjárez, J I., Tapia E. M., y A. Montijo**, 2012, Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Instancia revisora: CONAGUA.



- Minjárez, J I., Tapia E. M., y A. Montijo.,** 2012, Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle Guaymas y San José de Guayma:. Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Instancia revisora: CONAGUA.
- Monreal, R., Rangel, M., Minjarez, I., Castillo, J., Morales M.,** 2003, Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero del Valle del Yaqui, Sonora: Instancia Revisora: Distrito de Riego del Río Yaqui y Comisión Nacional del Agua.
- Mullan, H.S.,** 1978, Evolution of the Nevadan orogen in northwestern Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 89, p. 1175-1188.
- Ortega-Gutiérrez F., Sedlock, R.L., Speed, R.C.,** 1994, Phanerozoic tectonic evolution of Mexico: Speed, R.C., (ed.), Phanerozoic evolution of North American Continent-Ocean Transitions, Geological Society of America, DNAG, continent-Ocean Transects, v. 13, Boulder, Co., p. 265-306.
- Ortega-Gutierrez, F., Mitre, S. L., Roldán, Q. J., Aranda G. J. J., Morán, Z. D., Alanis, A. S., Nieto, S. A.,** 1992, Carta Geológica de la República Mexicana escala 1:2,000,000: Washington, Williams & Heintz (Mapa), UNAM, Inst. Geología, Texto Explicativo, 1-78 p.
- Pilger, R.,** 1978, Tectonic controls of late Cretaceous sedimentation, western interior, USA: Nature 274, 653–657.
- Reyes, S., M. Douglas, y R. Maddox,** 1994, El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP): *Atmósfera*, 7 117.
- Roldán-Quintana et. al.,** 2004, El graben de Empalme, Sonora, México—magmatismo y tectónica extensional asociados a la ruptura inicial del Golfo de California: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3
- Selley,** 1976, Medios sedimentarios antiguos. H. Blumeedic: Madrid: 251 p.
- Strahler, A. N.,** 1957, Quantitative analysis of watershed geomorphology: Transactions American Geophysical Union. 38.
- Strahler, A. N.,** 1952, Hypsometric (area altitude) analysis of erosional topography: Geological Society of America Bulletin. 63.
- Tapia, E. M., Minjárez J.I., Minjárez C. M.,** 2010, “Escenarios de Cambio Climático en Sonora. Evaluación Preeliminar”. Universidad de Sonora. Departamento de Geología.
- Tarback, E. y Lutgens, F.** 1997, Earth Science: Prentice Hall, octava edición, New Jersey, USA.



- Valencia-Moreno, et al.**, 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: Geological Society of America Bulletin, 113.
- Willemink, J.**, 1988, Estimating natural recharge of groundwater by moisture accounting and convolution, Institute for Groundwater Studies: I. Simmers (ed.), Estimation of Natural Groundwater Recharge, 283-299 pp. D. Reidel Pub. Co. South Africa.
- Wilson, R.T.**, 1978, Reconnaissance geology and petrology of the San Carlos area, Sonora, Mexico: M. Sc. Thesis, Tempe, Arizona, Arizona State University.
- Wood, A.W., E.P. Maurer, A. Kumar, and D.P. Lettenmaier.**, 2002, Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States: J. Geophysical Research-Atmospheres, 107(D20), 4429.