



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, CIIDIR – OAXACA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

ACADEMIA DE INGENIERIA

**EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
DE LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC, OAXACA, MÉXICO: ANÁLISIS DE
VULNERABILIDAD.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

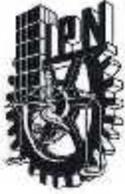
PRESENTA

EDWIN ANTONIO OJEDA OLIVARES

BAJO LA DIRECCIÓN DEL

DR. SALVADOR ISIDRO BELMONTE JIMÉNEZ

Santa Cruz, Xoxocotlán, Oaxaca, Diciembre de 2014



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 28 del mes de noviembre del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: "EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC, OAXACA, MÉXICO: ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD"

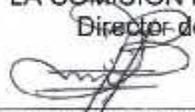
Presentado por el alumno:

Ojeda Apellido paterno	Olivares materno	Edwin Antonio nombre(s)
		Con registro: A 1 3 0 6 6 9

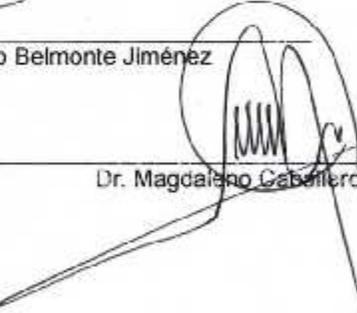
aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

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

LA COMISION REVISORA
 Director de tesis


 Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

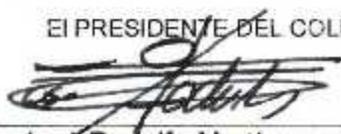

 Dr. Francisco Castellanos León


 Dr. Magdalena Caballero Caballero


 M. en C. María de los Angeles Ladrón de Guevara Torres


 Dr. Pedro Montes García

EI PRESIDENTE DEL COLEGIO


 Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas
 Encargado de la Dirección





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 28 del mes de noviembre del año 2014, el (la) que suscribe Ojeda Olivares Edwin Antonio, alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro A130669, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y cede los derechos del trabajo titulado: "Efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Atoyac, Oaxaca, México: análisis de vulnerabilidad", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó edwin0529uni@yahoo.es Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Ojeda Olivares Edwin Antonio



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

RESUMEN

Identificar la vulnerabilidad global espacial al cambio climático (CC) y los factores locales de estrés en un sistema determinado, es un paso importante en la formulación de estrategias y medidas de gestión y adaptación que permiten reducir en gran medida sus efectos negativos. El presente estudio muestra una alternativa para mapear e identificar los efectos del CC en la disponibilidad hídrica y su grado de afectación de una forma localizada dentro de la subcuenca Alto Atoyac. Se realizó un análisis de recarga hídrica frente al CC donde se muestran los efectos negativos que el CC tendrá dentro de la subcuenca, se obtuvieron reducciones del 37.58 y 55.52%, respectivamente para dos horizontes analizados (2015-2039, 2075-2099), ambos bajo un escenario RCP8.5. Con ayuda de percepción remota se analizaron 34 años (1979-2013) en el área de estudio para determinar los cambios de coberturas durante todo ese periodo, se encontró que en el área se perdió el 10% de su cobertura boscosa y selva baja, las zonas agrícolas-pastizales aumentaron 14.9% y las áreas urbanas aumentaron en 3%, la reducción de la cobertura boscosa representa una tasa anual de deforestación del 0.29%, mayor que las reportadas a nivel mundial por la FAO. Se determinó una ecuación para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica al CC a partir de variables regionales y locales lo que permitió localizar los efectos del CC dentro del área de estudio, los pesos para cada uno de las variables se encontraron mediante un proceso de toma de decisiones jerárquicas (AHP), donde las variables de población y socioeconómicas resultaron más importantes. Con este enfoque la subcuenca resultó ser vulnerable al CC para los dos horizontes planteados, presentando vulnerabilidad media y alta. Los principales municipios que presentaran vulnerabilidad alta para el primer horizonte y en los cuales se deben implementar medidas de adaptación en un futuro cercano y evitar problemas en la disponibilidad y contaminación hídrica son: Oaxaca de Juárez, Santa María Peñoles, Magdalena Mixtepec, Santa Inés del Monte, San Pablo Cuatro Venados, San Miguel Mixtepec, Santiago Apóstol, San Pedro Mártir, San Miguel Tilquiápam, Magdalena Teitipac, San Bartolomé Quialana, San Lucas Quiaviní, Santiago Matatlán, y para el futuro lejano se añaden a la lista: San Juan Teitipac, Santo Tomas Jalieza, San Antonio Castillo Velasco, Santa Ana Tlapacoyan, Teotitlán del Valle.

ABSTRACT

To identify the spatial vulnerability to climate change (CC) and local stressors factors in a system is an important management strategy to formulate adaptation measures to reduce in a great scale negative effects of climate change. This study present an alternative to map and identify the most vulnerable and exposed areas to climate change in a local scale within the sub basin Alto Atoyac. A Water recharge analysis to climate change was carried out and it showed the negative CC effects within the Atoyac subbasin, where were obtained water reduction of 37.58% and 55.52%, respectively in two CC horizon studied (2015-2039, 2075-2099), for RCP8.5 scenario. A remote sensing analysis was used to determine changes in land use within the study area in a 34 years period (1979-2013), the analysis showed that the rainforests and deciduous forest lost the 10% of their coverage, the urban area increased in a 3% and pasture-agricultural areas increased in a 14.9 %. With an annual ratio of deforestation of 0.29% higher of the global deforestation ratios for different period according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). A water vulnerability equation to CC was performed taking in count regional and local variables that let localize the CC effects in the study area, the variables weights were computed with an analytical hierarchy process (AHP), where the population and socioeconomic variables were the most important. With this approach the subbasin resulted vulnerable to CC for the two proposed horizons, showing high and media vulnerability. The municipalities to present high in a near future and in which is needed to take adaptation strategies to avoid water scarcity and contamination are: Oaxaca de Juárez, Santa María Peñoles, Magdalena Mixtepec, Santa Inés del Monte, San Pablo Cuatro Venados, San Miguel Mixtepec, Santiago Apóstol, San Pedro Mártir, San Miguel Tilquiápam, Magdalena Teitipac, San Bartolomé Quialana, San Lucas Quiaviní, Santiago Matatlán, and for the far future are included to the list: San Juan Teitipac, Santo Tomas Jalieza, San Antonio Castillo Velasco, Santa Ana Tlapacoyan, Teotitlán del Valle.

DEDICATORIA

A Dios por su infinito amor y misericordia, por darme la vida y permitirme haber llegado a esta bella Tierra.

A mi madre Danelia del Carmen Olivares Balladares, por ser un ejemplo de vida y por guiarme por el camino del bien durante toda mi vida, gracias por el amor y cariño brindado

A mi familia, a mis hermanas y hermano, por cada una de las experiencias vividas en mi tierra, gracias por todo su cariño, amor y apoyo.

A mis amigos, por haberme apoyado durante todo este tiempo, gracias por escucharme en mis momentos de tristeza y soledad, por los consejos brindados, y en especial a mis grandes amigos Mexicanos, ya que realmente me hicieron sentir en casa, su amistad y calidez no tiene precio.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por brindarme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa casa de estudio de formación científica y profesional, a través de su Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca, y a cada uno de sus miembros por su calidez y enseñanzas impartidas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado durante estos dos años de formación científica, mediante su programa de becas de posgrado y movilidad internacional.

*Al Programa de Becas de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI), por la beca otorgada para fomentar mi formación científica durante el periodo de mi maestría, a través del proyecto: **CONTRIBUCIÓN A GASES DE EFECTO INVERNADERO POR CAMBIO Y USO DE SUELO EN EL ESTADO DE OAXACA Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN (Clave: SIP 20140469).***

*A los miembros de la comisión revisora y jurado de tesis: **M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres, Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Pedro Montes García, Dr. Francisco Castellanos León, Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero** por sus recomendaciones para la realización y mejoramiento de mi tesis.*

*A la Universidad **SIMON FRASER** en Canadá, por haberme dado la oportunidad de realizar una estancia de investigación en esta prestigiosa casa de estudio a nivel internacional, y por todo el apoyo brindado para poder desarrollar los análisis necesarios para completar mi trabajo de tesis, y en especial agradezco al **Dr. Tim Takaro** por recibirme, por guiarme y darme los aportes necesarios durante el periodo de mi estancia de investigación, también agradezco a la **Dr. Diana Allen**, por los consejos y enseñanzas sobre la utilización del modelo **HYDROLOGY EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE**.*

*A mis maestros y tutores **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez** y **M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara** por haberme guiado durante estos dos años y sobre toda por la confianza brindada y la calidez ofrecida a través de su amistad, guía y asesoría, lo que permitió culminar con mi trabajo de tesis.*

Edwin Antonio Ojeda Olivares

*Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas; Y todo cuanto se puede desear, no es de compararse con ella. **Proverbios.8.11.***

Si pequeña es la patria una grande la sueña. R.D

CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
I-INTRODUCCIÓN.....	1
II- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
III- JUSTIFICACIÓN	2
IV- ANTECEDENTES GENERALES	3
V- HIPÓTESIS.....	4
VI- OBJETIVOS.....	4
CAPITULO 1.....	5
EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA RECARGA HÍDRICA DE LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC, OAXACA, MEDIANTE EL MÉTODO HYDROLOGY EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE.....	5
RESUMEN.....	5
1 INTRODUCCIÓN	5
2 MÉTODOS	6
2.1 Información Climática.....	6
2.2 Modelos de circulación general y escenarios de CC.....	8
2.3 Tipo de suelo, Nivel freático y conductividad Hidráulica.....	12
2.4 Análisis HELP.....	13
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
4 CONCLUSIONES	18
5 BIBLIOGRAFÍA.....	18
CAPITULO 2.....	21
CAMBIOS DE COBERTURAS EN LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC DURANTE EL PERIODO 1979-2013, USANDO PERCEPCIÓN REMOTA.....	21
RESUMEN.....	21
1 INTRODUCCIÓN	21
2 MÉTODOS	22
2.2 Corrección Atmosférica	24
2.3 Re-muestreo, ajuste de resolución espacial y temporal.....	24
2.4 Composiciones de bandas y selección de clases	24
2.5 Clasificación no supervisada y supervisada	24
2.8 Validación de clases.....	25
2.9 Análisis de cambios de coberturas y uso de suelo (LANDCHANGE MODELER).....	26
3. RESULTADOS.....	26
4 CONCLUSIONES	32
5. BIBLIOGRAFIA.....	33

CAPITULO 3	35
DETERMINACION DE LA IMPORTANCIA DE INDICES DE VULNERABILIDAD HÍDRICA AL CC PARA LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC MEDIANTE EL METODO ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP).....	35
RESUMEN.....	35
1 INTRODUCCIÓN	35
2 MÉTODOS	36
2.1 Índice de vulnerabilidad hídrica global	37
2.2 Índice de escurrimiento superficial	37
2.3 Índice de Población municipal	37
2.4 Índice de Marginación Social.....	37
2.5 Grado de explotación de acuíferos	38
2.6 Nuevas variables a analizar	38
2.7 Relación de variables	39
2.8 Análisis Matricial	40
2.9 Validación de resultados	41
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4. CONCLUSIONES	43
5. BIBLIOGRAFÍA.....	44
CAPITULO 4	46
VULNERABILIDAD HIDRICA DE LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC FRENTE AL CAMBIO CLIMATICO.....	46
RESUMEN.....	46
1 INTRODUCCIÓN	46
2 MÉTODOS	47
2.1 Determinación de la Vulnerabilidad	47
2.2 Normalización de variables.....	48
2.3 Índice de uso de suelo y cambio de coberturas	48
2.4 Índice de potencial contaminación agrícola	48
2.5 Índice de escorrentía superficial al CC.....	51
2.6 Índice de recarga hídrica al CC.	53
2.7 Índice del estado del acuífero.....	53
2.8 Índice de Población Municipal.....	53
2.9 Índice de marginación social.....	54
2.10 Escala de vulnerabilidad.....	54
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
4 CONCLUSIONES	57

5. BIBLIOGRAFIA.....	58
CONCLUSIONES GENERALES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFIA GENERAL	62
ANEXO A.....	64

INDICE DE CUADROS

Tabla1.1. Estaciones Meteorológicas dentro del área de estudio.....	6
Tabla1.2. Anomalías climáticas respecto de las normales históricas, para los modelos y escenarios de CC.....	12
Tabla1.3. Clasificación de suelos y conductividad hidráulica (clasificación USDA.).....	12
Tabla 1.4. Comparación de diferentes estudios de disponibilidad hídrica realizados dentro de la subcuenca Alto Atoyac.....	16

Tabla 2.1.Características de imágenes LANDSAT por cada uno de sus sensores, Fuente: USGS, GLCF.....	22
Tabla2.2. Bandas espectrales de los sensores LANDSAT con sus respectivas longitudes de onda.	23
Tabla2.3. Clases de coberturas y uso de suelo seleccionadas para la subcuenca Alto Atoyac	23
Tabla2.4. Combinaciones de falso color equivalentes para sensores LANDSAT.	24
Tabla2.5. Valoración de índices de concordancia Kappa para diferentes intervalos.	25
Tabla2.6. Análisis de Índice de concordancia Kappa para diferentes clasificadores.	26
Tabla2.7. Valores de concordancia Kappa entre clases de los diferentes sensores, para el clasificador de Máxima verisimilitud.	27
Tabla2.8. Valores de concordancia Kappa entre clases de los diferentes sensores, para el clasificador de Máxima verisimilitud.	28

Tabla3.1. Valores de intensidad de importancia para crear el análisis matricial. Fuente Saaty, 2008.	37
Tabla3.2. Índices para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica y pesos. Fuente (IMTA, 2010).....	38
Tabla3.3. Consolidado de variables analizadas para determinar la vulnerabilidad hídrica en la subcuenca Alto Atoyac.....	39
Tabla3.4. Valores promedios del índice de consistencia, para diferente número de variables y bajo diferentes cálculos de autores.....	42
Tabla3.5. Peso de variables analizadas para determinar la vulnerabilidad hídrica en la subcuenca Alto Atoyac	43

Tabla4.1. Coberturas y uso de suelo dentro de la subcuenca alto Atoyac obtenidas mediante análisis de percepción remota en un análisis de 34 años y normalizados entre 0 y 1, según escala asignada.	48
Tabla4.2. Puntos de muestreo del agua dentro de la subcuenca Alto Atoyac, mostrando los valores de nitratos obtenidos en cada análisis y normalizados entre 0 y 1, respecto del valor permisible por la norma de calidad de agua para la República Mexicana.	51

Tabla4.3. Clasificación de los diferentes tipos de suelos según la norma obligatoria Mexicana NOM-011.....	51
Tabla4.4. Diferentes valores de K en función del tipo y uso de suelo.	52
Tabla4.5. Valores de recarga hídrica dentro de la Subcuenca Alto Atoyac, obtenidas mediante el modelo HELP, para diferentes periodos y escenarios de CCs y normalizados entre 0 y 1.....	53
Tabla4.6. Escala de vulnerabilidad asignada para determinar la vulnerabilidad dentro de la subcuenca Alto Atoyac el 0 representa vulnerabilidad baja o nula mientras que el 1 es el mayor valor que se puede obtener representando una alta vulnerabilidad.	54

INDICE DE FIGURAS

Figura1.1. Distribución espacial de las estaciones Meteorológicas dentro de la subcuenca Alto Atoyac.	7
Figura1.2. Normales climáticas para las estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca Alto Atoyac.	8
Figura1.3. Normales climatológicas de los Modelos de circulación general de CC GFDL CM3 y HADGEM2-ES, bajo un escenario RCP8.5.....	10
Figura1.4. Temperaturas media anual obtenida con el Modelo GFDL-CM3 para los futuros cercanos 2015-2039 y lejano 2075-2099, bajo un escenario RCP85.	11
Figura1.5. Precipitación media anual obtenida con el Modelo GFDL-CM3 para los futuros cercanos 2015-2039 y lejano 2075-2099, bajo un escenario RCP8.5.	11
Figura1.6. Profundidades del nivel freático dentro de la zona de estudio (Información de obtenida del monitoreo realizado en el área).	12
Figura1.7. Distribución del tipo de suelo dentro del área de estudio.	13
Figura1.8. Esquema del perfil de un vertedero identificando sus propiedades típicas (Berger and Schroeder, 2013)	14
Figura1.9. Metodología para estimar los rangos de recarga y las áreas de recarga hídrica (Jyrkama and Sykes, 2007)	14
Figura1.10. Relación entre el Número de curva SCS y para suelos por defecto en los Estados Unidos para varios niveles de Vegetación. (Berger and Schroeder, 2013).	15
Figura 1.11. Recarga hídrica histórica y recarga hídrica bajo diferentes horizontes climáticos.	16
Figura 1.12. Mapas con sus respectivas zonas de recarga hídrica y rangos de recarga dentro de subcuenca Alto Atoyac, calculados mediante el modelo HELP e integradas en un sistema de información geográfica, para un periodo histórico, horizontes climáticos 2015-2039, 2075-2099 para un modelo de circulación general GFDL-CM3 y un escenario de CC RCP85.	17
Figura2.1. Esquema de la clasificación de mínima distancia.....	25
Figura2.2. Firma espectral de coberturas para el año 1979, tomadas del LANDSAT MSS, procesadas en IDRISI.	27
Figura2.3. Firma espectral de coberturas para el año 1996, tomadas del LANDSAT TM, procesadas en IDRISI	27
Figura2.4. Firma espectral de coberturas para el año 2013, tomadas del LANDSAT OLIS, procesadas en IDRISI	28
Figura2.5. Pérdidas y ganancias entre las diferentes coberturas para la subcuenca Alto Atoyac para el periodo 1979-1996.	29

Figura2.6. Pérdidas y ganancias entre las diferentes coberturas para la subcuenca Alto Atoyac para el periodo 1996-2013.	29
Figura2.7. Coberturas para el año 1979, obtenidas de imágenes LANDSAT5, Sensor TM y procesadas en IDRISI mediante percepción remota.	30
Figura2.8. Coberturas para el año 1996, obtenidas de imágenes LANDSAT5, Sensor TM y procesadas en IDRISI mediante percepción remota.	31
Figura2.9. Coberturas para el año 2013, obtenidas de imágenes LANDSAT 8, Sensor OLIS y procesadas en IDRISI, mediante percepción remota.....	32

Figura3.1.Relación entre variables analizadas para determinar la vulnerabilidad hídrica en la subcuenca Alto Atoyac.....	40
--	----

Figura4.1.Mapas de vulnerabilidad hídrica global considerando la metodología planteada por el IMTA, en su Atlas de vulnerabilidad hídrica global al CC.....	55
Figura4. 2.Vulnerabilidad hídrica al CC, calculado con variables planteadas para localizar sus efectos dentro de subcuenca Alto Atoyac.....	56

ANEXOS

Figura A1. Índice de población municipal normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.....	65
Figura A2. Índice de Marginación social normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.....	66
Figura A3. Índice de cambio de coberturas y uso de suelo normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.	67
Figura A4. Índice de recarga hídrica al CC, para el periodo 2015-2039, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto At.....	68
Figura A5. Índice de recarga hídrica al CC, para el periodo 2075-2099, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.	69
Figura A6. Índice de escorrentía superficial hídrica al CC, para el periodo 2015-2039, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac...	70
Figura A7. Índice de escorrentía superficial hídrica al CC, para el periodo 2075-2099, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac...	71
Figura A8. Índice de potencial contaminación agrícola, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.	72
Figura A9. Índice de explotación de acuíferos, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.....	45

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

I-INTRODUCCIÓN

El agua es considerada como uno de los recursos naturales más esenciales, y aun así los sistemas de agua dulce son amenazados por las actividades humanas y pueden verse afectadas aún más con el cambio climático (CC), de origen antropogénico. Donde el 80% por ciento de la población mundial está expuesta a un sinnúmero de amenazas en la seguridad del agua dulce debido a varios factores de estrés siendo la población y el CC los más influyentes (Chartes et al., 2010, Vörösmarty et al., 2010).

Estos factores de estrés hídrico, o la falta de suficiente agua dulce per cápita, que afectan a la población, pueden ser el resultado de la sobre explotación, o por la reducción del agua debido al decremento de precipitaciones y los suministros de almacenamiento de agua (Parish et al., 2012). Esto está estrechamente relacionado al CC ya que reducciones en la precipitación y el incremento de las temperaturas también darán lugar a cambios en los flujos de agua y sistemas de almacenamiento (Mcfarlane et al., 2012, Ali et al., 2012). Un sistema muy importante a tomar en cuenta en lo que a vulnerabilidad y disponibilidad se refiere es el sistema acuífero o el agua subterránea, ya que son las únicas fuentes permanentes de agua en regiones áridas o semiáridas y su recarga o recuperación y los cambios en los niveles freáticos está vinculada a las variaciones en la temperatura y la precipitación (Ali et al., 2012), esto sumado a otros factores como cambios en el uso del suelo y coberturas vegetales, que aumentan o disminuyen la escorrentía superficial, haciéndolo de esta manera al sistema más o menos vulnerable.

Por lo que en el siguiente estudio se determinan cuáles son los efectos negativos del CC sobre el recurso hídrico en la subcuenca Alto Atoyac, Oaxaca mediante un análisis de vulnerabilidad hídrica frente al CC. La tesis está estructurada en cuatro principales capítulos, los cuales se desarrollan en forma de artículos, debido a la extensión de los mismos. En el primer capítulo se determina la recarga hídrica de la subcuenca ante el CC, mediante el modelo HELP, se identifican las áreas de recarga con sus respectivos rango de recarga para un escenario de CC RCP8.5, para dos horizontes (2015-2039, 2075-2099). En el segundo capítulo se realiza un análisis de percepción remota, de una serie de imágenes tipo LANDSAT dentro del área de estudio, para determinar los cambios en coberturas y uso de suelo ocurridos en la subcuenca Alto Atoyac en los últimos 34 años (1979-2013). En el tercer capítulo se realiza un análisis de Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) de toma de decisiones para determinar el valor de importancia de las variables planteadas para el análisis de vulnerabilidad dentro de la subcuenca. En el cuarto capítulo, se hace una integración donde se reúnen los análisis realizados anteriormente para determinar la vulnerabilidad hídrica de la subcuenca Alto Atoyac frente al CC.

II- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de la Subcuenca Alto Atoyac, Oaxaca, ¿Cuáles son las áreas o municipios más vulnerables o propensos a ser afectados por los efectos del CC en su disponibilidad hídrica para horizontes de CC?. La variabilidad climática producto del CC afectará tanto la cantidad como la calidad del recurso hídrico, conocer los lugares más vulnerables a ser afectados puede proporcionar información necesaria para que los actores y gestores tomen las medidas de adaptación adecuadas y de esta forma se puedan reducir sus efectos negativos.

III- JUSTIFICACIÓN

El agua es un recurso indispensable para la vida y se encuentra presente en cada una de nuestras actividades, es un recurso finito, vulnerable y susceptible a los cambios, el cual sirve para atender las necesidades del ser humano. Este trabajo se puede justificar en torno a cinco grandes vertientes:

Científico: El estudio permitirá identificar y usar variables fáciles de determinar en una determina área, con el fin de calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de tal forma que permita conocer sus efectos de manera local.

Tecnológico: Implementación de tecnologías simples que permitan un desarrollo sustentable (sistemas de riego más eficientes en áreas vulnerables, construcción de pozos de infiltración, ollas, etc.).

Económico: Cuando nos referimos al recurso hídrico desde el punto de vista económico podemos ver la relevancia que este tiene para la economía tanto de los Valles Centrales de Oaxaca como del país mismo. La economía depende en gran parte de la disponibilidad del recurso agua, por lo que saber su comportamiento tanto temporal como espacial es de vital importancia para los gobiernos locales (agricultura, ganadería, forestal, turismo, industria etc.). En América Latina y el Caribe el costo por desastres o eventos extremos asociados a fenómenos climáticos supera los 5 mil millones de dólares al año (Conde, 2008). En los Valles Centrales la actividad agrícola representa la actividad económica principal y el 87.6% del agua del acuífero se aprovecha para esta actividad.

Social: Unos de los primeros sectores afectados por el CC se espera que sea el sector hídrico, el cual se manifestará en alteraciones del ciclo hidrológico modificando el acceso que las comunidades tienen al agua (Velasco et al., 2013). El uso público-urbano y domestico del agua en la subcuenca representa el 9.5%, por lo que identificar zonas vulnerables permitirán definir algunas medidas de adaptación que ayuden a reducir los efectos negativos.

Medio Ambiental: Se podrán implementar planes de gobernanza, gestión, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico, lo que permitirá la recuperación de los niveles piezométricos de agua subterránea, reducción de contaminación entre otros.

IV-ANTECEDENTES GENERALES

El área de estudio está comprendida en la región de los Valles Centrales de Oaxaca, ubicados en la parte central del estado de Oaxaca, formados por tres zonas: Valle de Etlá, Valle de Tlacolula y Valle de Zaachila. La región es una de las ocho en que se divide geográfica y administrativamente la entidad. Limita al oeste con la región de la Mixteca, al noroeste con la Cañada, al norte con la Sierra de Juárez, al este con el Istmo de Tehuantepec y al sur con la Sierra Sur. El área de estudio llamada subcuenca Alto Atoyac está entre las coordenadas geográficas 16°30' y 17°25' de latitud norte, 96°15' y 97°00' de longitud oeste, con un área de extracción aproximadamente de 1,130 km² y la cuenca con un área de 3,744.64 km² (CNA, 2003, Pérez et al., 2010).

Hablando de forma general respecto a los estudios de CC global y sus posibles efectos en México, tienen como antecedente fundamental el estudio de país, realizado en el año 2000 (Conde, 2000), donde se plantean posibles escenarios de CC en sectores como los recursos hídricos, agricultura, entre otros. El estudio constató que el país resultaría muy vulnerable a la modificación climática considerando los procesos de desertificación y sequía meteorológica, en especial al norte y en las zonas más densamente pobladas. Las actividades productivas que dependen del agua como principal insumo se verán afectadas por el CC al modificarse la distribución del agua (Gay, 2000).

Se propusieron posibles escenarios de CC a futuro (Conde, 2000). Al mismo tiempo que se siguen generando modelos que permitan evaluar los posibles efectos de ese CC en los sistemas biofísicos. Otros estudios de CC siguen la siguiente metodología: Definir alcances, evaluar impactos, evaluar adaptación, evaluar integralmente la vulnerabilidad e incluir la información para reducir la vulnerabilidad y aumentar la adaptación (Tim et al., 2004).

(IPCC, 2007), aborda el tema de la vulnerabilidad de los sistemas hidrológicos desde el punto de vista de tres componentes para el cálculo de la vulnerabilidad: Exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación o resiliencia.

(IMTA, 2010), elaboró el atlas de vulnerabilidad hídrica global al CC para la República mexicana basado a en los componentes del IPCC, toma en cuenta estos componentes y los asocia a las siguientes variables: Esguerrimiento superficial, población municipal, índice de marginación social y grado de exposición de los acuíferos, con el fin de calcular índices que permitan conocer la vulnerabilidad hídrica global.

(Green et al., 2011), hacen una revisión sobre los estudios e investigaciones relacionadas al impacto del CC sobre las aguas subterráneas. Afirman que tanto el agua superficial como el agua subterránea son vulnerables al CC con un amplio rango de afectaciones para la sociedad y los ecosistemas. A la fecha muchas de las investigaciones se han enfocado en torno a las aguas superficiales debido a su visibilidad, accesibilidad, y al hecho de que la afectación del CC es más obvio. Hasta muy recientemente los gestores y políticos de los recursos hídrico

se han dado cuenta del papel importante que juega el agua subterránea al constatar la demanda de ésta para consumo, actividades industriales, agrícolas y sustentación de los ecosistemas así como la adaptación y la mitigación de los impactos junto con las actividades humanas. Aunque la mayoría de los escenarios de CC presentan variabilidades en la precipitación, temperatura y evapotranspiración habrán diferentes efectos en los acuíferos dependiendo de la variabilidad espacial, en las propiedades hidrogeológicas y distancias de las zonas de recarga.

(Jun et al., 2013, Kim and Chung, 2013, Wang et al., 2012), evaluaron la vulnerabilidad hídrica al CC, y obtuvieron índices para diferentes componentes del sistema, para el cálculo de la vulnerabilidad dentro de sus áreas de estudio.

El IPCC, 2013, afirmó que el CC es una realidad y sus principal causa es antropogénica con una certeza del 95%. Este cambio ha aumentado la intensidad y frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos lo que ha afectado el ciclo hidrológico.

V- HIPÓTESIS

La subcuenca Alto Atoyac es sensible a los efectos del CC antropogénico, por lo que si se integran las variables que permitan analizar los efectos locales que tendrá en la cantidad y calidad del recurso hídrico, se tendrán criterios que permitan tomar las medidas de gestión adecuadas para su conservación.

VI- OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar la vulnerabilidad hídrica ante el CC de la subcuenca Alto Atoyac, para diferentes horizontes climáticos.

Objetivos específicos

- Calcular los cambios de coberturas ocurridos en la subcuenca Alto Atoyac en un periodo de 34 años.
- Identificar zonas de recarga hídrica dentro de la subcuenca Alto Atoyac mediante el uso del código HELP3 y ARCGIS.
- Determinar la vulnerabilidad hídrica de la subcuenca Alto Atoyac mediante el uso de variables regionales y locales.

CAPITULO 1.

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA RECARGA HÍDRICA DE LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC, OAXACA, MEDIANTE EL MÉTODO HYDROLOGY EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE.

RESUMEN

Los retos que enfrenta el recurso hídrico debido al CC global son la disponibilidad y calidad para los diferentes usos. El recurso se encuentra bajo un estrés alto debido a muchos factores, principalmente antropogénicos donde la población es la responsable de la sobreexplotación y contaminación de las fuentes de agua, una situación muy común en los Valles Centrales de Oaxaca, donde el 87.6% del agua subterránea es usada para propósitos agrícolas y el 9.5 % para usos público-urbanos y domésticos (Pérez et al., 2010). Esto realmente representa una situación de estrés para el recurso, sin incluir los efectos negativos que tendrá el CC sobre éste. Se modeló la recarga hídrica directa de la precipitación en la subcuenca Alto Atoyac en un área de 3764.44 km², mediante el método HELP Se utilizaron 5 estaciones meteorológicas dentro del área de estudio, las cuales cumplieron con el criterio de series de más de 30 años de datos completas analizando los periodos históricos desde 1959 hasta 2010, obteniendo la recarga histórica para la subcuenca. Para el análisis fue necesario también la información de uso y tipo de suelo la cual fue obtenida de las base de datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI) y de las profundidades del nivel freático del área obtenida del monitoreo que se ha venido realizando en la zona de estudio. Para determinar los efectos del CC en la recarga hídrica, se compararon dos modelos de circulación general el GFDL-CM3 y HADGEM2-ES obtenidos del Atlas Climático Digital de México, bajo el escenario de CC RCP8.5, para el futuro cercano 2015-2039 y el futuro lejano 2075-2099. Fueron identificadas tres diferentes texturas de suelo (fina, media, gruesa), el modelo fue poco sensible a los cambios en profundidades del nivel freático que varía de 0-20 m bajo las texturas gruesas y medias. El modelo fue realizado bajo un número de curva promedio de 48 según estudios anteriores. La recarga promedio anual durante el periodo histórico fue de 86.97 millones de metros cúbicos, para el futuro cercano se redujo en un 37.58% y para el futuro lejano la reducción fue de 55.52%, respecto de la recarga histórica, siendo notorios los efectos que tendrá el CC en la recarga hídrica aunado a lo vulnerable del sistema. La información fue integrada en un SIG para poder visualizar las zonas de recarga hídrica con sus diferentes rangos de variación.

1 INTRODUCCIÓN

Estudios recientes han concluido que casi el 80% de la población mundial está expuesta a significantes factores de estrés que ponen en peligro la seguridad del agua potable (Vörösmarty et al., 2010). La población se ve directamente afectada por el estrés hídrico, o la falta de suficiente agua potable per cápita. El estrés hídrico puede ser el resultado de la sobreexplotación de las fuentes de agua o la reducción de la cantidad de agua disponible debido a la disminución en las precipitaciones y de los suministros de almacenamiento

(Parish et al., 2012), el último como consecuencia del CC (bajas precipitaciones, altas temperaturas). Según el Panel Intergubernamental Sobre CC (IPCC, por sus siglas en inglés), en su quinto reporte afirman que el CC es una realidad, y que aun reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los efectos serán irreversibles (IPCC, 2013). Comprender los efectos del CC representa un verdadero reto, y más aún cuando se habla sobre el agua subterránea, debido a que éste puede afectar los procesos hidrológicos y los recursos de agua subterránea de manera directa o indirecta, en formas que aún no han sido suficientemente exploradas (Dettinger and Earman, 2007, Green et al., 2011). La mayor cantidad de datos y predicciones climáticas proveen evidencia suficiente que los recursos hídricos son vulnerables al CC y fácilmente afectados por éste, representando un riesgo para la sociedad y los ecosistemas (Bates et al., 2008). Los impactos más obvios debido al CC en los recursos hídricos son los cambios en los niveles freáticos y calidad del agua superficial (Leith and Whitfield, 1998), también hay efectos potenciales en la calidad y cantidad del agua subterránea (Bear and Cheng, 1999). El CC probablemente tendrá numerosos efectos sobre la recarga hídrica (Aguilera and Murillo, 2009), aunque muchos estudios han predicho reducciones en la recarga debido a este fenómeno (Herrera-Pantoja and Hiscock, 2008), no obstante los efectos no pueden ser negativos para el acuífero durante todo el periodo de tiempo (Jyrkama and Sykes, 2007). El objetivo principal de este análisis es calcular la recarga hídrica para la subcuenca Alto Atoyac e identificar las zonas de recarga hídrica dentro de la subcuenca mediante el uso del HYDROLOGY EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE (HELP) y el sistema de información geográfica ARCGIS.

2 MÉTODOS

2.1 Información Climática

Se usaron 5 estaciones meteorológicas dentro del área de estudio, el principal criterio de selección fue contar con estaciones con más de treinta años de series completas de tiempo. La información se tomó del Sistema Meteorológico Nacional (SMN, 2010). En la tabla 1.1 se muestra el nombre de las estaciones meteorológicas usadas con sus promedios climáticos y coordenadas de ubicación.

ESTACIÓN	NOMBRE	Precipitación Promedio (mm/año)	Temperatura Promedio (°C)	COORDENADAS (LAT/LONG)
20151	San Francisco Telixtlahuaca	774.4	19	17°18'00"N, 96°54'00"O
20034	Etla	753.5	19.7	17°12'26"N, 96°47'59"O
20079	Oaxaca	746	21.3	17°04'59"N, 96°42'35"O
20044	Jalapa del Valle	761.6	18.9	17°03'57"N, 96°52'42"O
20118	San Miguel Ejutla	671.9	20.9	16°34'46"N, 96°44'14"O

Tabla 1.1. Estaciones Meteorológicas dentro del área de estudio.

En la Figura 1.1 se muestra el mapa de la subcuenca Alto Atoyac con la ubicación de cada una de las estaciones meteorológicas usadas para este estudio.

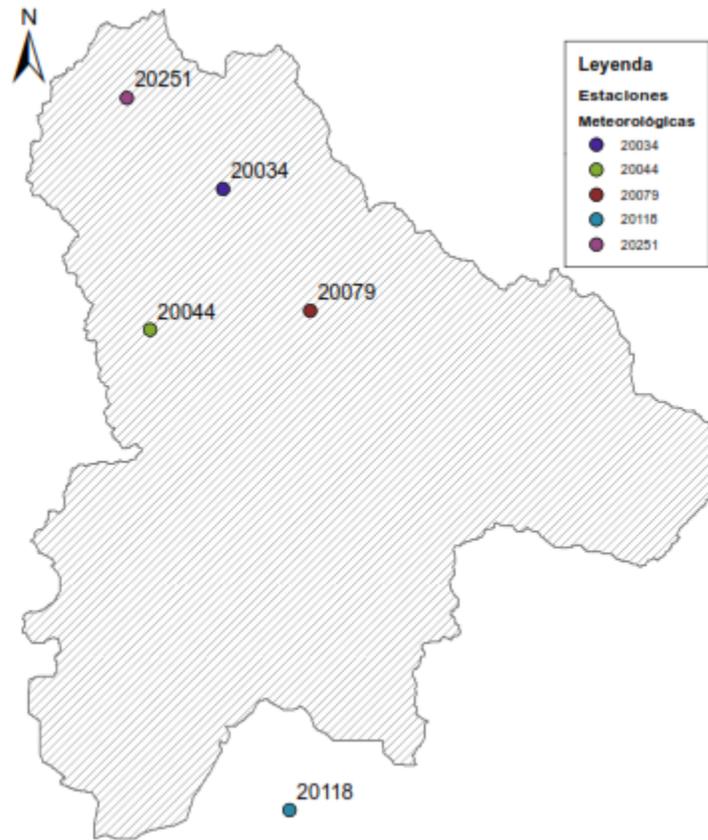
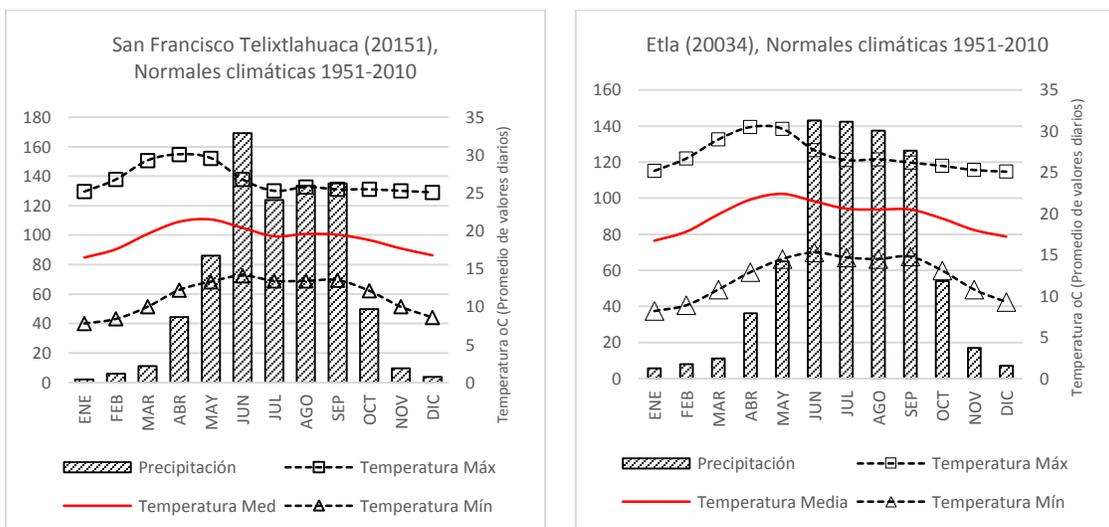


Figura 1. 1. Distribución espacial de las estaciones Meteorológicas dentro de la subcuenca Alto Atoyac.

En la figura 1,2 se observa el comportamiento de las normales climáticas para las estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca Alto Atoyac.



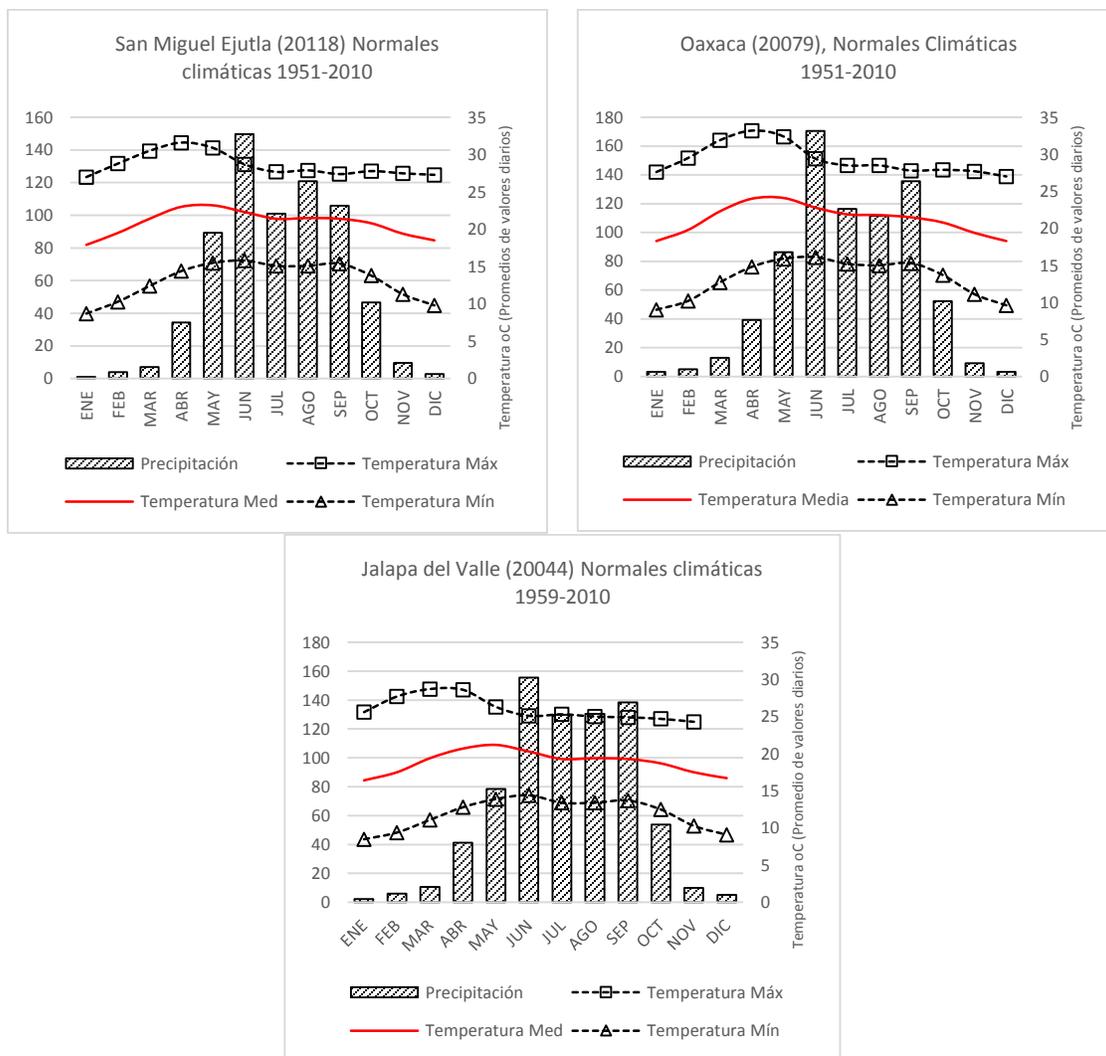


Figura 1. 2. Normales climáticas para las estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca Alto Atoyac.

2.2 Modelos de circulación general y escenarios de CC

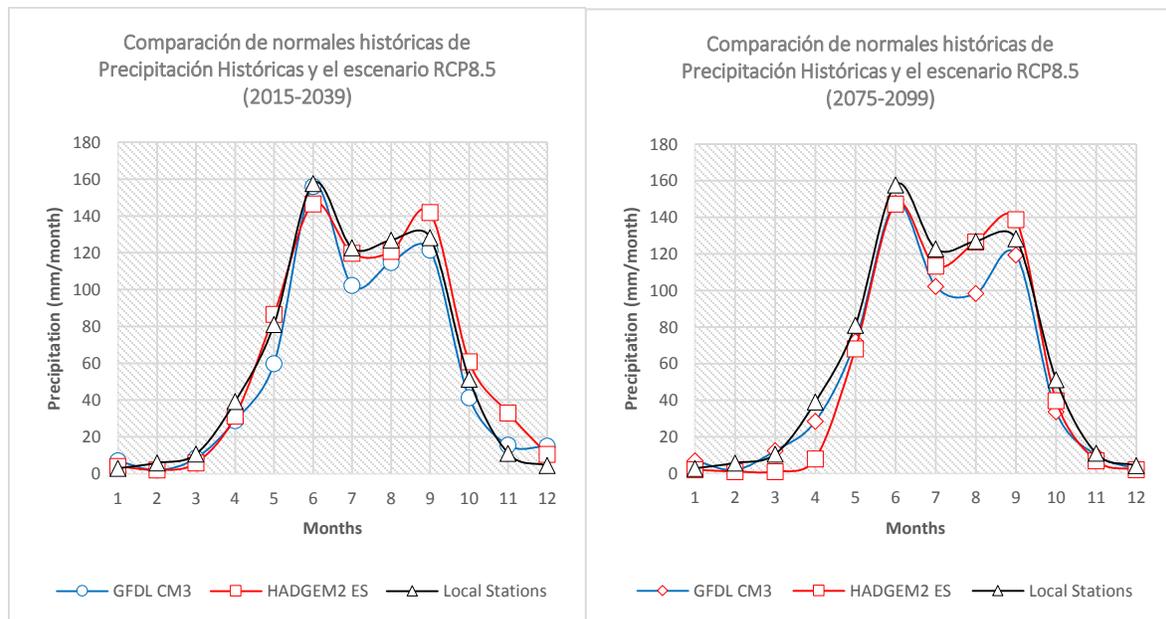
El IPCC en su quinto reporte presentó, nuevos escenarios regionales de CC siguiendo una metodología diferente a la usada en su reporte anterior (4AR). Los escenarios presentados fueron los de caminos de concentración representativos (RCP, por sus siglas en inglés). Para este caso México integro los esfuerzos de varios centros de investigación e instituciones gubernamentales tales como El Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA,UNAM), Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA) y Sistema Meteorológico Nacional (SMN) (Fernandez-Eguiarte et al., 2014). En México se estructuraron 3 modelos de circulación general los que se propusieron en el Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Los tres modelos corresponden a las nuevas salidas de los seleccionados para la Convención Marco de Naciones Unidas para el CC (Conde et al, 2011): MPI-ESM-LR (Max-

Plank Institute), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), HADGEM2-ES (Met Office Hadley).

Los nuevos escenarios que fueron tomados de la base de datos del Atlas Climático Digital de México, tienen una resolución espacial original de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (55 x 55 km aproximadamente) de donde se obtuvieron las respectivas anomalías y mediante un proceso de reducción de escala se estructuraron las mallas de $30'' \times 30''$ (926 x 926 m aproximadamente). Posteriormente se sumaron las anomalías a la climatología base correspondiente y de esa forma se generaron los nuevos escenarios a alta resolución espacial incorporando el efecto topográfico considerado en la climatología base (Fernandez-Eguiarte et al., 2014). Siendo los forzamiento radiativos para los nuevos escenarios: RCP2.6, RCP4.5, RCP.6 y RCP8.5.

Para determinar los efectos del CC en la recarga hídrica, se compararon dos de los modelos de circulación general presentados para la república mexicana, GFDL-CM3 y HADGEM2-ES obtenidos del Atlas Climático Digital de México, bajo el escenario de CC RCP8.5 el cual es el más desfavorable, para los futuros cercanos y lejanos 2015-2039 y 2075-2099, respectivamente.

En la figura 1.3 se muestran las normales climatológicas históricas y de los modelos de circulación general de CC GFDL CM3 y HADGEM2-ES, bajo un escenario RCP8.5. El escenario RCP8.5 representa una vía de emisiones y concertaciones relativamente altas. Sus principales supuestos incluyen alto crecimiento poblacional, relativamente bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética, lo que producirá un forzamiento radiativo de 8.5 w/m^2 para el 2100. Siendo el escenario más desfavorable y el representaría los peores escenarios dentro del subcuenca de no emplearse políticas que ayuden a contrarrestar los efectos del CC.



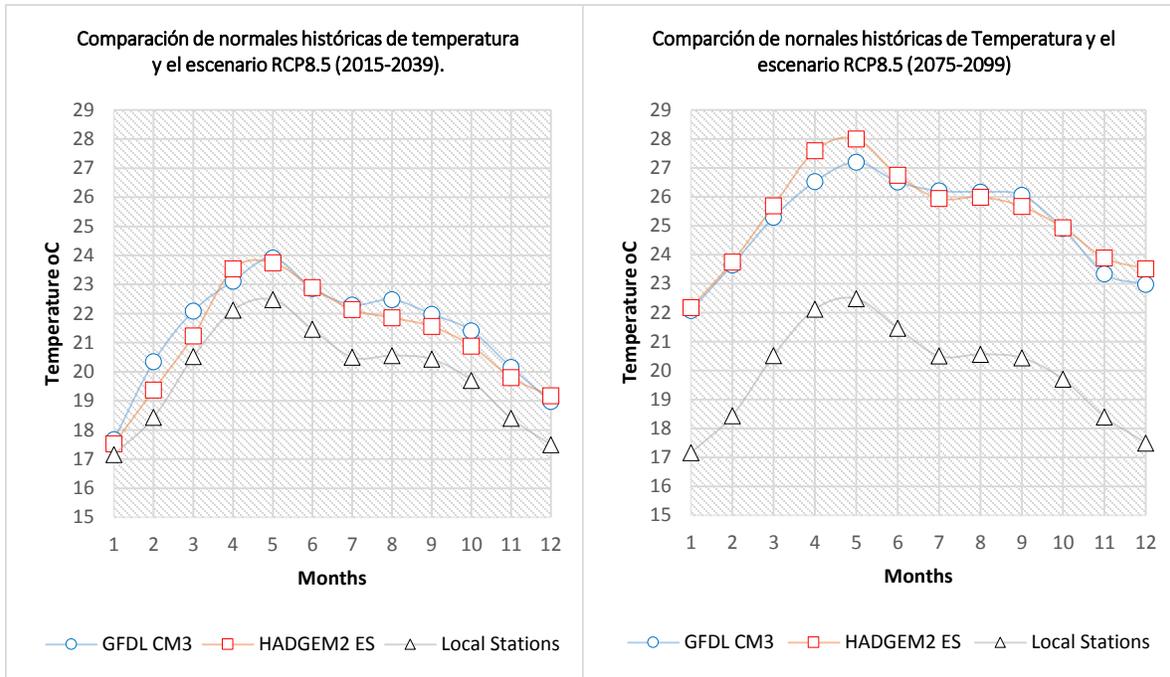
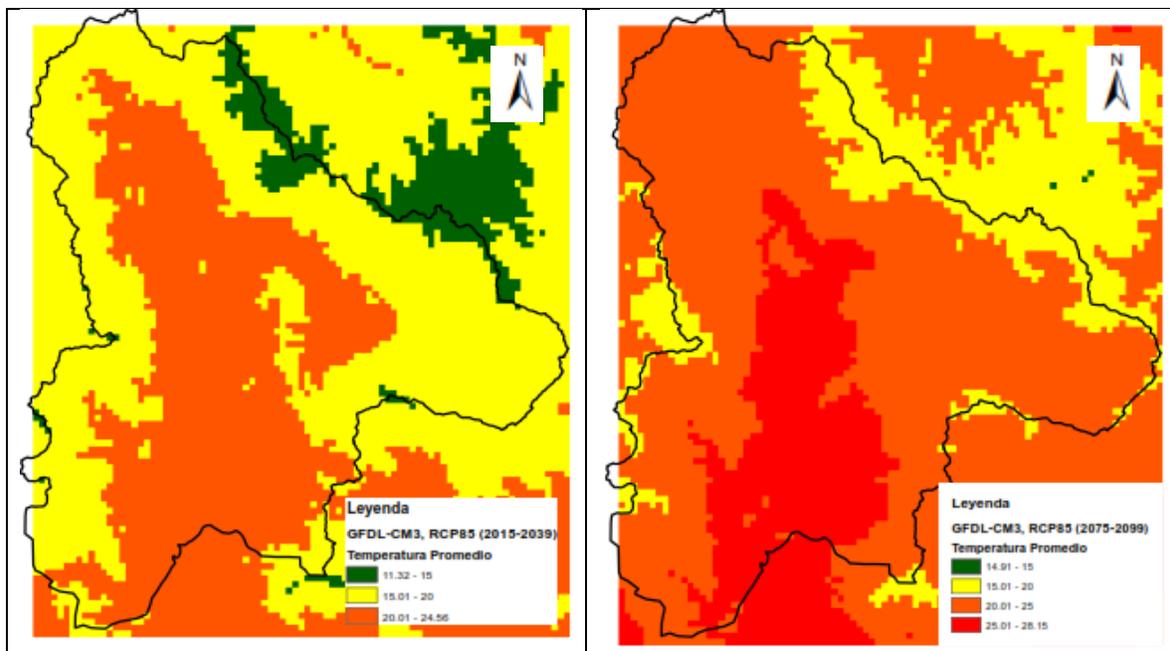


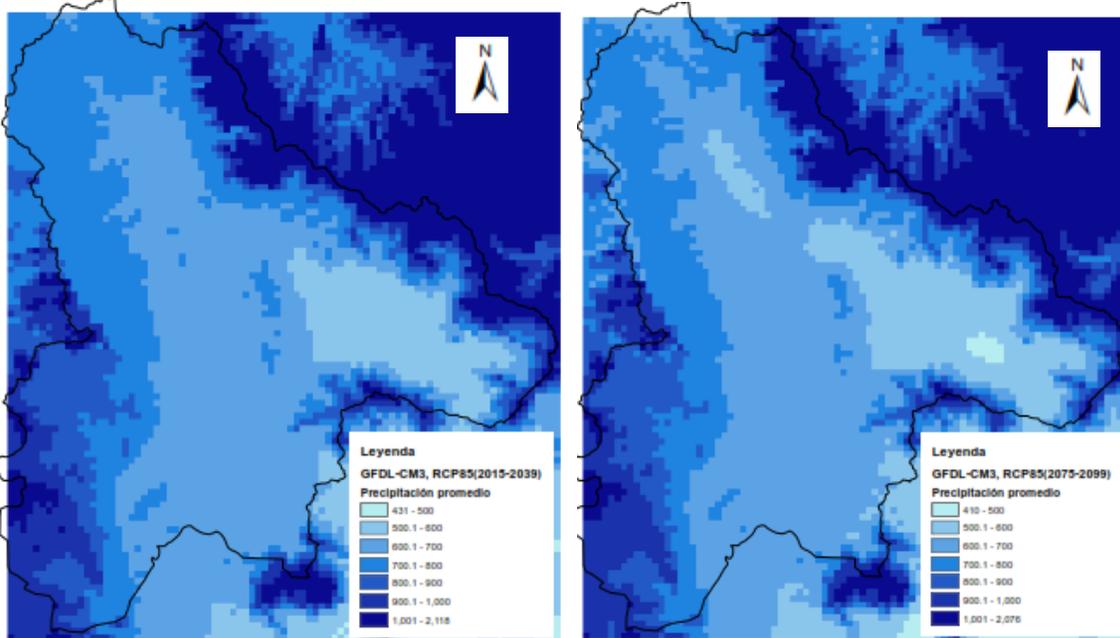
Figura 1. 3. Normales climatológicas de los Modelos de circulación general de CC GFDL CM3 y HADGEM2-ES, bajo un escenario RCP8.5.

Siendo el modelo GFDL-CM3 con las mayores anomalías presentadas tanto para la precipitación como para la temperatura bajo un escenario RCP8.5, indicando reducciones notables en la precipitación y aumentos en la temperatura. En la Figura 1.4, se muestra el mapa de Temperaturas Normales dentro de la subcuenca Alto Atoyac para el modelo GFDL-CM3 bajo el escenario RCP8.5 y horizontes 2015-2039, 2075, 2099.



Figural. 4. Temperaturas media anual obtenida con el Modelo GFDL-CM3 para los futuros cercanos 2015-2039 y lejano 2075-2099, bajo un escenario RCP85.

En la Figura 1.5, se muestra el mapa de precipitaciones normales dentro de la subcuenca Alto Atoyac para el mode-CM3 bajo el escenario RCP8.5 y horizontes 2015-2039, 2075-2099.



Figural. 5. Precipitación media anual obtenida con el Modelo GFDL-CM3 para los futuros cercanos 2015-2039 y lejano 2075-2099, bajo un escenario RCP8.5.

En la Tabla 1.2 se presentan las anomalías climáticas para los modelos de circulación general usados, bajo el escenario RCP8.5, para los horizontes 2015-2039 y 2075-2099.

GFDL CM3 (2015-2039)		GFDL CM3 (2075-2099)		HADGEM2-ES (2015-2039)		HADGEM2-ES (2075-2099)	
Anomalías P(mm/mes)	Anomalías T(°C)	Anomalías P(mm/mes)	Anomalías T(°C)	Anomalías P(mm/mes)	Anomalías T(°C)	Anomalías P(mm/mes)	Anomalías T(°C)
-4.16	-0.51	-4.16	-4.91	-1.16	-0.37	0.84	-5.01
3.8	-1.91	3.8	-5.21	3.8	-0.94	4.8	-5.31
2.12	-1.57	-1.88	-4.77	4.79	-0.72	9.62	-5.17
10.37	-1.00	10.62	-4.40	7.92	-1.42	31.12	-5.47
21.21	-1.43	8.88	-4.71	-5.46	-1.27	12.87	-5.52
1.6	-1.40	9.85	-5.05	11.1	-1.44	10.35	-5.28
20.41	-1.80	20.41	-5.70	2.91	-1.64	9.41	-5.44
12.07	-1.92	28.49	-5.60	6.07	-1.30	0.32	-5.43
6.76	-1.54	8.76	-5.61	-13.49	-1.12	-10.49	-5.23
10.05	-1.71	17.55	-5.21	-9.45	-1.19	11.55	-5.23
-4.46	-1.75	1.04	-4.94	-21.96	-1.40	4.04	-5.49
-10.62	-1.48	1.88	-5.48	-6.12	-1.68	2.38	-6.01

Tabla1. 2. Anomalías climáticas respecto de las normales históricas, para los modelos y escenarios de CC.

2.3 Tipo de suelo, Nivel freático y conductividad Hidráulica

La información de tipo de suelo fue provista por el Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía, en formato shape (INEGI), donde más del 85% del suelo dentro del área de estudio presenta buenas condiciones para la recarga vertical, es decir, es permeable. La profundidad promedio del nivel freático de 5.5 m, se trata de un acuífero muy somero. La información piezométrica es el resultado del monitoreo de más de 12 años dentro del área de estudio desde el 2001 (CNA, 2010).

La conductividad hidráulica se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada (Custodio y Llamas, 2001) y fue tomada acorde a las texturas de suelos encontradas en el área de estudio, como se indican en la Tabla 1.3 que muestra la clasificación de suelos realizados dentro del zona de estudio con sus respectivas conductividades hidráulicas según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Textura del suelo	Conductividad Hidráulica saturada (cm/s)
Franco arcillo arenoso	2.7×10^{-6}
Franco arcilloso	3.6×10^{-6}
Franco arcillo limoso	1.9×10^{-6}

Tabla1. 3. Clasificación de suelos y conductividad hidráulica (clasificación USDA.)

En la figura 1.6 se observa la distribución de las profundidades del nivel freático dentro de la zona de estudio, producto del monitoreo realizado dentro del área de estudio en estudios anteriores. Predominando profundidades de nivel freático de 1 a 10 metros en todo el área.

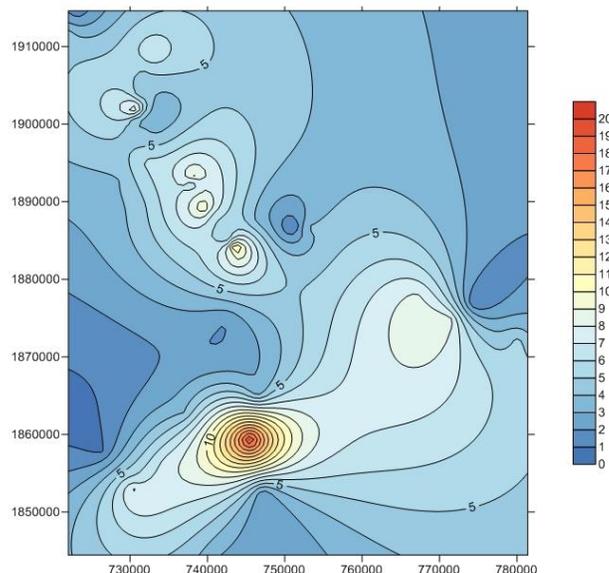


Figura1. 6. Profundidades del nivel freático dentro de la zona de estudio (Información de obtenida del monitoreo realizado en el área).

En la Figura 1.7 se observa la distribución del tipo de suelo dentro del área de estudio, predominando los suelos de texturas medias y gruesas.

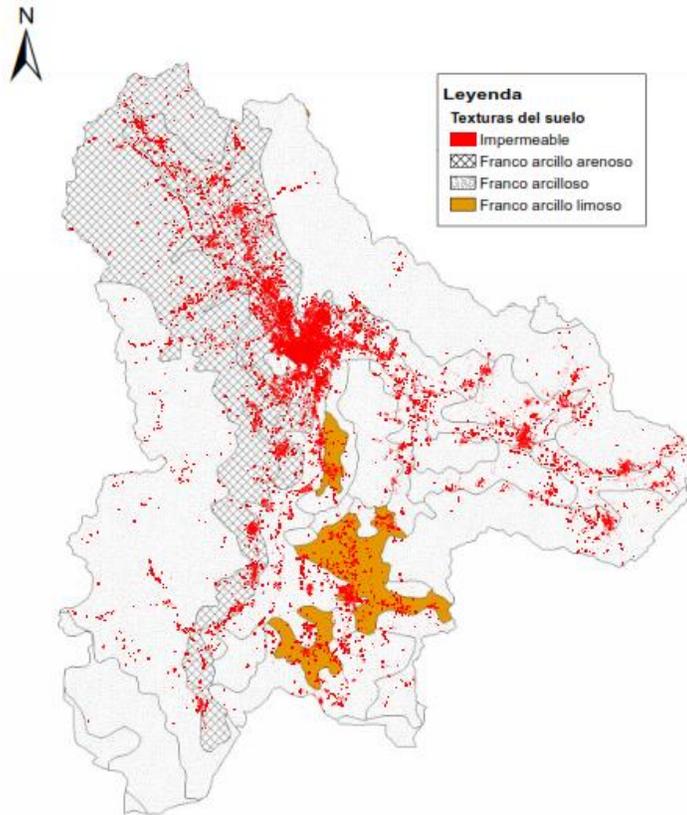


Figura 1. 7. Distribución del tipo de suelo dentro del área de estudio.

2.4 Análisis HELP

El HELP es un programa hidrológico de computo, que presenta un modelo cuasi bidimensional de los movimientos del agua a través y fuera de los vertederos. El modelo acepta información climatológica, de suelo e información de diseño y usa técnicas de solución que brindan información sobre los efectos del almacenamiento superficial, deshielo, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, almacenamiento de humedad del suelo, drenaje lateral sub superficial, recirculación de lixiviados, drenaje vertical insaturado, y las fugas a través del suelo, de geomembranas o compuestos trazadores de líneas (Schroeder et al., 1994).

La metodología seguida para determinar los rangos de recarga y sus respectivas áreas de influencia requiere del uso de sistemas de información geográfica que permitan posicionar los puntos de influencia dentro del área de estudio, para esto se siguió la metodología planteada por Jyrkama (2002,2007). El siguiente esquema muestra un perfil típico de un área bajo el análisis del HELP.

La figura 1.8 muestra el esquema que sigue el Modelo HELP a través de las capas del suelo.

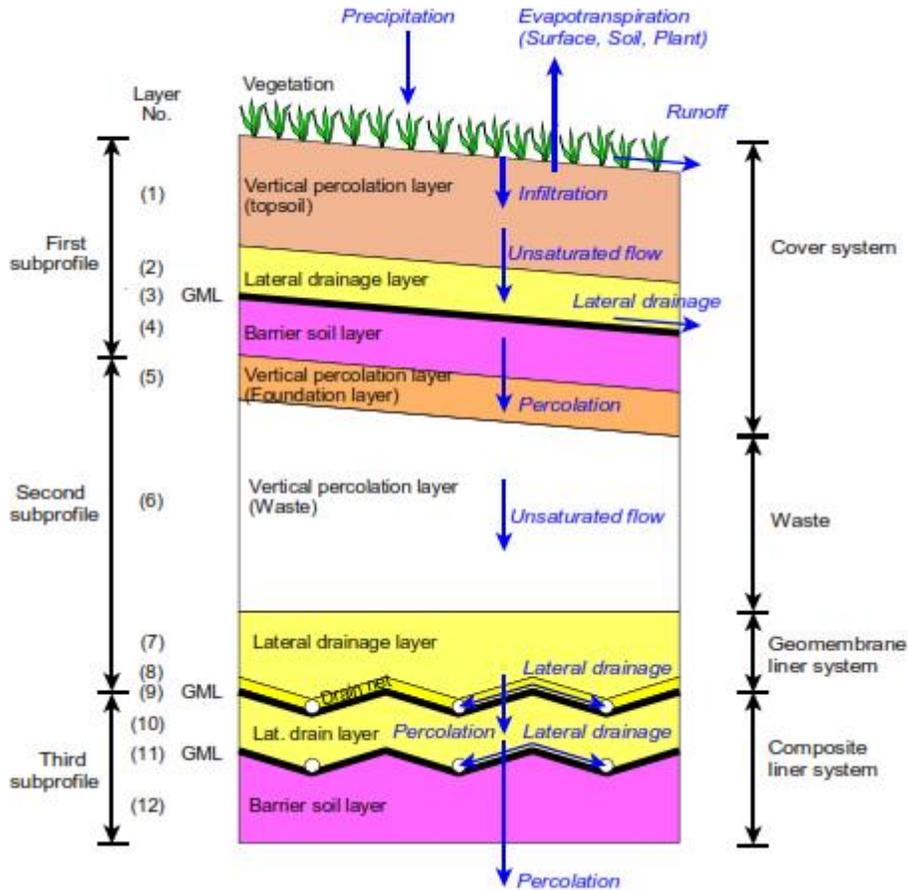


Figura 1. 8. Esquema del perfil de un vertedero identificando sus propiedades típicas (Berger and Schroeder, 2013)

En figura 1.9 se observa la metodología utilizada para el análisis según que se realizó con HELP y ARCGIS: (Jyrkama and Sykes, 2007, Jyrkama et al., 2002)

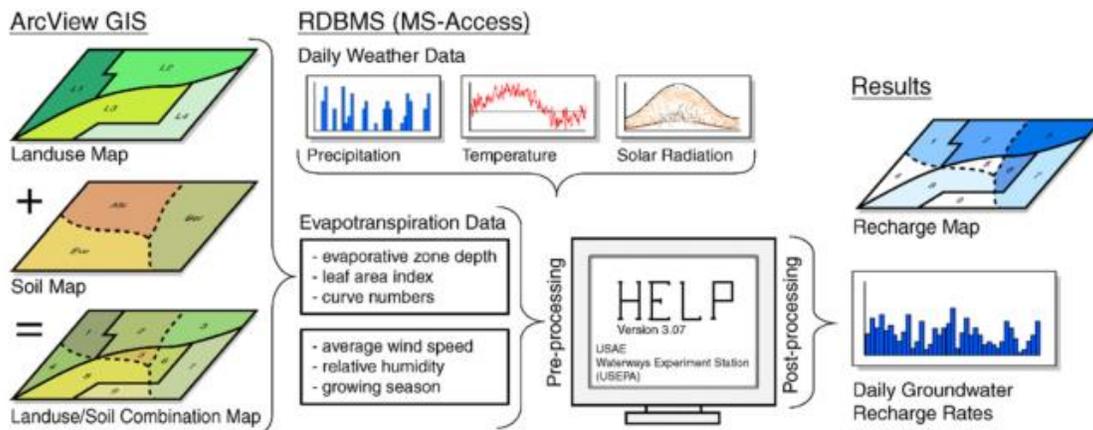


Figura 1. 9. Metodología para estimar los rangos de recarga y las áreas de recarga hídrica (Jyrkama and Sykes, 2007)

Para el análisis se combinó tanto la información de uso de suelo, tipo de suelo y la profundidad del nivel freático, dando como resultado un perfil diferente para cada combinación dentro del área de estudio. En este caso se agruparon los niveles freáticos en tres grupos 0-5 m, 5-10 m y de 10-20 m. De estudios realizados en el área de estudio se obtuvieron diferentes números de curvas para la subcuenca, seleccionándose un valor promedio de 48 (Reyes et al., 2009). Al final se obtuvieron un total de 18 perfiles, los cuales fueron modelados en el HELP. En la Figura 1.10 se muestra la gráfica para obtener el número de curva conociendo la textura del suelo y el uso de suelo y coberturas según las USDA. Donde Co: Gravas, L: Suelos Francos, S: Arenosos, Si: Limosos, C: arcillosos, F: Suelos Finos y las curvas de arriba hacia abajo están clasificadas en: Suelos desnudos, Suelos con una vegetación pobre o nula, Suelos con una vegetación escasa o pasable, suelos con buena vegetación y suelos con vegetación excelente.

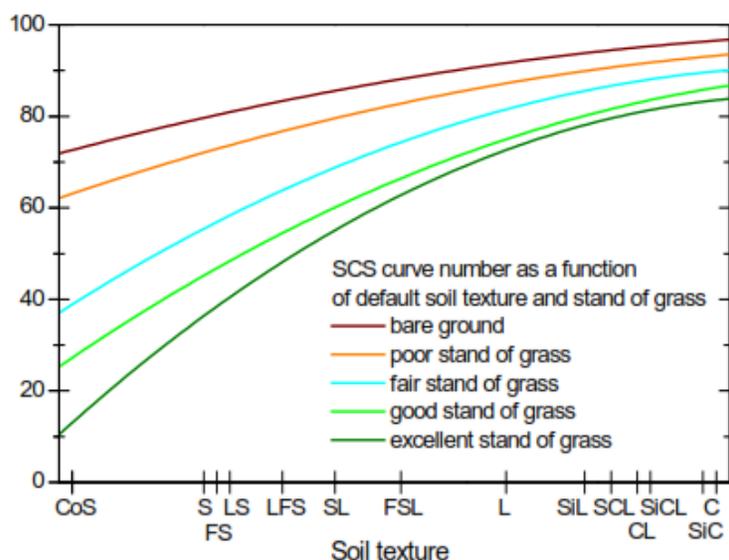


Figura 1.10. Relación entre el Número de curva SCS y para suelos por defecto en los Estados Unidos para varios niveles de Vegetación. (Berger and Schroeder, 2013).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis base se realizó para una serie histórica de 60 años a partir de 5 estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio, se obtuvo una recarga hídrica anual promedio por flujo vertical de 23.23 mm, en un área de 3744.64 km² (86.97 millones de metros cúbicos anuales). En la tabla 1.4, se muestra la comparación de los resultados obtenidos del análisis HELP con los de otros estudios de disponibilidad hídrica realizados en el área por diferentes instituciones (Pérez et al., 2010), donde el valor encontrado no muestra diferencias significativas con los resultados obtenidos, según la distribución de t-student con un nivel de confianza de 95%.

INSTITUCIONES	RECARGA VERTICAL EN MILLONES DE METROS CÚBICOS
COPEI 2001	82.8
CONAGUA 2003	91.7
CONAGUA 2009	91.7
UACH 2010	80.18
CIIDIR-OAX 2014 (HELP)	86.97
Media	86.6
Desviación estándar	5.99
t-student calculado	0.12
t-student tablas	3.18
No existen diferencias significativas.	$0.12 < 3.18$

Tabla 1.4. Comparación de diferentes estudios de disponibilidad hídrica realizados dentro de la subcuenca Alto Atoyac.

Se analizaron dos horizontes 2015-2039 y 2075-2099, bajo el modelo de circulación general GFDL-CM3 y el escenario de CC RCP8.5. En la figura 1.11. Se observa la comparación entre cada uno de los periodos analizados; el horizonte cercano y lejano presentaron reducciones en la recarga hídrica respecto de la recarga histórica de 37.58% y 55.52 % respectivamente.

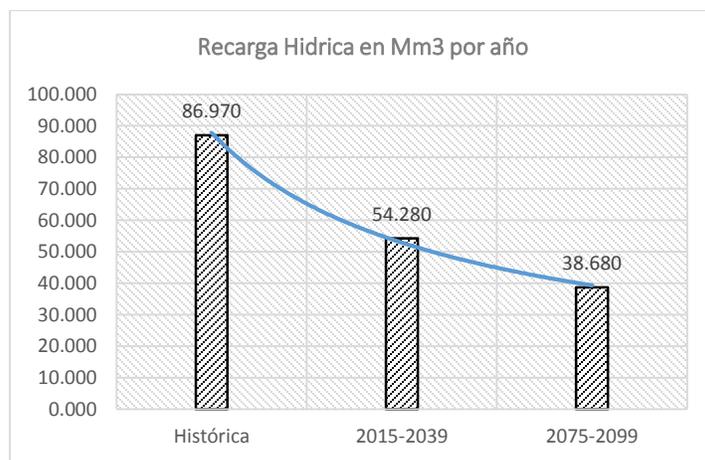
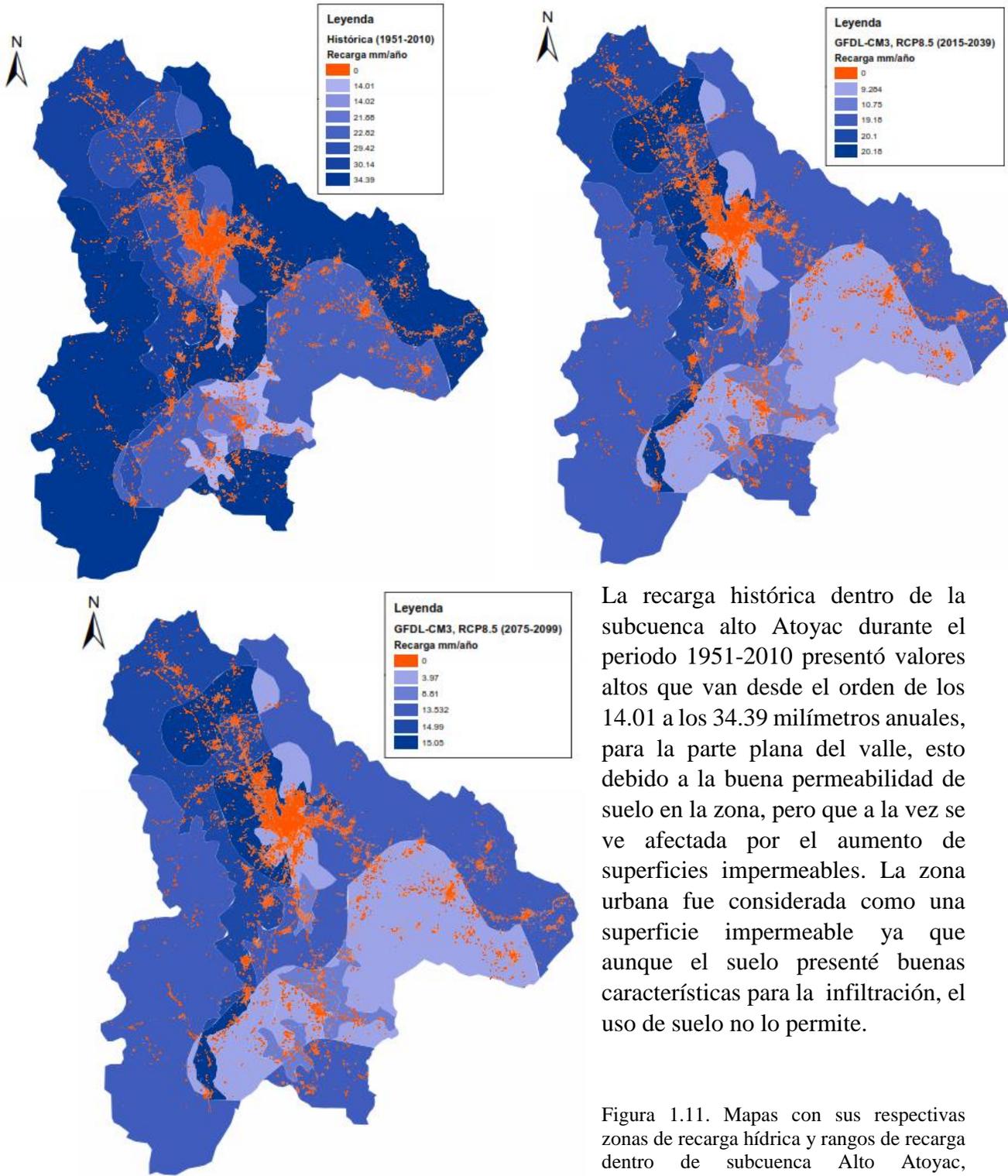


Figura 1.11 Recarga hídrica histórica y recarga hídrica bajo diferentes horizontes climáticos.

En la figura 1.12 se muestran las zonas de recarga hídrica dentro de la subcuenca Alto Atoyac, con sus respectivos valores de recarga, para cada uno de los periodos analizados.



La recarga histórica dentro de la subcuenca alto Atoyac durante el periodo 1951-2010 presentó valores altos que van desde el orden de los 14.01 a los 34.39 milímetros anuales, para la parte plana del valle, esto debido a la buena permeabilidad de suelo en la zona, pero que a la vez se ve afectada por el aumento de superficies impermeables. La zona urbana fue considerada como una superficie impermeable ya que aunque el suelo presentó buenas características para la infiltración, el uso de suelo no lo permite.

Figura 1.11. Mapas con sus respectivas zonas de recarga hídrica y rangos de recarga dentro de subcuenca Alto Atoyac, calculados mediante el modelo HELP e integradas en un sistema de información geográfica, para un periodo histórico, horizontes climáticos 2015-2039, 2075-2099 para un modelo de circulación general GFDL-CM3 y un escenario de CC RCP85.

La permeabilidad del suelo y lo somero de los niveles freáticos hacen que el área sea muy sensible a la recarga hídrica, suponiendo una desventaja para el acuífero ya que esta característica lo hace muy sensible a la contaminación vertical (Belmonte et al., 2003, Belmonte et al., 2005).

4 CONCLUSIONES

- El CC afectará directamente la recarga hídrica dentro de la subcuenca Alto Atoyac, el modelo GFDL-CM3 bajo el escenario RCP8.5, mostró los valores más desfavorables para el área de la subcuenca, reducciones directas en la precipitación y aumentos en la temperatura afectaran de manera directa la recarga hídrica dentro del acuífero.
- Los horizontes cercanos y lejanos analizados bajo el escenario más desfavorable de CC, mostraron reducciones de 37.5% y 55.52%, en la recarga hídrica vertical dentro de la subcuenca. Lo que supone un reto en cuanto a gestión del recurso hídrico en los próximos años; ya que la actividad agrícola y el abastecimiento para consumo humano son los usos más importantes del agua dentro de la subcuenca.
- El balance hídrico con el método HELP no mostró diferencias significativas en comparación con otros obtenidos anteriormente, asumiendo que esto se debe a la utilización de la misma base datos climáticas en todos los casos.
- La permeabilidad del suelo y lo somero del nivel freático hacen que subcuenca sea susceptible a la recarga hídrica y a la vez vulnerable a la contaminación vertical a como lo han demostrado estudios realizados dentro del área de estudio.

5 BIBLIOGRAFÍA

- AGUILERA, H. & MURILLO, J. M. 2009. The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: A study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environmental Geology*, 57, 963-974.
- BATES, B., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S. & PALUTIKOF, J. P. 2008. Climate Change and Water. Technical Paper VI of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat, Geneva, 210 pp.
- BEAR, J. & CHENG, H. D. 1999. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London, 625 pp.
- BELMONTE, J. S. I., CAMPOS, E. J. O. & HERRERA, B. J. 2003. Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etna, Oaxaca, México. *Revista Geofísica*. 59: 1-32 p. (PA: 35159).

- BELMONTE, J. S. I., CAMPOS, E. J. O. & ALATORRE, Z. M. A. 2005. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, Vol-44, pp. 283-300.
- BERGER, K. & SCHROEDER, P. R. 2013. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for HELP-D (Version 3.95 D). 6th, revised edition for version HELP 3.95 D.
- CNA 2003. (Comisión Nacional del Agua). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valles Centrales Estado de Oaxaca (Actualización). Gerencia de aguas subterráneas.
- CNA 2009. Actualización de la disponibilidad Media anual de agua subterránea, Acuífero (2025) Valles centrales, estado de Oaxaca, Publicado en el diario oficial de la federación el 28 de agosto del 2009.
- CONDE, C., ESTRADA, F., MARTÍNEZ, B., SÁNCHEZ, O. & GAY, C. 2011. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24 (1): 125-140. <http://www.journals.unam.mx/index.php/atm/article/view/23806>.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, M. R., 2001. Hidrogeología Subterránea, Volumen I. y II.2ª Ed. Omega. Barcelona, España. pp. 2359
- DETTINGER, M. & EARMAN, S. 2007. Western Ground Water and Climate Change Pivotalto Supply Sustainability or Vulnerable in Its Own Right? *GrounWater*, 4, 4-5.
- FERNANDEZ-EGUIARTE, A., ZAVALA-HIDALGO, J., ROMERO-CENTENO, R. & 2014. Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>.
- GREEN, T. R., TANIGUCHI, M., KOOI, H., GURDAK, J. J., ALLEN, D. M., HISCOCK, K. M., TREIDEL, H. & AURELI, A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405, 532-560.
- HERRERA-PANTOJA, M. & HISCOCK, K. M. 2008. The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. *Hydrol. Process.* 22 (1), 73–86.
- INEGI. Cartas de uso de suelo y vegetación, Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía [Página web], consultado 3 de marzo 2014, <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&upc=0&s=est&tg=3587&f=2&cl=0&pf=prod&ef=0&ct=205040000&pg=2>.
- INEGI. Edafología, Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía [Página web], consultado 3 de marzo 2014, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/edafologia/default.aspx>.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.
- JUN, K. S., CHUNG, E.-S., SUNG, J.-Y. & LEE, K. S. 2011. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. *Science of The Total Environment*, 409, 5228-5242.
- JYRKAMA, M. I. & SYKES, J. F. 2007. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology*, 338, 237-250.
- JYRKAMA, M. I., SYKES, J. F. & NORMANI, S. D. 2002. Recharge estimation for transient ground water modeling. *Ground Water* 40 (6), 638–648.

- LEITH, R. M. M. & WHITFIELD, P. H. 1998. Evidence of climate change effects on the hydrology of streams in south-central B.C. *Can. Water Resour. J.* 23 (3), 219–230.
- PARISH, E. S., KODRA, E., STEINHAEUSER, K. & GANGULY, A. R. 2012. Estimating future global per capita water availability based on changes in climate and population. *Computers & Geosciences*, 42, 79-86.
- Pérez, S., Hernández, F. R., Ramírez, A., Palacios, O., Prado, F., Martínez, R., Pérez, H., Ibañez, L. A. 2010. PLAN DE MANEJO DE ACUÍFERO VALLES CENTRALES, EN EL ESTADO DE OAXACA. TOMO III. PLAN DE MANEJO PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL AGUA DEL ACUÍFERO VALLES CENTRALES EN EL ESTADO DE OAXACA. CONVENIO DE COLABORACIÓN: SGT-OCPS-OAX-010-TT-001-RF-CC.
- Reyes-López J., C. Carreón D., J. Ramírez H., O. Leyva C., H. Campbell R., R. Palacios B. y S. Belmonte J. (2009). Informe Final. Estudio de Recarga Artificial del Acuífero Valles Centrales del Edo. de Oaxaca. Tomo I-III. Reporte Interno. Elaborado por la Universidad Autónoma de Baja California para la Comisión Nacional del Agua, Dirección General del Organismo de Cuenca Pacífico Sur, Dirección Técnica. Convenio: SGT-OCPS-OAX-09-001-TT-RF-CC.
- SCHROEDER, P. R., AZIZ, N. M., LLOYD, C. M. & ZAPPI, P. A. 1994. "The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3," EPA/600/R-94/168a, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- SMN. 2010. Normales climatológicas, Sistema Meteorológico Nacional, [página web], consultado 12 marzo 2014, http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75.
- VÖRÖSMARTY, C. J., MCINTYRE, P. B., GESSNER, M. O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GLIDDEN, S., BUNN, S. E., SULLIVAN, C. A., LIERMANN, C. R. & DAVIES, P. M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561.

CAPITULO 2

CAMBIOS DE COBERTURAS EN LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC DURANTE EL PERIODO 1979-2013, USANDO PERCEPCIÓN REMOTA.

RESUMEN

El uso de imágenes satelitales, han sido ampliamente utilizadas para el monitoreo medio ambiental, en particular para la clasificación de uso de suelo y tipo de coberturas. Analizar las características espaciales y temporales del cambio de uso de suelos y coberturas es esencial para conocer los patrones de cambio de las diferentes coberturas, al igual que permite que se tomen las acciones necesarias para prevenir cualquier afectación negativa. Se modeló el cambio de coberturas y uso de suelo en la subcuenca Alto Atoyac mediante el Sistema de información Geográfica IDRISI en un periodo de 34 años, de 1979 a 2013; tomando dos intervalos de tiempo, 1979-1996 y 1996-2013. Para esto se usaron imágenes de satélite tipo LANDSAT de los sensores MS, TM, OLIS, y así obtener los cambios en cada una de las coberturas propuestas. Mediante un proceso de clasificación no supervisada y supervisada se determinaron 5 grandes coberturas: zona urbana, bosques, zona agrícola, pastizales y selva baja, las cuales fueron comparadas con las cartas de uso de suelo del Instituto Nacional de Estadística, y Geografía (INEGI). Las clases fueron validadas con índices de concordancia kappa de aproximadamente 0.6, obteniéndose una buena concordancia entre las clases seleccionadas. Los resultados muestran cambios sustanciales y negativos para la subcuenca que presenta un área de 3764.99 Km², donde se ha perdido aproximadamente el 10% del área boscosa y las áreas urbanas han aumentado en un 3% del área total de la cuenca, lo que podría incrementarse para posibles escenarios futuros lo que vendría a afectar directamente la escorrentía superficial y al recarga hídrica, provocando problemas de disponibilidad hídrica a corto y largo plazo, con tasas de deforestación de 0.29% anual.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de tecnologías y nuevas metodologías ha permitido usar la información geoespacial para determinar aspectos relacionados al cambio de uso de suelo y coberturas (CUSyC), tales como detección de cambios y sus trayectorias, modelados espacio temporales entre otros (Coppin et al., 2004; Lu et al., 2004, Mertens and Lambin, 2000; Yang and Lo, 2002; Zhou et al., 2008a, Pereira et al., 2002; Zhou et al., 2008b). Anteriormente estudiar los CUSyC no se consideraba una temática de investigación prioritario, sino hasta 1995, cuando el Programa Internacional de Geosfera-Biosfera (IGBP, por sus siglas en ingles) y el Programa de Cambio Ambiental Global en las Humanidades (IHDP, por sus siglas en inglés), presentó su iniciativa como proyecto investigar los CUSyC, desde entonces el estudio en los CUSyC, rápidamente ha venido a ser la frontera global en investigaciones de cambio y a la vez un tema muy polémico, donde la investigación y descripción en la dinámica espacial y temporal del CUSyC es identificado como una prioridad (Zhang et al., 2010).

Hoy en día la percepción remota representa un método fácil y rápido para el monitoreo de recursos naturales, fenómenos ambientales y climáticos, ya que hay muchos métodos para la detección de cambios que han sido propuestos (Nielsen et al., 1998, Lunetta and Elvidge, 1999 and Deer, 1995); siendo uno de sus principales aplicaciones los efectos de los CUSyC en la afectación del recurso hídrico y como herramientas para la gestión de cuencas (BI et al., 2009, Dams et al., 2013, Nie et al., 2011)

Uno de los principales parámetros a analizar son el cambio en las coberturas y el cambio de uso de suelo, ya que este desempeña un papel importante en el cálculo de la escorrentía superficial y en la respectiva recarga de los mantos acuíferos. Por ejemplo las urbanizaciones incrementan el área de superficies impermeables, lo que implicaría una menor disponibilidad del recurso y una mayor demanda del mismo; la mayor parte del tiempo esto es dirigido principalmente por el crecimiento poblacional y a la vez económico, lo que obliga a cambiar las tierras de cultivos y naturales para permitir el desarrollo de urbanizaciones, (Dewan and Yamaguchi, 2009). Poder saber cómo ha sido la evolución de los cambios en una determinada área y cuál podría ser la tendencia a futuro es una buena herramienta de gestión, tanto para planes de ordenamiento territorial, como para la conservación y protección del medio ambiente. Además que es una buena herramienta para tomar medidas adaptivas que permitan reducir la vulnerabilidad frente al CC (Watson et al., 2013) . Es por ello que este análisis se enfoca en conocer las tendencias de los cambios ocurridos en la Zona de la subcuenca Alto Atoyac durante un periodo de aproximadamente 34 años, iniciando a partir de imágenes de 1979 hasta el año 2013, mediante el uso de percepción remota.

2 MÉTODOS

Se realizó el análisis de imágenes desde 1979 hasta el 2013. En este punto se utilizaron imágenes LANDSAT, por ser uso libre (USGS, GLCF). Obtenidas de la Global Land Cover Facility (GLCF) y la Earth Explorer (EE) a como se muestran en la tabla 2.1 los diferentes satélites usados con sus bandas, sensores y resoluciones espaciales.

Satélite	Fecha	Bandas	Sensor	Resolución Espacial	Fuente
LandSat4	08/11/1979	1,2,3,4	MSS	60 m	GLCF
LanSat5	16/01/1996	1,2,3,4,5,6,7	TM	30 m	GLCF
LandSat8	02/02/2013	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	OLIS/TIRS	30 m	EE

Tabla 2. 1. Características de imágenes LANDSAT por cada uno de sus sensores, Fuente: USGS, GLCF.

En la figura 2.2 se observan la descripción de cada una de las bandas de los satélites usados y sus respectivas longitudes de onda.

SATÉLITE	BANDAS ESPECTRALES	LONGITUDES DE ONDA (µm)
LANDSAT4		
B1	Verde	0.50-0.60
B2	Rojo	0.60-0.70
B3	Infrarrojo Cercano	0.70-0.80
B4	Infrarrojo Cercano	0.80-1.10
LANDSAT5		
B1	Azul	0.45-0.52
B2	Verde	0.52-0.60
B3	Rojo	0.63-0.69
B4	Infrarrojo cercano 1	0.76-0.90
B5	Infrarrojo cercano 2	1.55-1.75
B7	Infrarrojo Medio	2.08-2.35
LANDSAT8		
B1	Costero/Aerosol	0.43-0.45
B2	Azul	0.45-0.51
B3	Verde	0.53-0.59
B4	Rojo	0.64-0.67
B5	Infrarrojo cercano	0.85-0.88
B6	Infrarrojo de onda corta	1.57-1.65
B7	Infrarrojo de onda corta	2.11-2.29
B8	Pancromático	0.5-0.68
B9	Cirrus	1.36-1.38
B10	Infrarrojo Termal de onda larga	10.6-11.19
B11	Infrarrojo termal de onda larga	11.5-12.51

Tabla 2.2. Bandas espectrales de los sensores LANDSAT con sus respectivas longitudes de onda.

Con la ayuda de cartas de uso de suelo del INEGI se seleccionaron 5 grandes clases dentro de la zona de estudio, según la serie IV de las cartas de coberturas y uso de suelo del INEGI, que comprenden un periodo de análisis desde 2006 hasta 2009.

En la Tabla 2.3 se observan las coberturas seleccionadas para el área de estudio.

Coberturas y uso de suelo	Observación
Urbana	Zonas urbanas, Carreteras.
Bosques	Bosques de pino y encino
Agrícola	Agricultura de riego y temporal
Pastizales	Pastizales inducidos, pastizal-agrícola
Selva baja	Bosque secundario, selva baja caducifolia

Tabla 2.3. Clases de coberturas y uso de suelo seleccionadas para la subcuenca Alto Atoyac

Para cada una de las imágenes se realizaron las combinaciones de bandas en falso color, una particularidad es que las imágenes del sensor MSS la primera banda inicia en el visible verde, para el sensor TM el visible inicia a partir de la banda 1 (Azul) y para el sensor OLIS inicia

en el 2 (Azul). Siendo las siguientes combinaciones las equivalentes para cada sensor, según la tabla 2.2.

En la tabla 2.4 se ven las combinaciones en falso color, para cada uno de los sensores.

SENSOR	RGB
MSS	321
TM	432
OLIS	543

Tabla 2. 4. Combinaciones de falso color equivalentes para sensores LANDSAT analizados.

2.2 Corrección Atmosférica

Se realizó la corrección atmosférica a cada una de las bandas de las imágenes de los tres sensores MSS, TM y OLIS, convirtiendo los valores de DN de las imágenes a valores de radiancia, esto para evitar errores de dispersión atmosférica y absorción de energía. En este caso se utilizó la herramienta ASTMOC del IDRISI SELVA, donde fue necesario la ayuda de los metadatos de las imágenes para obtener los valores de fechas, hora, longitudes de onda, DN, GAIN, OFFSET, ángulo de elevación del sol, los que sirvieron para hacer la corrección.

2.3 Re-muestreo, ajuste de resolución espacial y temporal

Se efectuó un re muestreo de cada una de las imágenes ya que provenían de fuentes y fechas diferentes, para este caso se utilizó el módulo RESAMPLE del IDRISI, tomándose como imagen de referencia la que poseía la menor resolución espacial que en este caso fue la imagen del sensor MSS, las imágenes del sensor TM y OLIS se ajustaron a esta.

2.4 Composiciones de bandas y selección de clases

Las combinaciones por sensores fueron MSS RGB321, TM RGB 432 y OLIS 543, que son las bandas equivalentes en cada uno de los sensores que van desde el verde hasta el infrarrojo. Estas combinaciones en falso color fueron necesarias para seleccionar las diferentes clases dentro del área especificada.

2.5 Clasificación no supervisada y supervisada

Con ayuda de las capas de uso de suelo del INEGI (año), el recorrido por algunas zonas en el área de estudio y mediante el Google Earth, se procedió a realizar la clasificación dentro del área, esto con ayuda de polígonos de entrenamiento. La herramienta MAKESIG, sirvió para realizar las firmas espectrales de cada una de las clases y las imágenes clasificadas fueron obtenidas con los módulos de estadísticos de clasificación de mínima distancia, máxima probabilidad y análisis de discriminantes lineales.

2.6 Mínima Distancia (MINDIST)

Este algoritmo identifica cada clase por la posición media que tiene en cada banda. Los píxeles se clasifican en la clase con la media más cercana al valor de píxel. Esto significa que MINDIST es menos probable para clasificar con precisión píxeles pertenecientes a las clasificaciones de clases muy variables. De forma general se dice que es la mínima distancia entre el punto \mathbf{q} y el rectángulo \mathbf{R} , a como se muestra en el diagrama de la Figura 2.1.

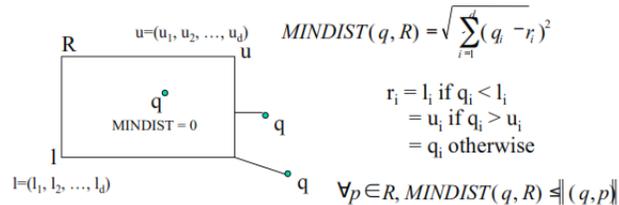


Figura 2.1. Esquema de la clasificación de mínima distancia

2.7 Máxima Verisimilitud (MAXLIKE)

Este algoritmo usa un procedimiento de máxima verisimilitud derivado de la teoría de probabilidad Bayesiana. Usa las medias, varianzas y covarianzas de los datos de las firmas espectrales para calcular a que clase pertenece cada píxel.

2.8 Validación de clases

Para la validación de las clases respecto a las imágenes de satélite se aplicó una medida de concordancia, para ver la confiabilidad de cada clase seleccionada, mediante el índice de concordancia Kappa, según los valores de la tabla 2.5 tomados de (López de Ullibarri and Pita, 2001). En la tabla 2.5 se muestran los valores de concordancia Kappa con su respectiva fuerza de concordancia.

Valoración del Índice Kappa	
Valor de K	Fuerza de la concordancia
<0.2	Pobre
0.21-0.4	Débil
0.41-0.6	Moderada
0.61-0.8	Buena
0.81-1	Muy buena

Tabla2. 5. Valoración de índices de concordancia Kappa para diferentes intervalos.

El índice Kappa es calculado por la formula

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

Donde P_o es la proporción de concordancia observada y P_e es la proporción de concordancia esperada al azar.

2.9 Análisis de cambios de coberturas y uso de suelo (LANDCHANGE MODELER)

Los cambios ocurridos y las tendencias de cambio, durante los 34 años de análisis se determinaron con el LANDCHANGE MOLEDER del IDRSI. Haciendo comparaciones entre cada uno de los periodos estudiados, obteniendo los cambios entre 1979-1996, 1996-2013 y el cambio total entre 1979-2013.

3. RESULTADOS

Tras el uso de los diferentes clasificadores para validar las clases seleccionadas mediante el Índice Kappa se obtuvo concordancias moderadas, con valores de 0.6. Siendo el clasificador de máxima verisimilitud el que mostró la mayor concordancia entre clases, a como se ve en la tabla 2.6 nos muestra las diferentes clases con los clasificadores utilizados, siendo el clasificador de Máxima verisimilitud el que dio los mejores resultados de concordancia.

CLASES	MIND	MAX	LDA	MIND	MAX	LDA	MIND	MAX	LDA
Área Urbana	0.60	0.53	0.41	0.48	0.49	0.51	0.47	0.72	0.62
Bosques	0.71	0.77	0.81	0.66	0.86	0.74	0.81	0.81	0.87
Área Agrícola	0.33	0.55	0.64	0.53	0.53	0.65	0.55	0.49	0.55
Pastizales	0.26	0.46	0.40	0.29	0.45	0.36	0.28	0.58	0.30
Selva Baja	0.54	0.54	0.50	0.27	0.43	0.55	0.50	0.45	0.66
KAPPA Promedio	0.49	0.6	0.55	0.45	0.6	0.56	0.52	0.61	0.60

Tabla 2.6. Análisis de índice de concordancia Kappa para diferentes clasificadores.

Siendo el método de máxima verisimilitud con el que se obtuvieron las mejores concordancias, de moderadas y buenas. Se reportan valores de concordancia que van de los 0.5 hasta 0.7 para diferentes estudios (Laurent-Cajacuri, 2011, M. Ojigi, 2006), por lo que se puede decir que los valores obtenidos en este trabajo son aceptables. En la tabla 2.7 se ven las diferentes clases para los sensores y años de análisis con su respectivo valor de concordancia con el clasificador de máxima verisimilitud.

Uso de suelos/ Clases	MSS 1979	TM 1996	OLIS 2013
Área Urbana	0.53	0.49	0.72
Bosque	0.77	0.86	0.81
Área agrícola	0.55	0.53	0.49
Pastizal inducido	0.46	0.45	0.58
Selva baja	0.54	0.43	0.45
Estadístico KAPPA promedio	0.6	0.6	0.61

Tabla 2.7. Valores de concordancia Kappa entre clases de los diferentes sensores, para el clasificador de máxima verosimilitud.

En las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se muestran las firmas espectrales de las clases por cada una de las bandas de los tres diferentes sensores, la similitud en ciertos valores de radiancia de los pixeles es lo que hace que se tenga un índice de concordancia en ese orden ya que el valor de radiancia de un pixel puede estar presente en varias clases.

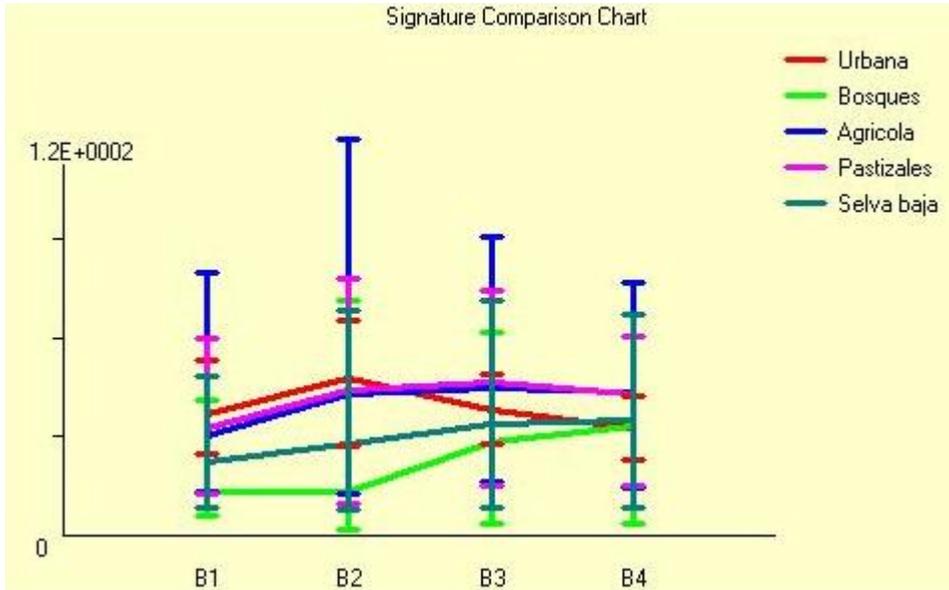


Figura2. 2. Firma espectral de coberturas para el año 1979, tomadas del LANDSAT MSS, procesadas en IDRISI.

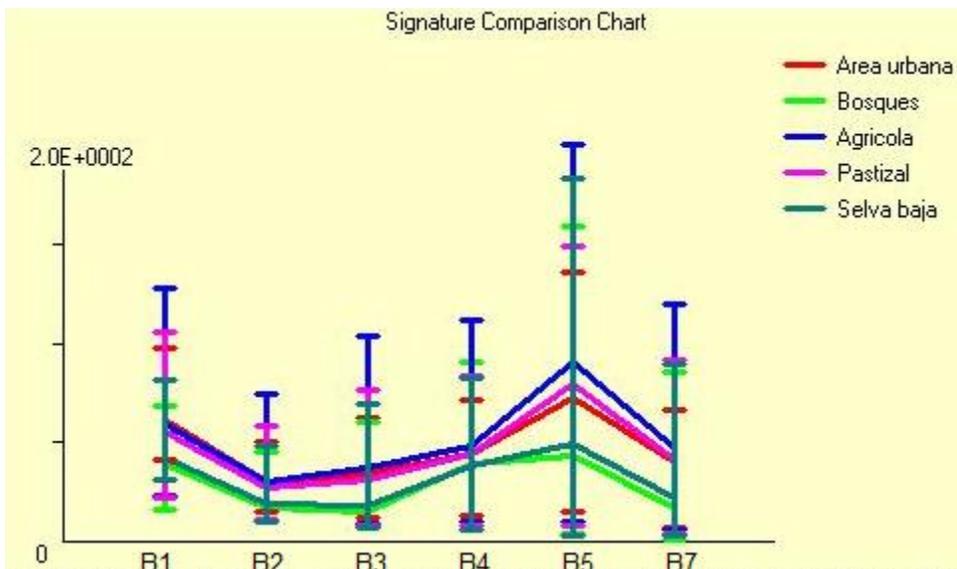


Figura2. 3. Firma espectral de coberturas para el año 1996, tomadas del LANDSAT TM, procesadas en IDRISI

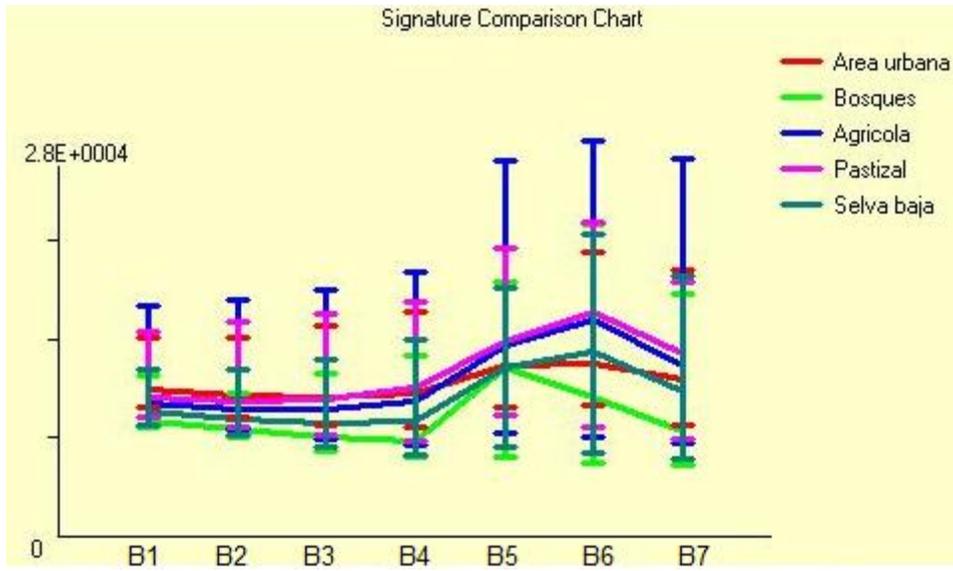


Figura2. 4. Firma espectral de coberturas para el año 2013, tomadas del LANDSAT OLIS, procesadas en IDRISI

Tomando como el mejor clasificador el de Máxima verisimilitud y tras el análisis de cambios de coberturas con el LANDCHANGE MODELER del IDRIDI, se obtuvieron las siguientes coberturas equivalentes para los años y sensores analizados.

COBERTURA	Área Km ² (Clasificador MAXLIKE)		
	1979	1996	2013
Urbana	39.69	87.65	175.01
Bosques	1222.97	1164.63	845.79
Agrícola	1077.74	1019.53	983.47
Pastizales	459.33	630.48	1021.85
Selva baja	965.26	862.71	738.87
TOTALES	3764.99	3764.99	3764.99

Tabla 2.8. Valores de concordancia Kappa entre clases de los diferentes sensores, para el clasificador de Máxima verisimilitud.

También se calcularon los cambios netos equivalentes por periodos obteniendo las pérdidas y ganancias de las diferentes coberturas. Durante el primer periodo de puede apreciar como los pastizales y las zonas urbanas ganaron terreno en un periodo de 10 años (1979-1996), como se muestra en la figura 2.5. Mientras que los bosques y la selva baja, perdieron terreno dentro de la subcuenca al igual que parte del área agrícola, como lo muestran las gráficas de las figuras 2.5 y 2.6 abajo.

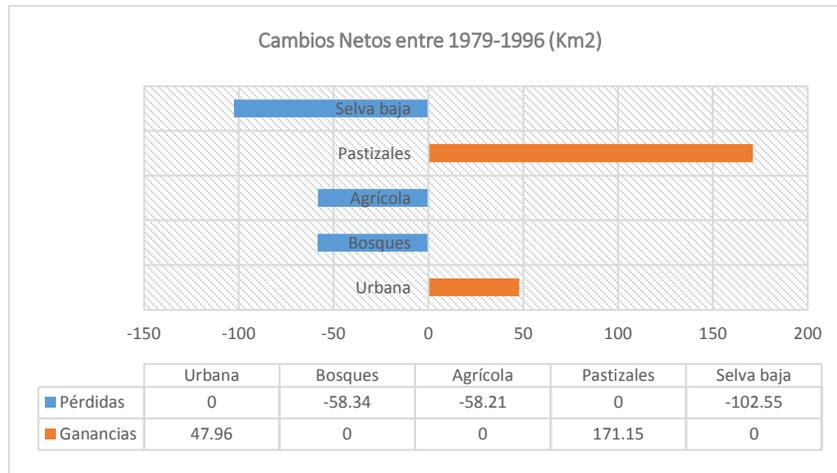


Figura 2.5. Pérdidas y ganancias entre las diferentes coberturas para la subcuenca Alto Atoyac para el periodo 1979-1996.

Para el periodo 1996-2013, se tiene el mismo comportamiento, pero se puede apreciar como la zona urbana aumentó casi el doble en comparación con el periodo anterior (47.96 km^2 vs 87.36 km^2), mientras que el área de bosques perdió mucho terreno en comparación con el periodo anterior (1978-1996), 58.34 km^2 en comparación con 318.84 km^2 , La figura 2.6 muestra los cambios netos ocurridos entre 1996 y 2006, donde se puede ver el área perdida y ganada por las diferentes coberturas.

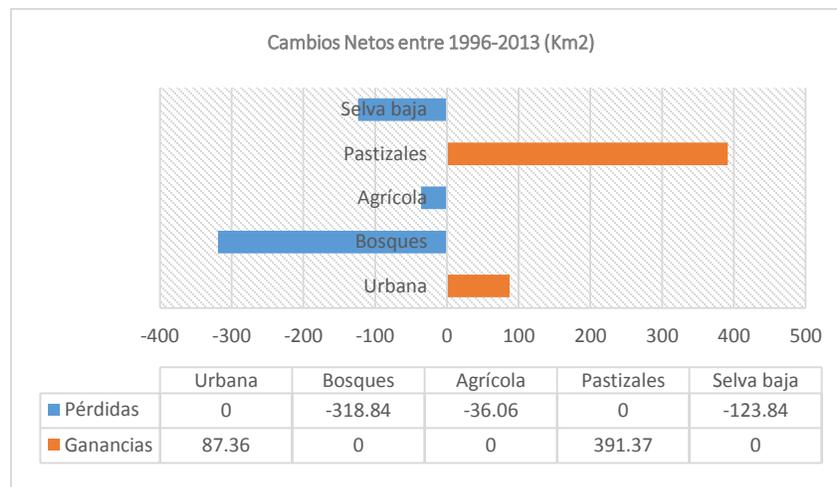


Figura 2. 6. Pérdidas y ganancias entre las diferentes coberturas para la subcuenca Alto Atoyac para el periodo 1996-2013.

Al final se obtuvieron los mapas de cambios ocurridos en la Subcuenca Alto Atoyac para los 34 años de análisis donde se puede apreciar la tendencia de cambio de la vocación del suelo, donde las zonas urbanas ganan terreno y los bosques y selva baja se ven ampliamente reducidos. La pérdida anual promedio de bosque representa el 0.29%, este porcentaje está muy por encima del 0.14% de deforestación global reportado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, 2012).

La figura 2.7 muestra los resultados obtenidos para el año 1979, donde se analizó la imagen satelital tipo LANDSAT del sensor MSS. Esta imagen sirvió como base para analizar los cambios ocurridos en los años posteriores del análisis.

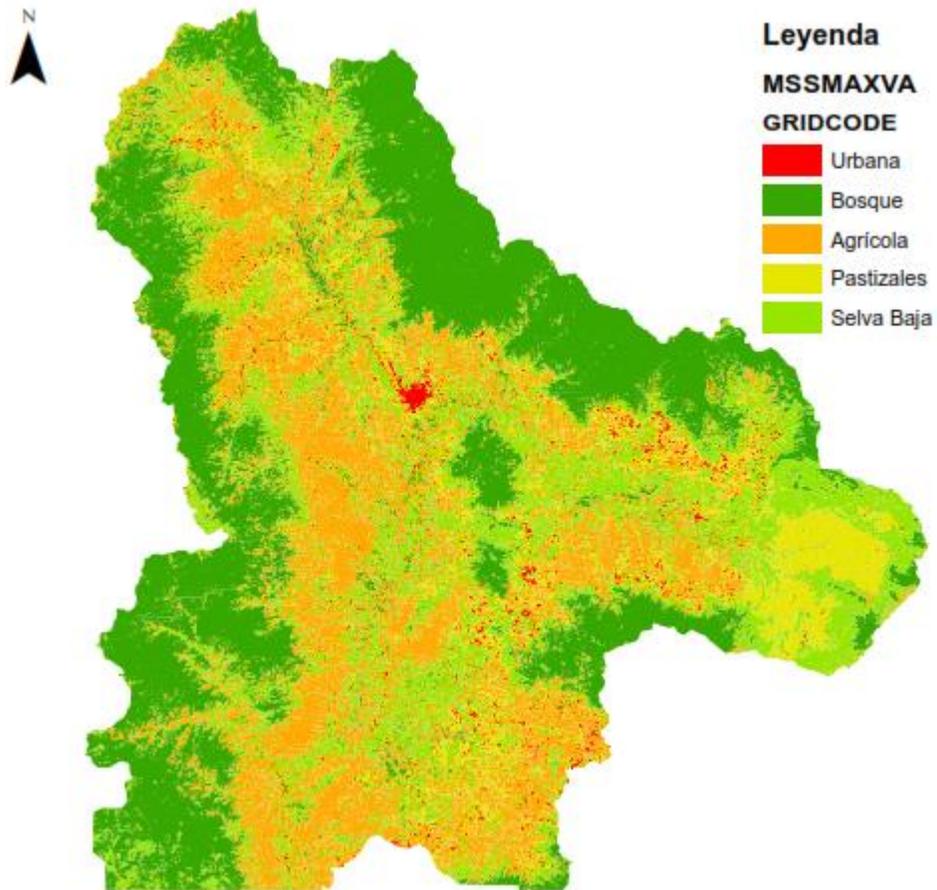


Figura2. 7. Coberturas para el año 1979, obtenidas de imágenes LANDSAT5, Sensor TM y procesadas en IDRISI.

La figura 2.8 muestra los resultados obtenidos para el año 1996, donde se analizó la imagen satelital tipo LANDSAT del sensor TM. Se observa como las áreas urbanas van ganando terreno y como el área de bosques respecto al año 1979 se va reduciendo.

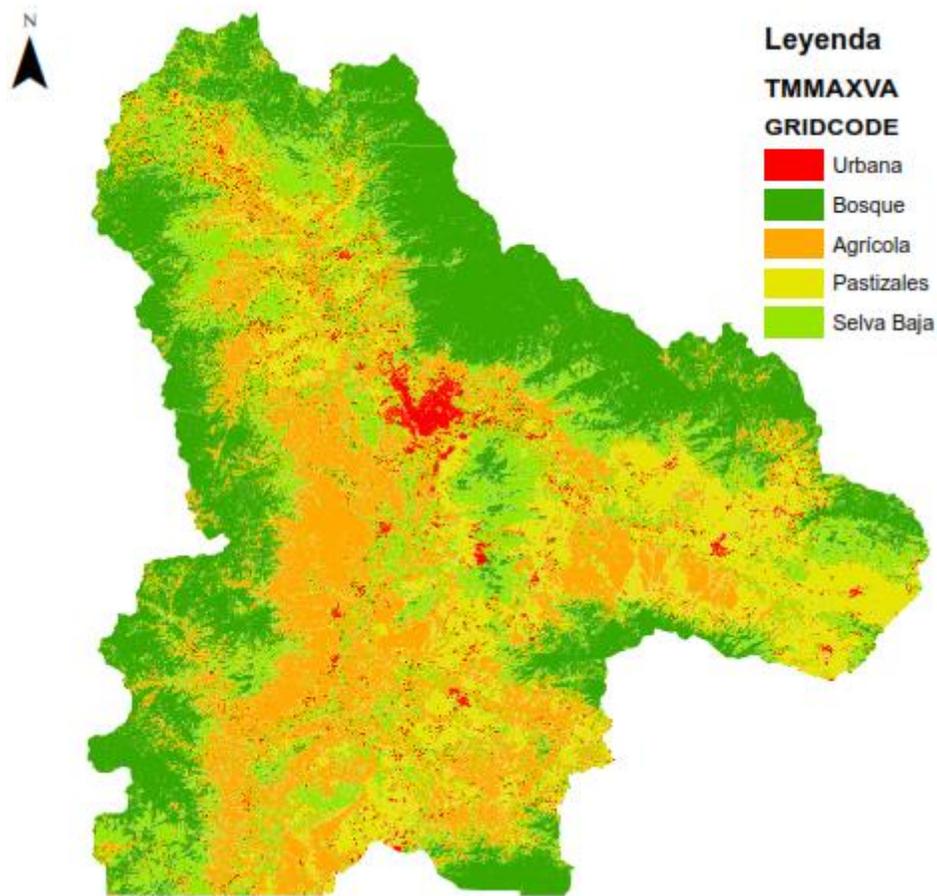


Figura 2. 8. Coberturas para el año 1996, obtenidas de imágenes LANDSAT5, Sensor TM y procesadas en IDRISI.

Se aprecia perfectamente como las zonas urbanas ganan terreno durante estos primeros 17 años de análisis, al igual que la zona de pastizales y también la reducción de las áreas boscosas y la selva baja.

En la figura 2.9, tomada recientemente del sensor OLIS, muestra más claramente la situación actual del área, y como la zona urbana desde 1979 hasta 2013 han aumentado considerablemente dando lugar al incremento de áreas impermeables, las que cubren casi en su totalidad la parte baja de la subcuenca Alto Atoyac. También se puede apreciar la gran reducción en los bosques y selvas bajas, dando paso a las áreas de agricultura y pastizales, mostrados en la figura 2.6 arriba.

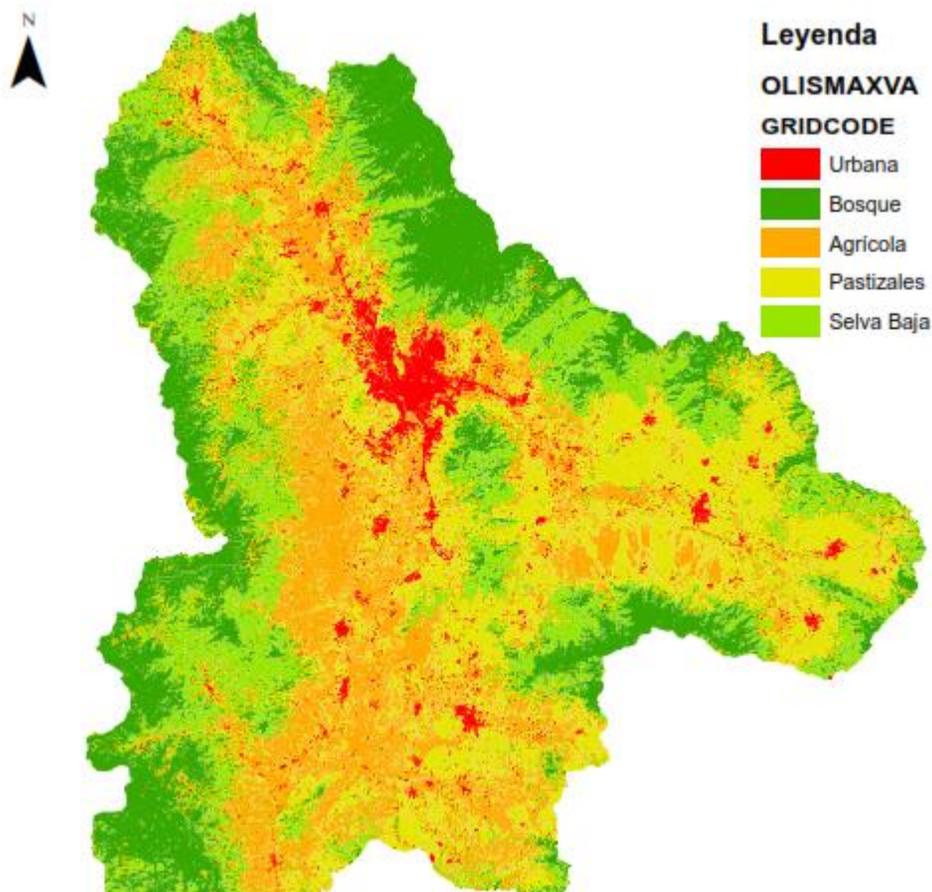


Figura2. 9. Coberturas para el año 2013, obtenidas de imágenes LANDSAT 8, Sensor OLIS y procesadas en IDRISI.

4 CONCLUSIONES

- Durante un periodo de 34 años se han perdido aproximadamente 377.18 Km² de bosques lo que representa un 10% del total del área de la cuenca, en cambio las áreas urbanas durante todo este periodo han aumentado en 87.36 Km², un 3% del total de la cuenca. Lo que se traduce en un aumento de las áreas impermeables, haciendo a la cuenca y al acuífero más vulnerable a la escorrentía superficial y disminuyendo las zonas de recarga hídrica, lo que pone en riesgo la disponibilidad del agua subterránea.
- La pérdida anual de bosques representa el 0.29% anual (durante los 34 años de análisis), muy por encima del 0.14% reportado por la organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), lo que es una situación no favorable dentro de la subcuenca Alto Atoyac, ya que indica efectos negativos debido al aumento de urbanizaciones y de la frontera agrícola.
- Algo muy importante por mencionar es que el método de clasificación de Máxima verisimilitud representa uno de los clasificadores más confiables, ya que presentó los

valores más altos de concordancia para las coberturas seleccionadas dentro de la subcuenca, obteniendo un índice Kappa de entre 0.6 y 0.61.

- El análisis de imágenes de satélite y el uso de sistemas de información geográfica resulta ser un método eficaz para realizar estudios geoespaciales de este tipo, ya que se puede trabajar y procesar gran cantidad de información, optimizando recursos económicos y tiempo.

5. BIBLIOGRAFIA

- BI, H., LIU, B., WU, J., YUN, L., CHEN, Z. & CUI, Z. 2009. Effects of precipitation and land use on runoff during the past 50 years in a typical watershed in Loess Plateau, China. *International Journal of Sediment Research* 24 352-364.
- COPPIN, P., JONCKHEERE, I., NACKAERTS, K., MUYS, B., LAMBIN, 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing* 25 (9), 1565–1596.
- DAMS, J., DUJARDIN, J., REGGERS, R., BASHIR, I., CANTERS, F. & BATELAAN, O. 2013. Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 485, 84-95.
- DEER, P. 1995. Digital change detection techniques in remote sensing. Technical Report, DSTO- TR-0169, Department of Defence, Australia, 52p.
- DEWAN, A. M. & YAMAGUCHI, Y. 2009. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*, 29, 390-401.
- FAO. 2012. El Estado de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 64p.
- GLCF. Global Land Change Facility [Página web], consultado 12 de marzo 2014, <http://www.landcover.org/>.
- INEGI. Cartas de uso de suelo y vegetación, Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía [Página web], consultado 3 de marzo 2014, <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&upc=0&s=est&tg=3587&f=2&cl=0&pf=prod&ef=0&ct=205040000&pg=2>.
- LAURENTE-CAJACURI, M. A. 2011. MEDICIÓN DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA EN LA MICROCUENCA RÍO SUPTE, TINGO MARÍA – PERU. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. GeoFocus (Informes)*, 11, 1-15.
- LÓPEZ DE ULLIBARRI, G. I. & PITA, F. S. 2001. Medidas de concordancia: el índice de Kappa. *Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario-Universitario Juan Canalejo. A Coruña (España)*, 6, 169-171.
- LUNETTA, R.S., ELVIDGE, 1999. C.D. Remote Sensing Change Detection. Taylor & Francis Ltd., London, p318.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E., MORAN, E., 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 24 (12), 2365–2407.
- M. OJIGI, L. 2006. ANALYSIS OF SPATIAL VARIATIONS OF ABUJA LAND USE AND LAND COVER FROM IMAGE CLASSIFICATION ALGORITHMS. ISPRS

- Commission VII Mid-Term Symposium. Theme: Remote Sensing: From Pixel to Processes. 8 – 11 th May 2006, Enschede, The Netherlands.
- MERTENS, B., LAMBIN, E.F., 2000. Land-cover-change trajectories in southern Cameroon. *Annals of the Association of American Geographers* 90 (3), 467–494.
- NIELSEN, A.A., CONRADSEN, K., SIMPSON, J.J. 1998. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: new approaches to change detection studies. *Remote Sensing Environ.* 64, 1–19.
- NIE, W., YUAN, Y., KEPNER, W., S. NASH, M., JACKSON, M. & ERICKSON, C. 2011. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. *Journal of Hydrology*, 407, 105-114.
- NIELSEN, A.A., CONRADSEN, K., SIMPSON, J.J. 1998. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: new approaches to change detection studies. *Remote Sensing Environ.* 64, 1–19
- USGS. Earthexplorer, U.S. Department of the Interior U. S. Geological Survey, [Página Web], consultado 12 de marzo 2014, <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
- YANG, X., LO, C.P., 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing* 23 (9), 1775–1798.
- ZHANG, X., KANG, T., WANG, H. & SUN, Y. 2010. Analysis on spatial structure of landuse change based on remote sensing and geographical information system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12S, S145-S150.
- ZHOU, Q., LI, B., KURBAN, A., 2008a. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China. *International Journal of Remote Sensing* 29 (4), 1093–1107.
- ZHOU, Q., LI, B., KURBAN, A., 2008b. Spatial pattern analysis of land cover change trajectories in Tarim Basin, northwest China. *International Journal of Remote Sensing* 29 (19), 5495–5509.

CAPITULO 3

DETERMINACION DE LA IMPORTANCIA DE INDICES DE VULNERABILIDAD HÍDRICA AL CC PARA LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC MEDIANTE EL METODO ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP).

RESUMEN

En este capítulo se analiza la importancia de las variables necesarias para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC, tomando como punto de partida el cálculo de vulnerabilidad hídrica al CC planteado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), donde se considera como variables de análisis el índice de escorrentía superficial al CC, el índice de población municipal, el índice de marginación social y el índice de estado del acuífero. Se incluyeron tres nuevas variables al análisis, índice de coberturas y uso de suelo, índice de recarga hídrica al CC e índice de contaminación agrícola. El cálculo se realizó con la ayuda del método proceso jerárquico analítico (AHP, por sus siglas en inglés), y se contó con la opinión de expertos en la materia para seleccionar los valores de importancia de cada uno de las nuevas variables en conjunto con las variables planteadas por el IMTA. El enfoque se realizó partiendo de la primicia de quien era el principal causante del CC y como el desarrollo social y económico influía en el uso eficiente que la población daría a sus recursos en este caso el agua, resultando con mayores pesos aquellas variables que incluían la componente social tales como: Índice de población municipal, índice de marginación social, seguida del índice de cobertura y uso de suelo que es la que afecta directamente, las otras variables como, escorrentía, recarga, contaminación agrícola y finalmente el estado del acuífero. Los pesos obtenidos para las variables más importantes fueron 0.2716, 0.2342, 0.1967 (índice de población, índice de marginación social e índice de coberturas y uso de suelo, respectivamente) y para el resto de las variables los pesos fueron 0.1319, 0.1132, 0.0260, 0.0262 (índice de escorrentía superficial al CC, índice de recarga hídrica al CC, índice de contaminación agrícola e índice de acuífero, respectivamente). El rango de consistencia de los valores encontrados según la relación entre cada una de las variables fue de 0.035 menor que 0.1 por lo que se considera aceptable entre cada una de las variables y su relación de pesos obtenidos.

1 INTRODUCCIÓN

El proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es una teoría de medición a través de la comparación de pares sobre el juicio de expertos para derivar escalas de prioridades. La comparación es hecha usando una escala de juicio absoluto que representa que tanto un elemento domina a otro con respecto a un atributo dado (Alonso and Lamata, 2006, Saaty, 2008). El análisis de variables se realizó siguiendo esta metodología con el objetivo de determinar el peso de los índices de vulnerabilidad hídrica al CC, planteados para la subcuenca alto Atoyac y posteriormente poder determinar la vulnerabilidad hídrica. Muchos índices han sido planteados en la bibliografía para determinar la vulnerabilidad hídrica, tanto subterránea como superficial (Sullivan et al. 2006, 2008, 2010; Knoesen, 2009),

al igual que muchos enfoques de los cuales algunos incluyen los efectos del CC sobre el recurso hídrico (Gogu and Dassargues, 2000, Jun et al., 2011, Wang et al., 2012). Pero para plantear la mayor cantidad de variables es necesario contar con la información necesaria para tener resultados más precisos. El Instituto de Tecnología del Agua (IMTA) planteó en su atlas de vulnerabilidad hídrica global al CC, una metodología para calcular la vulnerabilidad al CC dentro de la república Mexicana (IMTA, 2010) considerando cuatro variables: Índice de escorrentía superficial al CC, índice de población municipal, índice de marginación social e índice de acuífero, cada una de ellas con sus respectivos valores de importancia (pesos). En este caso se trabajó con un nuevo enfoque tomando en consideración tres componentes importantes como son: coberturas y uso de suelo, recarga hídrica y contaminación agrícola.

2 MÉTODOS

El proceso analítico jerárquico es un método matricial en el cual se debe de crear la matriz de importancia para cada una de las variables propuestas, es por ello que primero necesitamos conocer las intensidades de importancia, los cuales fueron tomados de los valores planteados por Saaty (2008) y mostrados en la tabla 3.1 donde se presentan los criterios que se toman para la intensidad de importancia a cada variable según su relación con las demás.

Intensidad de Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades que contribuyen de forma igual al objetivo
2	Débil o ligera	
3	Importancia moderada	Experiencia y juicio ligeramente a favor de una actividad sobre otra
4	Moderada alta	
5	Importancia fuerte	Experiencia y juicio fuertemente a favor de una actividad sobre otra
6	Fuerte alta	
7	Importancia muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad es muy fuertemente favorecida sobre otra: su dominancia está demostrada en la práctica
8	Muy muy fuerte	
9	Importancia extrema	La evidencia favorece una actividad sobre otra y es la posibilidad más alta de afirmación
Recíprocos o mayores	Si la actividad i tiene uno de los números no ceros de arriba que se le asignen en comparación con la actividad j, entonces j tiene el valor	Suposición razonable

Intensidad de Importancia	Definición	Explicación
	inverso en comparación con i	
1.1-1.9	Si las actividades son muy cercanas	Puede ser difícil asignar el mejor valor pero cuando se comparó con otras actividades contrastadas la medida de los números pequeños podría no ser notoria, aun podrían indicar la importancia relativa de las actividades

Tabla 3. 1. Valores de intensidad de importancia para crear el análisis matricial. Fuente Saaty, 2008.

2.1 Índice de vulnerabilidad hídrica global

La metodología plantea por el IMTA fue el punto de partida para realizar el análisis de los pesos de las nuevas variables planteadas con la ayuda del AHP.

2.2 Índice de escurrimiento superficial

Representa la fracción en la cual disminuye o aumenta el escurrimiento medio anual en relación al volumen histórico de escurrimiento. En forma similar al IPCC, un valor de 0 en el IES_{CC} representaría un cambio nulo en el volumen de escurrimiento, mientras que un valor de 0.10 indicaría una reducción en el volumen de escurrimiento del 10%.

$$IES_{CC} = 1 - \frac{VES_{CC}}{VESH}$$

Dónde: IES_{CC} es índice de escurrimiento superficial ante el CC, adimensional, VES_{CC} volumen de escurrimiento Superficial ante el CC, mm/año, $VESH$, volumen de escurrimiento superficial histórico, mm/año.

2.3 Índice de Población municipal

Está en dependencia de la cantidad poblacional en cada municipio. En este caso solo se normaliza la población por municipio, la cual fue tomada de la base de datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI, 2010).

2.4 Índice de Marginación Social

Es el segundo componente que determina el grado de adaptación es el nivel de infraestructura municipal. El cual comprende nueve indicadores socioeconómicos (CONAPO, 2010):

1. Grado de analfabetismo

2. Educación primaria terminada
3. Drenaje sanitario
4. Acceso a energía eléctrica
5. Servicios de agua potable
6. Nivel de hacinamiento
7. Porcentaje de viviendas con piso de tierra
8. Localidades con población menor a 5000 habitantes
9. Ingreso económico

2.5 Grado de explotación de acuíferos

Se toma según la clasificación del atlas del agua en México (SEMARNAT, 2012), donde clasifica los acuíferos en sub-explotados y explotados. En la tabla 3.2 se muestra los índices usados por IMTA para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica global al CC.

Componente IPCC (2007)	Variable	Índice	Peso específico
Grado de exposición	Escurrimiento superficial	IES_{cc}	0.71
Sensitividad	Población municipal	IP_{ob}	0.13
Capacidad de adaptación	Índice de marginación social	IM_{arg}	0.09
	Grado de explotación de acuíferos	$IA_{cuifero}$	0.07

Tabla 3.2. Índices para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica y pesos. Fuente (IMTA, 2010)

Al final se obtiene la ecuación general de cálculo de vulnerabilidad hídrica al CC.

$$IVH = 0.71 * IES_{cc} + 0.13 * IP_{ob} + 0.09 * IM_{arg} + 0.07 * IA_{cuifero}$$

2.6 Nuevas variables a analizar

Las nuevas variables a analizar son: Índice de cambio de coberturas y uso de suelo, índice de recarga hídrica al CC e índice de contaminación agrícola. Para el índice de coberturas se analizaron los cambios ocurridos durante 34 años en la subcuenca mediante análisis de percepción remota, el índice de recarga hídrica al CC se calculó mediante el modelado de la cuenca mediante el modelo HELP (HYDROLOGY EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE). Debido a la escasez de la información no se pudo plantear un índice de calidad de agua para la subcuenca, pero como se contaba con parámetros físico químicos del agua dentro de la subcuenca se planteó un índice de contaminación agrícola tomando en cuenta aquellos parámetros que pueden ser indicadores de contaminación agrícola y que son encontrados en los fertilizantes.

En la tabla 3.3 se muestran todas las variables usadas en el análisis para el cálculo de pesos W_i . La sumatoria final de los pesos debe dar como resultado 1 o el 100%.

Variable	Peso (w_i)
Índice de uso d suelo y cambio de coberturas	W1
Índice de recarga hídrica al CC	W2
Índice de contaminación agrícola	W3
Índice de escorrentía superficial al CC	W4
Índice de Población municipal	W5
Índice de marginación social	W6
Índice de explotación de acuíferos	W7
Σ	1

Tabla 3.3. Consolidado de variables analizadas para determinar la vulnerabilidad hídrica en la subcuenca Alto Atoyac.

2.7 Relación de variables

El CC es el factor externo principal, que amenaza el sistema de la subcuenca, esta variación climática es generada por factores antropogénicos producidos por el hombre. Aumento de poblaciones trae consigo mayor demanda de recursos, en este caso el recurso hídrico, a su vez esto produce la necesidad de usar más territorios para los diferentes usos, ya sean urbanos, agrícolas, industriales etc. Estos cambios producen efectos negativos, tales como aumento de la escorrentía superficial y reducción de la recarga de los mantos acuíferos, lo que automáticamente afecta la reducción del recurso hídrico, contaminación del mismo etc.

Al haber un desarrollo económico y social dentro de un área permite que esta tenga mejores herramientas para afrontar los efectos del CC, poblaciones con un desarrollo bajo o marginadas serán más susceptibles a los cambios en el clima. Poblaciones con bajo nivel económico y educativo tenderán a hacer un uso poco eficiente de sus recursos, resultando con mayores pesos e importancia aquellas variables que incluían la componente social tales como: Índice de población municipal, índice de marginación social, seguida del índice de cobertura y uso de suelo que es la que afecta directamente, las otras variables como, escorrentía, recarga, contaminación agrícola y al final el estado del acuífero. En la figura 3.1 se puede ver la relación de variables obtenidas para el análisis jerárquico. A partir de este esquema se dieron las intensidades de importancia para cada una de las variables según esta afectaba o influenciaba al resto.

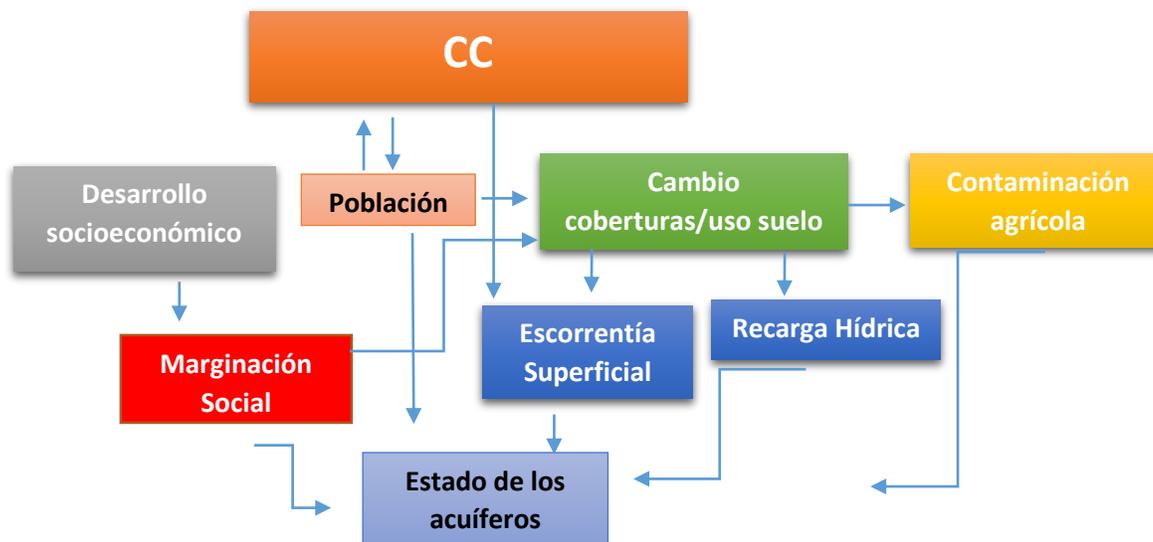


Figura 3.1. Relación entre variables analizadas para determinar la vulnerabilidad hídrica en la subcuenca Alto Atoyac.

2.8 Análisis Matricial

El procedimiento consiste en formar una matriz de importancia de variables, para las que se deberán hacer las siguientes consideraciones, las variables de la izquierda (filas) serán las mismas variables que en la parte superior (columnas), la valoración se hará según la relación entre variables que a criterio de los expertos consideren correspondientes. Según este orden las variables de la izquierda dirán cuántas veces son más importantes que las variables de la parte superior. Las prioridades o pesos, se obtienen dividiendo la suma de cada fila entre la suma total de todas las filas. Esta información debe validarse mediante una relación de consistencia de variables.

La importancia y la relación de cada una de las variables se llevaron a cabo con el apoyo de expertos del grupo de investigación en CC y vulnerabilidad hídrica de cuencas de la Universidad Simon Fraser en Canadá, para calcular los nuevos pesos para las variables planteadas.

Matriz de intensidad de importancia.

		<i>Colum₁</i>	.	.	.	<i>Colum_n</i>
		<i>Var1</i>	<i>Var2</i>	<i>Var3</i>	<i>Var4</i>	<i>Var_n</i>
<i>Fila₁</i>	<i>Var1</i>	1	<i>l₁</i>	<i>l₂</i>	<i>l₃</i>	<i>l_{n1}</i>
.	<i>Var2</i>	1/ <i>l₁</i>	1	<i>l₄</i>	<i>l₅</i>	<i>l_{n2}</i>
.	<i>Var3</i>	1/ <i>l₂</i>	1/ <i>l₄</i>	1	<i>l₆</i>	<i>l_{n3}</i>
.	<i>Var4</i>	1/ <i>l₃</i>	1/ <i>l₅</i>	1/ <i>l₆</i>	1	<i>l_{n4}</i>
<i>Fila_n</i>	<i>Var_n</i>	1/ <i>l_{n1}</i>	1/ <i>l_{n2}</i>	1/ <i>l_{n3}</i>	1/ <i>l_{n4}</i>	1

$$w_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Donde, F_i representa la sumatoria de toda la fila i , w_i : peso de la variable i , I_1 hasta I_n son los valores de importancia de cada una de las variables, leyendose de la siguiente manera la variable de la fila 1 cuantas veces es mas importantes que la variable de la columna 1 hasta llegar a la columna n haciendose esto para todas las filas.

	I_{PM}	I_{USCC}	I_{ESC}	I_{RHC}	I_{MS}	I_{CA}	I_A
I_{PM}	1	2	4	4	1	8	9
I_{USCC}	1/2	1	2	2	1/2	7	8
I_{ESC}	1/4	1/2	1	1	1/3	6	5
I_{RHC}	1/4	1/2	1	1	1/3	5	4
I_{MS}	1	2	3	3	1	7	8
I_{CA}	1/8	1/7	1/6	1/5	1/7	1	1
I_A	1/9	1/8	1/5	1/4	1/8	1	1

I_{ESC} : Índice de escorrentía superficial al CC, I_{RHC} : Índice de recarga hídrica al CC, I_{CA} : Índice de contaminación agrícola, I_A : Índice de acuífero, I_{PM} : Índice de Población, I_{MS} : Índice de marginación social e I_{USCC} : Índice de uso de suelo y coberturas

2.9 Validación de resultados

Para validar las intensidades de importancias usadas es necesario calcular la relación de consistencia (RC) de las variables, debiendo antes calcular el índice de consistencia (IC) de la matriz con el método del eigenvalor según SAATY.

$$\begin{bmatrix} 1 & I_1 & I_2 & I_3 \\ 1/I_1 & 1 & I_4 & I_5 \\ 1/I_2 & 1/I_4 & 1 & I_6 \\ 1/I_3 & 1/I_5 & 1/I_6 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Aw_1 \\ Aw_2 \\ Aw_3 \\ Aw_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Aw_1/w_1 \\ Aw_2/w_2 \\ Aw_3/w_3 \\ Aw_n/w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_n \end{bmatrix}$$

$$\text{Índice de consistencia, } IC = \frac{\lambda_{prom} - n}{n-1}$$

Donde, I_1 hasta n importancia de la variable, λ eigenvalor, n : cantidad de variables.

La relación de consistencia de la matriz debe ser menor del 10% para que exista relación entre cada una de las variables analizadas.

$$RC = \frac{IC}{RI} < 0.1$$

Donde RC es la relación de consistencia y RI el valor promedio de IC para matrices al azar usando la escala de Saaty obtenida por Forman (Forman, 1990).

El valor promedio del índice de consistencia ha sido calculado por varios autores bajo diferentes métodos y número de matrices generadas involucradas en el proceso (Alonso and Lamata, 2004, Alonso and Lamata, 2006, Aguaron and Moreno, 2003, Forman, 1990, Golden and Wang, 1990, Lane and Verdini, 1989, Saaty, 1980, Tummala and Wan, 1990) como se muestra en la tabla 3.4 donde se presentan diferentes valores promedios del índice de consistencia presentado por diferentes autores.

Número variables	Oak Ridge	Wharton	Golden Wang	Lane, Verdini	Forman	Noble	Tumala, Wan	Aguaron et al	Alonso-Lamata	
	100 Matrices	500 Matrices	1000 Matrices	2500 Matrices		500 Matrices		100000 Matrices	100000 Matrices	500000 Matrices
3	0.382	0.58	0.5799	0.52	0.5233	0.49	0.500	0.525	0.5245	0.5247
4	0.946	0.90	0.8921	0.87	0.8860	0.82	0.834	0.882	0.8815	0.8816
5	1.220	1.12	1.1159	1.10	1.1098	1.03	1.046	1.115	1.1086	1.1086
6	1.032	1.24	1.2358	1.25	1.2539	1.16	1.178	1.252	1.2479	1.2479
7	1.468	1.32	1.3322	1.34	1.3451	1.25	1.267	1.341	1.3417	1.3417
8	1.402	1.41	1.3952	1.40		1.31	1.326	1.404	1.4056	1.4057
9	1.350	1.45	1.4537	1.45		1.36	1.369	1.452	1.4499	1.4499
10	1.464	1.49	1.4882	1.49		1.39	1.406	1.484	1.4854	1.4854
11	1.576	1.51	1.5117			1.42	1.433	1.513	1.5141	1.5140
12	1.476		1.5356	1.54		1.44	1.456	1.535	1.5365	1.5365
13	1.564		1.5571			1.46	1.474	1.555	1.5551	1.5551
14	1.568		1.5714	1.57		1.48	1.491	1.570	1.5713	1.5713
15	1.586		1.5831			1.49	1.501	1.583	1.5838	1.5838

Tabla3. 4. Valores promedios del índice de consistencia, para diferente número de variables y bajo diferentes cálculos de autores.

A través del método del eigenvalor, planteado por Saaty, se obtuvo un índice de consistencia de 0.046. De la tabla de arriba selecciono el valor RI, para un total de siete variables.

$$RC = \frac{0.046}{1.32} = 0.034 < 0.1$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la relación de variables obtenida con la ayuda del AHP, se logró calcular el peso para cada variable dando como resultado un mayor peso para aquellas variables que contenían la componente social, seguida del cambio en coberturas y uso de suelo a como se muestra en la tabla 3.5 donde se observan los pesos obtenidos del Proceso Analítico Jerárquico.

Variable	Peso (wi)
Índice de uso de suelo y cambio de coberturas	0.1967
Índice de recarga hídrica al CC	0.1132
Índice de contaminación agrícola	0.0260
Índice de escorrentía superficial al CC	0.1319
Índice de Población municipal	0.2716
Índice de marginación social	0.2342
Índice de explotación de acuíferos	0.0263
Σ	1

Tabla 3.5. Peso de variables analizadas para determinar la vulnerabilidad hídrica en la subcuenca Alto Atoyac

Dando como resultado la siguiente ecuación de vulnerabilidad hídrica al CC.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{VHcc} = & 0.1319 * IESC + 0.1132 * IRHC + 0.0260 * ICA + 0.0263 * IA + 0.2716 * IPM.. + \\
 & + 0.2342 * IMS + 0.1967 * IUSCC
 \end{aligned}$$

La relación de variables realizadas permitió darle mayor importancia a cada una de las componentes sociales, siendo los índices de marginación social y la población municipal los más influyentes dentro del estudio, seguidos de la parte física de la cuenca, índice de uso de suelo y coberturas que rige los parámetros hidrológicos como escorrentía, recarga y todo esto al final depende del grado de uso y conservación que la población de a sus recursos.

La forma de validar los pesos encontrados, fue respecto a la relación de consistencia, que para este estudio la consistencia encontrada para la relación de variables fue de 3.4% menor del 10% que se plantea en la metodología, por lo que se puede decir que si existe consistencia entre la relación de variables planteadas.

Con el enfoque planteado donde las componentes sociales resultaron ser las más importantes, se pueden medir de una mejor manera los impactos que la parte social y económica tendrán sobre la subcuenca, a la vez que estas componentes son las más fundamentales para enfrentar los efectos negativos del CC y reducirlos al máximo, buscar las medidas de adaptación necesarias para mitigar sus consecuencias.

4. CONCLUSIONES

- La nueva ecuación de vulnerabilidad planteada representa una forma diferente de calcular la vulnerabilidad hídrica al CC, ya que permite localizar los efectos en un área determinada con variables relativamente de fácil acceso como son: estudios físico-químicos del agua, análisis de imágenes satelitales o coberturas por medio de la percepción remota y análisis de recarga hídrica.
- La componente social se consideró como la más importante en el estudio, ya que el desarrollo socioeconómico y educativo ayudará a estar mejor adaptados (menos vulnerables) a afrontar los efectos negativos del CC dentro de una área determinada.

- La relación de variables se realizó tomando en cuenta la cantidad de veces que una variable era afectada o influenciada por cada una de las variables en cuestión. La relación de variables planteadas se verificó con el índice de consistencia donde valores por debajo del 10% indican buena relación entre cada una de las variables, obteniendo un valor de consistencia de 3.4% muy por debajo del 10%, lo que indica que las suposiciones realizadas son aceptables.
- Entre más variables puedan ser incorporadas al análisis, se obtendrá un mejor ajuste de la vulnerabilidad a las condiciones reales, pudiendo focalizar aún más los efectos del CC en el área, siendo el acceso a la información de calidad la única limitante y reto dentro del área de estudio.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AGUARON, J. AND MORENO-JIMENEZ, J.M. 2003. The geometric consistency index: Approximated thresholds, *European Journal of Operational Research* 147, 137-145
- ALONSO, J.A AND LAMATA, M.T. 2004. Estimation of the Random Index in the Analytic Hierarchy Process. *Proceedings of Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*. Perugia, 1 pp 317-322.
- ALONSO, J. A. & LAMATA, M. T. 2006. CONSISTENCY IN THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: A NEW APPROACH *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14, 445-459.
- CONAPO 2010. Índice de Marginación por localidad.
- FORMAN, E.H. 1990. Random indices for Incomplete Pairwise Comparison Matrices. *European Journal of Operational Research* 48, 153-155
- GOLDEN, B. L. AND WANG, Q. 1990. An alternative measure of consistency, in *Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies*, (eds) B. L. Golden, A. Wasil and P.T. Harker, New-York, Springer Verlag, pp. 68-81.
- GOGU, R.C. DASSARGUES, A. 2000. Current and future trends in groundwater vulnerability assessment. *Environ Geol*; 39:549-59.
- IMTA. 2010. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el CC [MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F. y PATIÑO-GÓMEZ, C. (editores)]. 2010. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 161 pp.
- INEGI 2010. Censo de Población y Vivienda. Principales resultados por localidad
- JUN, K. S., CHUNG, E.-S., SUNG, J.-Y. & LEE, K. S. 2011. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. *Science of the Total Environment*, 409, 5228-5242.
- KNOESEN, D. 2009. Integrating hydrological hazards and climate change as a tool for adaptive water resources management in the Orange River Catchment. PhD thesis, University of KwaZulu Natal.
- LANE, E.F. AND VERDINI, W.A. 1989. A consistency test for AHP decision makers, *Decision Science* 20, 575-590
- SAATY, T.L. 1989. *The Analytic Hierarchy Process*. New York
- SAATY, T. L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process *Int. J. Services Sciences*, 1, 83-98.
- SEMARNAT 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de

- estadísticas ambientales, Indicadores clave y de desempeño ambiental
- SULLIVAN CA, VOROSMARTY C, BUNN S, CLINE S, HEIDECHE C, STORYGARD A, PROUSSEVITCH A, DOUGLAS E, BOSSIO D, GUNTHER D, GIACOMELLO AM, O'REGAN DP, MEIGH JR. 2006. Mapping the links between water, poverty and food security. GWSP working paper no. 1, Bonn
- SULLIVAN CA, DEIDERICHS N, MANDER M. 2008. Assessing water vulnerability in the Orange River Basin in South Africa. Newater technical report, Oxford University, UK
- SULLIVAN CA, DICKENS C, MANDER M, BONJEAN M, MACFARLANE D, BHARWANI S, MATIN N, VAN NIEUKERK K, DIEDERICHS N, TAYLOR A, SHALE M, KING-OKUMU C, KRANZ N, BISARO S, ZABALA A, ROMERO A, HUNTJENS P, KNOESEN D (2010) Promoting adaptive water management in the Orange Senqu River Basin: a NeWater case study. In: Mysiak J, Henrikson HJ, Sullivan CA, Bromley J, Pahl-Wostl C (eds) The adaptive water resource management handbook. Earthscan, London
- TUMMALA, V.M.R. AND WAN, Y.W.1994. On the mean random inconsistency index of the analytic hierarchy process (AHP). Computers and Industrial Engineering 27, 401-404.
- WANG, X., MA, F. B. & LI, J. Y. 2012. Water Resources Vulnerability Assessment based on the Parametric-system Method: a Case Study of the Zhangjiakou Region of Guanting Reservoir Basin, North China. Procedia Environmental Sciences, 13, 1204-1212.

CAPITULO 4

VULNERABILIDAD HIDRICA DE LA SUBCUENCA ALTO ATOYAC FRENTE AL CAMBIO CLIMATICO.

RESUMEN

El siguiente análisis presenta una integración de cada uno de los componentes y parámetros analizados anteriormente, para poder conocer la vulnerabilidad hídrica de la subcuenca Alto Atoyac frente al CC. Se integraron siete variables de análisis partiendo de la metodología planteada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, y modificada para efectos de este estudio a través de un proceso analítico jerárquico. Cada análisis fue esencial para determinar los efectos del CC sobre el área de estudio, para escenarios futuros de CC. Las variables utilizadas dentro del análisis fueron: índice de población municipal, índice de marginación social, índice de uso de suelo y cambio de coberturas, índice de escorrentía superficial al CC, índice de recarga hídrica al CC, índice de potencial a la contaminación agrícola e índice de explotación de acuíferos. Los resultados obtenidos son a nivel de municipios, donde los mapas de vulnerabilidad hídrica indican los municipios que se verán afectados por los efectos negativos del CC, en este caso disponibilidad y contaminación del recurso hídrico. En los Valles Centrales del acuífero se utiliza el 87.6% del agua para propósitos agrícolas y 9.5% para abastecimiento público-urbano y doméstico (Pérez et al., 2010), por lo que la disponibilidad y seguridad del agua se verá afectada, lo que puede provocar potenciales problemas, tanto en la producción agrícola (seguridad alimentaria) como en el abastecimiento (consumo humano), por lo que este estudio puede ser el punto de partida para tomar las medidas de gestiones, dentro de los municipios que presenten un mayor afectación para un futuro cercano (2015-2039). Por lo que en este caso será fundamental el apoyo, o los planes de gestión necesarios que los actores, gobiernos municipales, organizaciones, ONGs, pueden realizar con tal de paliar una posible y latente crisis hídrica en los valles centrales de Oaxaca.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años el interés y los estudios por determinar la vulnerabilidad espacial en un área determinada incluyendo los efectos que el CC tendrá dentro de esta, han aumentado notablemente (Adger et al., 2004, Gleick, 1990, IPCC, 2001, Jun et al., 2011, Lane et al., 1999, Meigh et al., 1999, Vogel, 2001, Yang et al., 2012, Yoo et al., 2011). Los estudios de vulnerabilidad al CC son útiles para tomar las políticas de adaptación necesarias. Siendo la adaptación un componente principal tomando en cuenta como la mayoría de los países desarrollados han sufrido los efectos del CC debido a los altos niveles de explotación de sus recursos naturales (Jun et al., 2011). Pero algo muy importante a tener en cuenta es que los efectos del CC son heterogéneos, presentándose de diversas maneras en un área determinada,

siendo difíciles de promediar en un entorno que no sea regional o nacional (Eriksen and Kelly, 2007, Yoo et al., 2011).

En general la vulnerabilidad es el grado en el cual un sistema es susceptible a, o incapaz de enfrentarse con los efectos adversos de los cambios en el medioambiente (IPCC, 2001). En lo que al recurso hídrico se refiere la vulnerabilidad puede ser definida como la facilidad con la cual un sistema puede ser dañado por los factores naturales y las actividades humanas (Wang et al., 2012). Para el cálculo de la vulnerabilidad se han planteado muchas metodologías y diferentes variables de análisis (Brooks et al., 2005, Moss et al., 1999, Gogu and Dassargues, 2000, Jun et al., 2011, Knoesen, 2009, UNDP, 2005, Sullivan et al. 2006, 2008, 2010, Wang et al., 2012). La finalidad de cada estudio de vulnerabilidad es tratar de reducir al máximo los efectos adversos mediante las medidas de adaptación pertinentes, ya que la capacidad con la que un sistema es capaz de adaptarse reducirá su vulnerabilidad al peligro determinado por un sinnúmero de factores externos, en cualquier marco de tiempo dado (Brooks, 2003).

El objetivo principal de este estudio es determinar la vulnerabilidad hídrica de la subcuenca Alto Atoyac frente al CC para escenarios futuros, integrando siete diferentes variables generales de análisis, las cuales nos pueden indicar los potenciales problemas de disponibilidad y contaminación del recurso hídrico en los próximos años dentro del área de estudio, lo que hará vulnerable al sistema hídrico y que podrá generar problemas de estrés hídrico dentro de la subcuenca por falta de disponibilidad del agua.

2 MÉTODOS

2.1 Determinación de la Vulnerabilidad

En función del marco del CC la vulnerabilidad, está en función de la exposición al clima (**E**), referida a la amplia relación de estímulos climáticos tales como: cambio de temperatura, precipitación, olas de calor, inundaciones y sequías, de la sensibilidad (**S**) que es el grado con el cual es sistema es modificado o afectado por las perturbaciones y la capacidad adaptiva (**CA**) de un sistema de evolucionar para adaptarse a los peligros ambientales o cambios de políticas y para ampliar la gama de la variabilidad con la que se puede hacer frente (IPCC, 2007, Kim and Chung, 2013), la vulnerabilidad por ende puede definirse y calcularse como:

$$Vulnerabilidad = (\alpha \times E) + (\beta \times S) - (\gamma \times CA)$$

Dónde: α , β , y γ , son ponderaciones para **E**, **S** y **CA** respectivamente.

Pudiéndose escribir de forma general como:

$$Vi = \sum Wi * Ci$$

Dónde: Wi son ponderaciones para las variables Ci

2.2 Normalización de variables

La normalización de cada uno de los índices se realizó entre 0 y 1, según lo planteado por el Atlas de vulnerabilidad hídrica frente al CC para México (IMTA, 2010). Se utilizó la siguiente ecuación que relaciona los valores máximos y mínimos de una serie para normalizarlos entre 0 y 1.

$$Z_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Dónde: Z_i , Índice normalizado, X_{\min} : menor valor de la serie, X_{\max} : máximo valor de la serie, X_i : valor que se desea normalizar.

Para los efectos del CC se tomó la relación entre los datos históricos y los proyectados con los escenarios de CC.

$$Y_i = 1 - \frac{X_{\text{Cambio climático}}}{X_{\text{Histórico}}}$$

Dónde: Y_i , Índice normalizado, X_{CC} (precipitación, temperatura), valor proyectado a través de los escenarios de CC y modelos de circulación general, $X_{\text{Histórico}}$, datos históricos (precipitación, temperatura), dentro del área de estudio.

2.3 Índice de uso de suelo y cambio de coberturas

Se seleccionaron 5 diferentes de coberturas, a las que se les asignó valores de menor a mayor según el grado en el que se consideraron vulnerables hídricamente, siendo las zonas urbanas más vulnerables y las áreas con bosques menos vulnerables, planteando una escala de 1 al 5, luego normalizadas entre 0 y 1. En la tabla 4.1 se muestran los valores normalizados para los diferentes tipos de coberturas determinados en el capítulo 2.

COBERTURAS	Escala asignada	Normalizados
Urbana	5	1
Agrícola	4	0.75
Bosques	1	0
Pastizales	3	0.5
Selva baja	1	0

Tabla4. 1. Coberturas y uso de suelo dentro de la subcuenca alto Atoyac obtenidas mediante análisis de percepción remota en un análisis de 34 años y normalizados entre 0 y 1, según escala asignada.

2.4 Índice de potencial contaminación agrícola

La ingesta de nitritos y nitratos a través del consumo de agua puede inducir directamente efectos adversos sobre la salud humana, algunos estudios sugieren además que la ingestión

prolongada de nitratos y nitritos podría contribuir al desarrollo de linfomas y cánceres, enfermedades coronarias, infecciones del tracto respiratorio, y malformaciones en los recién nacidos (Camargo and Alonso, 2006). El nitrógeno también causa eutrofización de las aguas lo que puede favorecer el desarrollo de enfermedades infecciosas. Habiendo una relación directa entre la concentración de nutrientes en las aguas superficiales y la abundancia de mosquitos (Townsend et al., 2003).

Para obtener el índice de potencial contaminación agrícola, se trabajó con datos físico-químicos del agua obtenidos por la comisión nacional del agua (INEGI, 2012), el principal parámetro analizado fueron los nitratos encontrados en el agua, que son indicadores potenciales de contaminación por químicos y fertilizantes utilizados en la agricultura (Arauzo et al., 2003, Ávila and Sansores, 2003, Cayuela et al., 1994, Larios Ortiz, 2009, Ongley, 1997), es por ello que la normalización de estos parámetros se hizo respecto a los valores permisibles para consumo humano de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1994), asignando una vulnerabilidad baja a los parámetros por debajo del rango de la norma, media a los que estaban sobre el rango y alta a los que sobre pasaron este valor.

En la tabla 4.2 se indican los valores de nitratos encontrados en la subcuenca Alto Atoyac como indicadores de potencial contaminación agrícola y los valores permisibles planteados por la Secretaria de Salud.

Ubicación		Nitratos (NO ₃ ⁻) Valor Permissible (mg/l)	Valores encontrados en la subcuenca (mg/l)	Normalizados
X	Y			
722394.414	1914099.920	10	17.97	1
721142.390	1911846.955	10	0	0
731349.429	1907079.017	10	184.05	1
732172.430	1906406.026	10	15.31	1
731032.411	1903938.064	10	1.55	0
732456.419	1903865.063	10	1.43	0
730736.400	1902118.092	10	4.52	0
732858.409	1901197.102	10	4.52	0
731617.395	1899523.131	10	104.11	1
732362.397	1898806.140	10	30.99	1
734367.398	1895647.185	10	20.45	1
736525.407	1894692.194	10	12.39	1
737674.410	1893408.211	10	5.58	0
736247.402	1893285.217	10	13.63	1
738059.412	1893036.215	10	10.53	1
737974.409	1892259.228	10	3.72	0
738591.412	1891762.234	10	1.86	0
739105.413	1890993.244	10	0	0
740384.416	1888650.277	10	2.48	0
748348.454	1888107.256	10	33.46	1
740501.416	1888049.286	10	1.24	0

Ubicación		Nitratos (NO ₃ ⁻) Valor Permisible (mg/l)	Valores encontrados en la subcuenca (mg/l)	Normalizados
X	Y			
747776.450	1887548.266	10	0	0
746008.442	1887273.277	10	11.77	1
741039.417	1886926.302	10	4.96	0
750922.464	1886806.265	10	29.13	1
751658.467	1886690.264	10	6.2	0
744418.434	1886585.294	10	0.62	0
742012.422	1886448.305	10	25.41	1
742383.423	1885145.325	10	3.1	0
743163.427	1885135.322	10	0	0
744319.432	1885019.318	10	14.87	1
754806.478	1884993.276	10	6.2	0
755817.482	1884400.280	10	1.86	0
741317.417	1884335.343	10	42.02	1
736495.392	1884219.367	10	44.99	1
743526.428	1884045.338	10	5.58	0
742482.423	1883893.345	10	0.06	0
743457.428	1883872.341	10	0.56	0
743373.427	1883467.348	10	3.1	0
742399.423	1883035.359	10	3.72	0
742812.425	1882110.373	10	1.24	0
742108.421	1881963.378	10	0.99	0
734511.381	1881820.419	10	10.41	1
755227.480	1881313.326	10	1.86	0
757193.487	1881224.318	10	27.89	1
737106.400	1877007.494	10	1.98	0
756622.489	1876906.383	10	15.49	1
761050.506	1876676.362	10	13.01	1
742903.431	1876143.475	10	8.18	0
739997.417	1876072.493	10	1.36	0
769772.534	1875834.326	10	10.53	1
738260.410	1875372.517	10	10.29	1
740678.422	1875297.503	10	0.87	0
753956.482	1875275.423	10	6.32	0
771629.545	1872889.351	10	8.06	0
754375.489	1872791.459	10	16.11	1
779422.565	1872401.311	10	76.84	1
737917.425	1869557.632	10	12.39	1
739991.442	1868027.647	10	105.35	1
736659.428	1867500.684	10	11.46	1
736276.436	1865250.734	10	18.28	1
741009.472	1862862.744	10	12.39	1
742704.480	1862728.731	10	7.19	0

Ubicación		Nitratos (NO ₃ ⁻) Valor Permissible (mg/l)	Valores encontrados en la subcuenca (mg/l)	Normalizados
X	Y			
748067.505	1862383.691	10	3.72	0
737392.464	1861315.808	10	13.45	1
737178.470	1860253.834	10	33.84	1
738710.484	1859272.841	10	0.19	0
740423.492	1859124.828	10	0	0
741301.500	1858595.831	10	0.19	0
736494.509	1854730.965	10	26.77	1
741032.530	1854520.923	10	12.46	1

Tabla4. 2. Puntos de muestreo del agua dentro de la subcuenca Alto Atoyac, mostrando los valores de nitratos obtenidos en cada análisis y normalizados entre 0 y 1, respecto del valor permissible por la norma de calidad de agua para la República Mexicana.

2.5 Índice de escorrentía superficial al CC

El coeficiente de escorrentía es el factor que determina que porcentaje de la precipitación se fluirá en forma de escurrimiento superficial. Este parámetro esta dado en función del uso y tipo de suelo, y su cálculo esta dado a través de la aplicación de métodos indirectos (CNA, 2000).

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000}, K \leq 0.15$$

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5}, K \geq 0.15$$

Dónde: Ce: Coeficiente de escurrimiento, P: Precipitación en mm/año, K: Factor que depende del uso y tipo de suelo.

Las tabla 4.3 y 4.4 muestran los tipos de suelo considerados en la Norma Mexicana NOM-011-CNA-2000 y los valores de K respectivamente.

TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Tabla 4. 3. Clasificación de los diferentes tipos de suelos según la norma obligatoria Mexicana NOM-011.

En la siguiente tabla se muestran los valores de K a tomar en función del uso y tipo de suelo que tengamos en nuestra zona de estudio.

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
CULTIVOS:			
En Hilera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
PASTIZAL			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo	0,24	0,28	0,30
BOSQUE:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

Tabla 4. 4. Diferentes valores de K en función del tipo y uso de suelo.

Si en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

El índice de escorrentía superficial representa la fracción en la cual disminuye o aumenta el escurrimiento medio anual en relación al volumen histórico de escurrimiento. En forma similar al IPCC, un valor de 0 en el IESCC representaría un cambio nulo en el volumen de escurrimiento, mientras que un valor de 0.10 indicaría una reducción en el volumen de escurrimiento del 10% (IMTA, 2010).

$$IEScc = 1 - \frac{VEScc}{VESH}$$

Dónde: $IEScc$ es índice de escurrimiento superficial ante el CC, adimensional, $VEScc$ volumen de escurrimiento Superficial ante el CC, mm/año, $VESH$, volumen de escurrimiento Superficial histórico, mm/año.

2.6 Índice de recarga hídrica al CC.

Se calculó el índice de recarga hídrica al CC siguiendo el mismo principio para el índice de escurrimiento al CC. Los datos de recarga histórica y al CC se obtuvieron mediante el análisis HELP.

$$IRHcc = 1 - \frac{VRHcc}{VRHH}$$

Dónde: $IRHcc$ es índice de escurrimiento superficial ante el CC, adimensional, $VRHcc$ volumen de escurrimiento Superficial ante el CC, mm/año, $VRHH$, volumen de escurrimiento superficial histórico, mm/año. La tabla 4.5 muestra los valores de recarga hídrica en la subcuenca Alto Atoyac producto de la identificación de zonas y rangos de recarga realizados en el capítulo 1 para escenarios climáticos.

Recarga histórica (1951-2010)	Escenario RCP85 Modelo GFDL-CM3		Normalización (2015-2039)	Normalización (2075-2099)
	(2015-2039)	(2075-2099)		
30.14	20.10	14.99	0.3330	0.5027
29.42	20.18	15.05	0.3139	0.4885
28.34	20.18	15.04	0.2879	0.4692
34.39	19.18	13.5	0.4421	0.6064
22.82	9.284	3.97	0.5932	0.8260
21.88	9.284	3.97	0.5757	0.8186
14.01	10.75	8.81	0.2330	0.3714
14.01	10.74	8.81	0.2332	0.3715

Tabla 4.5. Valores de recarga hídrica dentro de la subcuenca Alto Atoyac, obtenidas mediante el modelo HELP, para diferentes periodos y escenarios de CCs y normalizados entre 0 y 1.

2.7 Índice del estado del acuífero

Se tomó según la clasificación del atlas del agua en México ([SEMARNAT, 2012](#)), donde se clasifican los acuíferos en sub-explotados y explotados; estudios recientes indican que el acuífero de Valles Centrales de Oaxaca, perteneciente a la subcuenca Alto Atoyac se encuentra sobre explotado ([Bautista, 2013](#)), por lo que se le asignó el valor más alto dentro de la escala de 0 a 1.

2.8 Índice de Población Municipal

De la base de datos del INEGI del censo realizado en 2010, se obtuvo la población municipal, la cual fue normalizada entre 0 y 1, para obtener el correspondiente índice de población (INEGI, 2010).

2.9 Índice de marginación social

La información se obtuvo del Consejo Nacional de Población, que presenta los índices de marginación social por localidades y municipios para la República mexicana, tomando en consideración nueve aspectos socioeconómicos importantes (CONAPO, 2010)

1. Grado de analfabetismo
2. Educación primaria terminada
3. Drenaje sanitario
4. Acceso a energía eléctrica
5. Servicios de agua potable
6. Nivel de hacinamiento
7. Porcentaje de viviendas con piso de tierra
8. Localidades con población menor a 5000 habitantes
9. Ingreso económico

Los valores fueron normalizados entre 0 y 1, para cada uno de los municipios dentro de la subcuenca alto Atoyac.

Los mapas de índices de vulnerabilidad para cada una de las variables analizadas en el estudio se presentan en el Anexo A.

2.10 Escala de vulnerabilidad

La escala de vulnerabilidad asignada fue de 0 a 1. Donde el 0 indica vulnerabilidad nula o baja y 1 vulnerabilidad alta. Se trabajó con tres niveles de vulnerabilidad, baja, media y alta. En la tabla 4.6 se muestra la escala de vulnerabilidad planteada para asignar le grado de vulnerabilidad dentro de la subcuenca

Vulnerabilidad	Escala asignada
Baja	0-0.25
Media	0.25-0.5
Alta	0.5-1

Tabla 4.6. Escala de vulnerabilidad asignada para determinar la vulnerabilidad dentro de la subcuenca Alto Atoyac el 0 representa vulnerabilidad baja o nula mientras que el 1 es el mayor valor que se puede obtener representando una alta vulnerabilidad.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron dos análisis de vulnerabilidad hídrica al CC; el primero con las variables planteadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en su atlas de vulnerabilidad hídrica global al CC(índice de escorrentía superficial al CC, índice de población municipal, índice de marginación social, índice de acuífero); esta metodología plantea que la variable de mayor peso es la que depende de los agentes externos, en este caso el CC, siendo la escorrentía superficial al CC la de mayor importancia, seguido de la población municipal que es la principal afectada y la cual debe de ser capaz de tomar las medidas de adaptación necesarias las que estarán en función de sus niveles socioeconómicos y el estado del sistema acuífero, los que al final afectaran la vulnerabilidad hídrica de la subcuenca.

Los resultados obtenidos mediante esta metodología son datos muy regionales, siendo más útiles para este tipo de estudios de carácter regional o nacional. Los datos obtenidos muestran valores de vulnerabilidad baja para el primer periodo analizado (2015-2039, para un escenario RCP8.5 de CC), el cual cambia a media para un solo municipio en el periodo (2075-2099), Figura 4.1. Muestra la vulnerabilidad hídrica calculada según la metodología planteada por el IMTA y usando las misma variables que se plantean para el análisis.

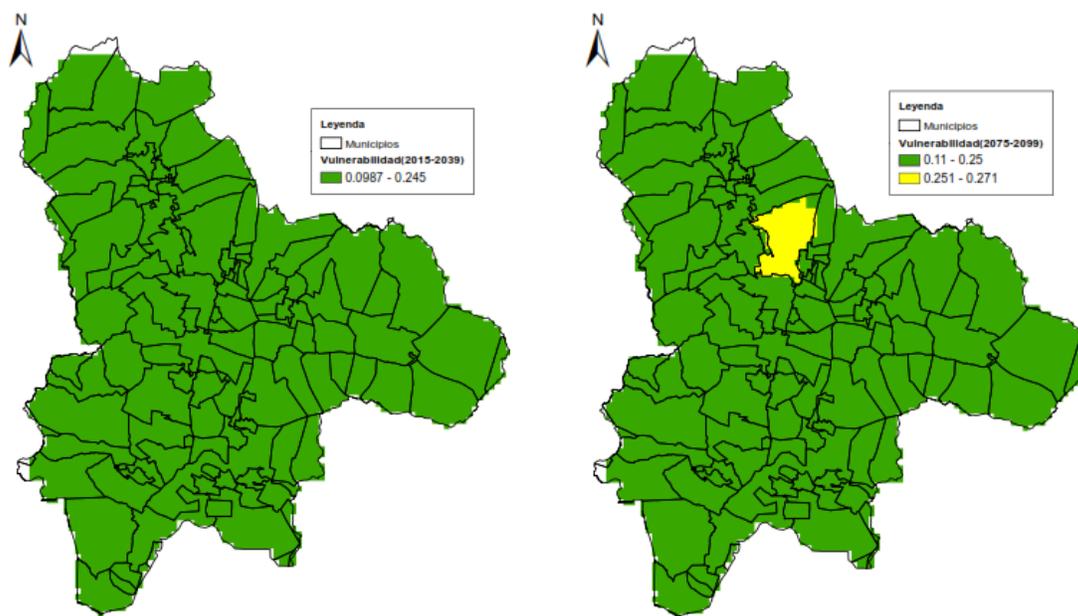


Figura 4. 1. Mapas de vulnerabilidad hídrica global considerando la metodología planteada por el IMTA, en su Atlas de vulnerabilidad hídrica global al CC.

El segundo análisis se realizó planteando nuevas variables de carácter local dentro del área de estudio, para tratar de bajar la escala del análisis. Se agregaron tres nuevas variables al estudio, y se cambió el enfoque e importancia de cada una de las variables partiendo de la primicia que el CC es antropogénico (IPCC, 2013). Una variable muy importante fue el cambio en las coberturas y uso de suelo dentro del área, ya que en estudios recientes han planteado la importancia de incluir esta variable en los estudios de vulnerabilidad frente al

CC (Watson et al., 2013). La calidad del recurso hídrico fue otra variable a tomar en cuenta como variable local, pero desafortunadamente no se contó con datos representativos de calidad del agua (datos bacteriológicos y metales), solo se contó con datos fisicoquímicos del agua en la zona, y tomando en cuenta que la subcuenca es una zona con fuerte vocación agrícola, la contaminación del agua por fertilizantes desempeña un papel muy importante, por lo que se tomaron los parámetros puntuales que indicaron este tipo de contaminación (nitratos). Otra variable usada fue la recarga hídrica al CC ya que la finalidad fue determinar los efectos del CC en la disponibilidad hídrica de la subcuenca. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4.2, las cuales contrastan con el primer análisis realizado (Ver figura 4.1), donde se tienen parámetros más regionales.

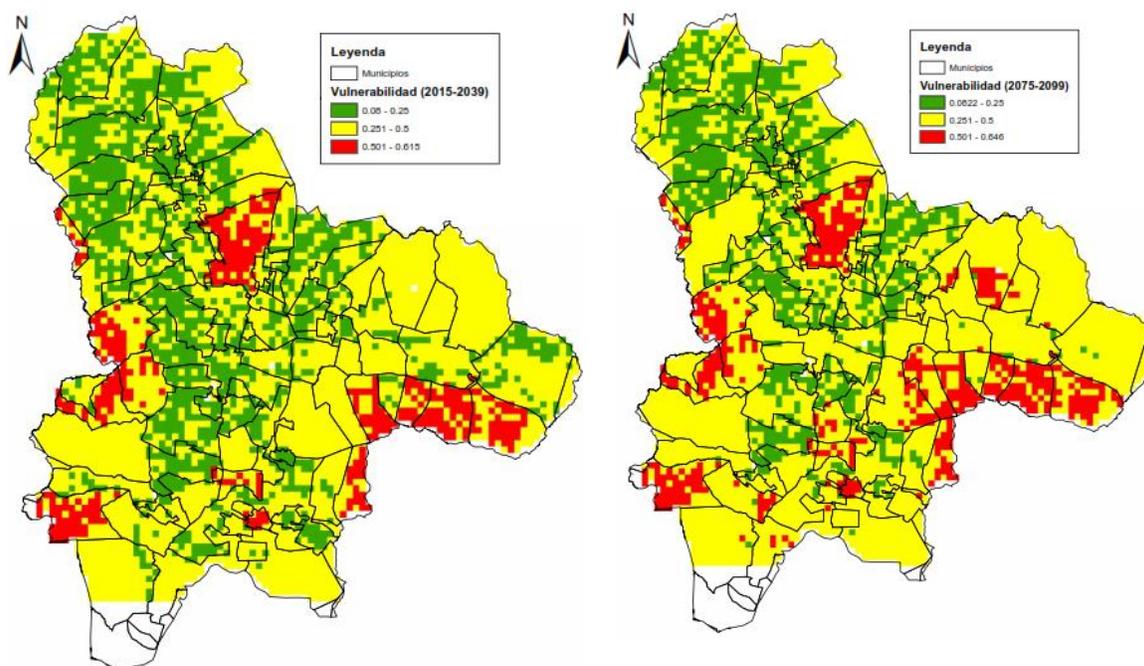


Figura 4. 2. Vulnerabilidad hídrica al CC, calculado con variables planteadas para localizar sus efectos dentro de subcuenca Alto Atoyac.

Al introducir las variables locales, la vulnerabilidad cambia dentro de la subcuenca alto Atoyac, en este caso ya no presenta vulnerabilidad baja para el primer periodo de análisis, sino que la mayor parte tiene una vulnerabilidad media, habiendo focos rojos (vulnerabilidad alta) en algunos municipios. Los municipios con vulnerabilidad alta para el primer periodo (2015-2039, bajo el escenario RCP8.5) son: Oaxaca de Juárez, Santa María Peñoles, Magdalena Mixtepec, Santa Inés del Monte, San Pablo Cuatro Venados, San Miguel Mixtepec, Santiago Apóstol, San Pedro Mártir, San Miguel Tilquiápam, Magdalena Teitipac, San Bartolomé Quialana, San Lucas Quiaviní, Santiago Matatlán; mientras que para el segundo periodo (2075-2099, bajo el escenario RCP8.5) la lista aumenta sumándose los municipios de, San Juan Teitipac, Santo Tomas Jalieza, San Antonio Castillo Velasco, Santa Ana Tlapacoyan, Teotitlán del Valle.

Algo muy importante a tomar en cuenta es que los datos de CC, son obtenidos de modelos de circulación general y escenarios de CC, por lo que los resultados obtenidos no son una predicción sino posibles escenarios, de seguir las tendencias actuales en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Cabe mencionar que hasta el momento no se ha realizado un estudio de vulnerabilidad hídrica al CC en la zona de estudio, los estudios de vulnerabilidad que se han realizado hasta el momento han sido para determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación agrícola a través de métodos conocidos como el DRASTIC y SINTACS, donde el área presenta una vulnerabilidad alta a la contaminación agrícola (Belmonte et al., 2003, Belmonte et al., 2005, Ramos-Leal et al., 2012)

4 CONCLUSIONES

- La metodología planteada por el IMTA es una metodología muy regional, y si a esto le sumamos la resolución de los modelos y escenarios de CC la incertidumbre es mayor. Los valores obtenidos en el primer análisis no reflejan grandes cambios en la subcuenca alto Atoyac, ya que a escala regional esta es un área muy pequeña, por lo que para los dos periodos de estudio (2015-2039, 2075-2099, bajo un escenario RCP8.5), la vulnerabilidad no varió en gran manera, pasando de baja a media en tan solo un municipio (Oaxaca de Juárez).
- La introducción de variables locales muestra una alternativa para reducir la escala en este tipo de estudios, brindándonos datos más cercanos a la realidad y focalizados dentro del área.
- Con la modificación que se realizó a la metodología, donde se incluyeron tres variables locales se obtuvieron datos completamente diferentes a los obtenidos anteriormente, la vulnerabilidad de la subcuenca cambio de baja a media y alta para el primer periodo (2015-2039, bajo un escenario RCP8.5), y para el segundo periodo (2075-2099, bajo un escenario RCP8.5), algunos municipios empezaron a cambiar su vulnerabilidad a alta.
- Los valores de vulnerabilidad media y alta indican potenciales problemas en la disponibilidad y contaminación del recurso hídrico, por lo que los lugares afectados tendrán problemas de escasez y contaminación del recurso hídrico debido a los efectos negativos del CC antropogénico, y las actividades agrícolas dentro de la zona.
- Los municipios en los cuales se deben implementar medidas de adaptación en un futuro cercano son: Oaxaca de Juárez, Santa María Peñoles, Magdalena Mixtepec, Santa Inés del Monte, San Pablo Cuatro Venados, San Miguel Mixtepec, Santiago Apóstol, San Padre Mártir, San Miguel Tilquiápam, Magdalena Teitipac, San Bartolomé Quialana, San Lucas Quiavini, Santiago Matatlán, y para el futuro lejano se añaden a la lista: San Juan Teitipac, Santo Tomas Jalieza, San Antonio Castillo Velasco, Santa Ana Tlapacoyan, Teotitlán del Valle.

- Los resultados no representan una predicción, ya que son obtenidos de modelos matemáticos (Modelos de circulación general de CC), y datos del área de estudio, que nos indicaran posibles escenarios que pueden darse dentro del área de estudio. Pero de lo que si debemos estar claros es que el CC afectará la disponibilidad y calidad hídrica de la subcuenca Alto Atoyac.

5. BIBLIOGRAFIA

- ADGER, W. N., BROOKS, N. & BENTHAM, G. 2004. New indicators of vulnerability and adaptive capacity. Technical Report 7, Tyndall Centre of Climate Change Research. Norwich: University of East Anglia.
- ARAUZO, M., DÍEZ, J., HERNÁIZ, P. & DEL REY, A. 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. Investigación de la zona no saturada, 6.
- ÁVILA, J. P. & SANSORES, A. C. 2003. Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. Ingeniería, 7, 47-54.
- BAUTISTA-PERDOMO, J. M. 2013. Modelo de flujo del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca IPN. 141 p.
- BELMONTE, J. S. I., CAMPOS, E. J. O. & HERRERA, B. J. 2003. Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etna, Oaxaca, México. . Revista Geofísica. 59: 1-32 p. (PA: 35159).
- BELMONTE, J. S. I., CAMPOS, E. J. O. & ALATORRE, Z. M. A. 2005. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. Geofísica Internacional, Vol-44, pp. 283-300.
- BROOKS, N. 2003. Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework.
- BROOKS, N., ADGER, W. & KELLY, P. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. Global Environment Change; 15(2):151–63.
- CAMARGO, J.A. Y ALONSO, A. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. Environment International 32: 831-849.
- CAYUELA, J. A., FERNÁNDEZ LUQUE, J. E., MORENO LUCAS, F., CARPIO, M., MANUEL, J. & CABRERA, F. 1994. Estimación de las pérdidas de nitrato en un suelo con cultivo de maíz y riego.
- CNA 2009. Actualización de la disponibilidad Media anual de agua subterránea, Acuífero (2025) Valles centrales, estado de Oaxaca, Publicado en el diario oficial de la federación el 28 de agosto del 2009.
- CONAPO 2010. Índice de Marginación por localidad.
- ERIKSEN, S. & KELLY, P. 2007. Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment. Mitigations and Adaptation Strategies for Global Change, 12(4), 495–524.
- GLEICK, P. H. 1990. Vulnerability of water systems. In P. E. Waggoner (Ed.), Climate change and US, water resources. New York: Wiley.
- GOGU, R.C. DASSARGUES, A. 2000. Current and future trends in groundwater vulnerability assessment. Environ Geol; 39:549-59.

- IMTA. 2010. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el CC [MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F. y PATIÑO-GÓMEZ, C. (editores)]. 2010. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 161 pp.
- INEGI 2010. Censo de Población y Vivienda. Principales resultados por localidad
- INEGI 2012. Zona Hidrogeológica. Valles Centrales de Oaxaca, Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía [página web], consultado 22 de septiembre 2014, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/hidrologia/>. Primera edición.
- IPCC 2001. Climate Change 2001: impacts, adaptation vulnerability. In: Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Geneva: UNEP/WMO.
- IPCC 2007. Impact, adaptation and vulnerability, Working Group II Contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.
- JUN, K. S., CHUNG, E.-S., SUNG, J.-Y. & LEE, K. S. 2011. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. *Science of the Total Environment*, 409, 5228-5242.
- KIM, Y. & CHUNG, E.-S. 2013. Fuzzy VIKOR approach for assessing the vulnerability of the water supply to climate change and variability in South Korea. *Applied Mathematical Modelling*.
- KNOESEN, D. 2009. Integrating hydrological hazards and climate change as a tool for adaptive water resources management in the Orange River Catchment. PhD thesis, University of KwaZulu Natal.
- LANE, M. E., KIRSHEN, P. H. & VOGEL, R. M. 1999. Indicators of impacts of global climate change on US water resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 194–204.
- LARIOS ORTIZ, L. 2009. Contaminación del agua por nitratos: significación sanitaria. *Revista Archivo Médico de Camagüey*, 13, 0-0.
- MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F. y PATIÑO-GÓMEZ, C. (editores). 2010. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el CC. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 161 pp.
- MEIGH, J., MCKENZIE, A. & SENE, K. 1999. A grid-based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. *Water Resource Management*; 13:85-115.
- MOSS, R. H., BRENKERT, A. L. & MALONE, E. L. 1999. Vulnerability to climate change: A quantitative approach. Technical Report PNNL-SA-33642, Prepared for the US Department of Energy.
- ONGLEY, E. D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos, Food & Agriculture Org.
- SEMARNAT 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de estadísticas ambientales, Indicadores clave y de desempeño ambiental.
- SSA 1994. SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTO A QUE DEDE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACIÓN. NOM-127-SSA1-1994.

- SULLIVAN CA, VOROSMARTY C, BUNN S, CLINE S, HEIDECHE C, STORYGARD A, PROUSSEVITCH A, DOUGLAS E, BOSSIO D, GUNTHER D, GIACOMELLO AM, O'REGAN DP, MEIGH JR. 2006. Mapping the links between water, poverty and food security. GWSP working paper no. 1, Bonn
- SULLIVAN CA, DEIDERICHS N, MANDER M. 2008. Assessing water vulnerability in the Orange River Basin in South Africa. Newater technical report, Oxford University, UK
- SULLIVAN CA, DICKENS C, MANDER M, BONJEAN M, MACFARLANE D, BHARWANI S, MATIN N, VAN NIEUKERK K, DIEDERICHS N, TAYLOR A, SHALE M, KING-OKUMU C, KRANZ N, BISARO S, ZABALA A, ROMERO A, HUNTJENS P, KNOESEN D (2010) Promoting adaptive water management in the Orange Senqu River Basin: a NeWater case study. In: Mysiak J, Henrikson HJ, Sullivan CA, Bromley J, Pahl-Wostl C (eds) The adaptive water resource management handbook. Earthscan, London
- Ramos-Leal, J. A., Sandoval, I., Tapia, F. O. 2012. Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression *Environ Earth Sci* 66:2257–2271. DOI 10.1007/s12665-011-1447-4
- TOWNSEND, A.R., HOWARTH, R.W., BAZZAZ, F.A., BOOTH, M.S., CLEVELAND, C.C., COLLINGE, S.K., DOBSON, A.P., EPSTEIN, P.R., HOLLAND, E.A., KEENEY, D.R., MALLIN, M.A., ROGERS, C.A., WAYNE, P. Y WOLFE, A.H. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Front. Ecol. Environ.* 1: 240-246.
- UNDP 2005. Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures. USA: Cambridge University Press.
- VOGEL, C. 2001. Vulnerability and global environmental change. Human Dimensions of GlobalChange Meeting, Rio.
- WANG, X., MA, F. B. & LI, J. Y. 2012. Water Resources Vulnerability Assessment based on the Parametric-system Method: a Case Study of the Zhangjiakou Region of Guanting Reservoir Basin, North China. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1204-1212.
- WATSON, J. E. M., IWAMURA, T. & BUTT, N. 2013. Mapping vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature Climate Change*, 3, 989-994.
- YANG, J. S., KIM, S. U., CHUNG, E. S. & KIM, T. W. 2012. Prioritization of water management under climate change and urbanization using multi-criteria decision making methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 801–814.
- YOO, G., HWANG, J. H. & CHOI, C. 2011. Development and application of a methodology for vulnerability assessment of climate change in coastal cities. *Ocean and Coastal Management*, 54, 524–534.

CONCLUSIONES GENERALES

- La subcuenca Alto Atoyac será sensible a los efectos del CC según los escenarios analizados.

- Los análisis de cambios de coberturas y uso de suelo, potencial contaminación agrícola e índices de recarga hídrica, frente al CC permitieron realizar un análisis más local de vulnerabilidad hídrica, por lo que se obtuvieron resultados, más focalizados a la realidad de los Valles Centrales de Oaxaca.
- La percepción remota, representa un método, fácil y económico de usar, lo que reduce tiempo y esfuerzos para analizar grandes extensiones de área en diferentes periodos de tiempo, pudiendo obtener las tendencias de cambio en una determinada área para escenarios futuros.
- En áreas donde no se cuenta con información de datos de calidad de agua, algunos parámetros físico-químicos como nitratos o nitritos pueden ser buen indicador de contaminación, lo que permite tener una idea de la situación hídrica en zonas con alta actividad agrícola.
- Los análisis de toma de decisiones son muy útiles para este tipo de estudios, ya que reúnen la experiencia y trabajo de diferentes investigadores en un área tan compleja como es la afectación del CC sobre el recurso hídrico y dónde se incluye la componente social como variable principal.
- Con este trabajo se pretende crear conciencia en los diferentes sectores de la sociedad sobre el buen uso y aprovechamiento del recurso hídrico, ya que gran parte de la economía depende del acceso que estos tengan al mismo, por lo que su estudio e investigaciones siempre tienen que de ser de interés público, con la finalidad de tomar o plantear las medidas de conservación y adaptación necesarias dentro subcuenca Alto Atoyac.
- Los análisis de vulnerabilidad siempre son necesarios, ya que son herramientas que permiten conocer las afectaciones de los fenómenos tanto naturales como antropogénicos en una determinada área de estudio, y que permiten realizar los planes de gestión y adaptación necesarios para reducir los efectos negativos de estos.

RECOMENDACIONES

- Dentro de las recomendaciones prácticas estarían, la modificación de los sistemas de riego rodados que son comunes en el área, los cuales son poco eficientes y la cantidad de agua usada va más allá de la requerida por los cultivos, situación vista durante las visitas de campo realizadas en los valles de Etlá y Zaachila.
- Es necesario la capacitación y sobre todo el seguimiento a los productores de la zona sobre todo en el uso de nuevos sistemas productivos más eficientes, que permiten el buen uso y aprovechamiento del recurso hídrico

- La cosecha de agua es un aspecto muy importante, ya que la subcuenca es propicia para la recarga hídrica debido a su permeabilidad y lo somero del nivel freático como se pudo observar en el análisis de recarga hídrica a través del modelo HELP. El monitoreo constante dentro de la zona y el modelado matemático son herramientas poderosas para identificar los puntos idóneos para realizar las obras civiles necesarias (pozos de infiltración, abrevaderos, ollas, muros de retención, entre otras) para garantizar la disponibilidad hídrica dentro de la subcuenca.
- Antes de realizar los planes de ordenamiento territorial y nuevas urbanizaciones, es importante conocer las zonas de recarga hídrica, ya que al construir sobre estas zonas se corre el riesgo de perder la permeabilidad de los suelos, volviéndose zonas impermeables, donde se pierde gran cantidad de agua por escorrentía superficial.

BIBLIOGRAFIA GENERAL

- ALI, R., MCFARLANE, D., VARMA, S., DAWES, W., EMELYANOVA, I., HODGSON, G., AND CHARLES, S., 2012, Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia: *Journal of Hydrology*, v. 475, p. 456-472.
- CHARTRES, C. & VARMA, S. 2010. *Out of Water: from Abundance to Scarcity and how to Solve the World's Water Problems*, FT Press.
- CONDE, A. C. 2000. Vulnerabilidad y adaptación al CC: descripción de un estudio de caso y los retos en las investigaciones actuales, .Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, México.
- CONDE, A. C. A., GAY, G. C., 2008. Guía para la generación de escenarios de CC a escala regional, Centro de ciencias de la atmósfera, UNAM
- GAY, C. (Compilador). 2000. México: Una Visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Resultados de los Estudios de Vulnerabilidad del País Coordinados por el INE con el Apoyo del U.S. Country Studies Program. SEMARNAP, UNAM, USCSP.220 pp.
- GREEN, T. R., TANIGUCHI, M., KOOI, H., GURDAK, J. J., ALLEN, D. M., HISCOCK, K. M., TREIDEL, H. & AURELI, A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405, 532-560.
- IMTA. 2010. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el CC [MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F. y PATIÑO-GÓMEZ, C. (editores)]. 2010. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 161 pp.
- IPCC. 2007. Impact, adaptation and vulnerability, Working Group II Contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.

- JUN, K. S., CHUNG, E.-S., SUNG, J.-Y. & LEE, K. S. 2011. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. *Science of The Total Environment*, 409, 5228-5242.
- KIM, Y. & CHUNG, E.-S. 2013. Fuzzy VIKOR approach for assessing the vulnerability of the water supply to climate change and variability in South Korea. *Applied Mathematical Modelling*.
- LIM, B., I. BURTON Y S. HUQ. 2004. *Adaptation policy frameworks for climate change. Developing strategies, policies and measures.* Cambridge University Press.
- MCFARLANE, D., STONE, R., MARTENS, S., THOMAS, J., SILBERSTEIN, R., ALI, R., AND HODGSON, G., 2012, Climate change impacts on water yields and demands in south-western Australia: *Journal of Hydrology*, v. 475, p. 488-498.
- MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F. y PATIÑO-GÓMEZ, C. (editores). 2010. *Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el CC.* Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 161 pp.
- PARISH, E.S., KODRA, E., STEINHAUSER, K., AND GANGULY, A.R., 2012, estimating future global per capita water availability based on changes in climate and population: *Computers & Geosciences*, v. 42, p. 79-86.
- Pérez, S., Hernández, F. R., Ramírez, A., Palacios, O., Prado, F., Martínez, R., Pérez, H., Ibañez, L. A. 2010. PLAN DE MANEJO DE ACUÍFERO VALLES CENTRALES, EN EL ESTADO DE OAXACA. TOMO III. PLAN DE MANEJO PARA EL APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL AGUA DEL ACUÍFERO VALLES CENTRALES EN EL ESTADO DE OAXACA. CONVENIO DE COLABORACIÓN: SGT-OCPS-OAX-010-TT-001-RF-CC.
- VÖRÖSMARTY, C. J., MCINTYRE, P. B., GESSNER, M. O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GLIDDEN, S., BUNN, S. E., SULLIVAN, C. A., LIERMANN, C. R. & DAVIES, P. M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561.
- WANG, X., MA, F. B. & LI, J. Y. 2012. Water Resources Vulnerability Assessment based on the Parametric-system Method: a Case Study of the Zhangjiakou Region of Guanting Reservoir Basin, North China. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1204-1212.

ANEXO A

A continuación se muestran los índices obtenidos para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica frente al CC, los que se encuentran normalizados entre 0 y 1.

La figura A1 muestra el índice de población municipal obtenido para la subcuenca, donde los municipios con mayor población serán los más vulnerables.

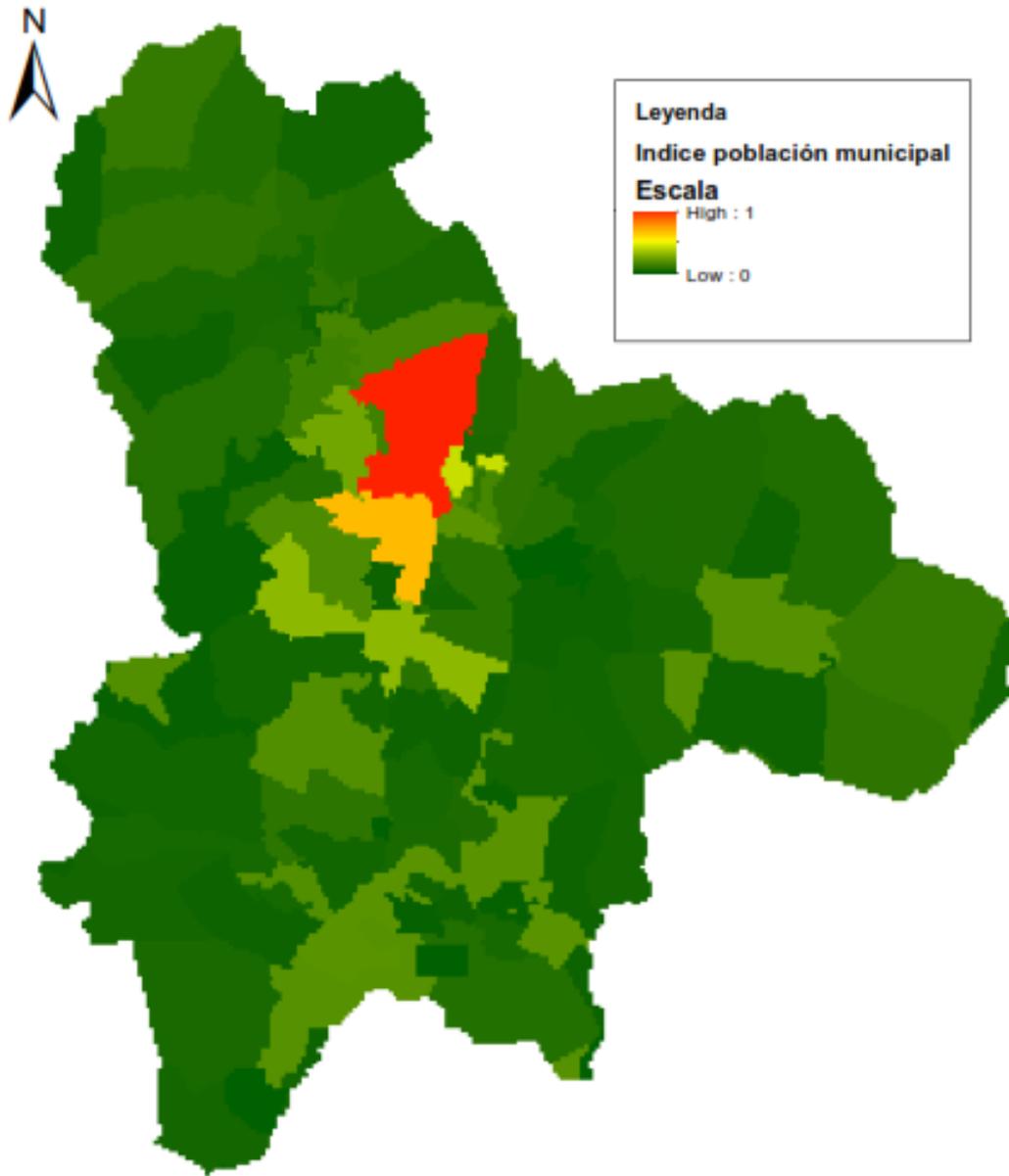


Figura A 1. Índice de población municipal normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

En la Figura A2 se muestra el índice de marginación social, siendo las áreas más marginadas, los valles de Tlacolula y Zaachila

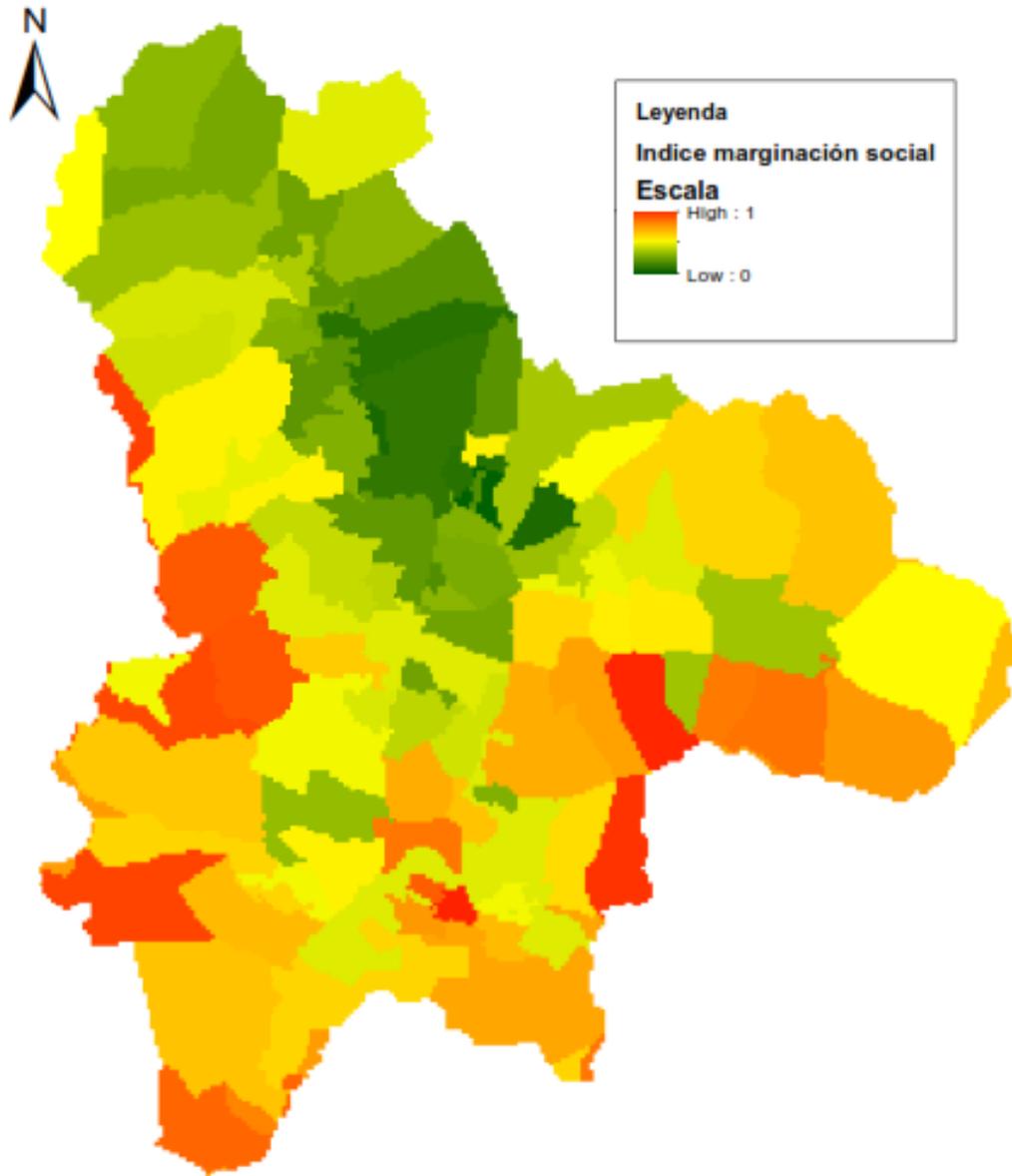


Figura A 2. Índice de Marginación social normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

En la Figura A3 se ve el índice de cambio de cobertura y uso de suelo en la subcuenca siendo las áreas rojas los lugares más vulnerables donde se ha perdido algún tipo de cobertura vegetal, dando lugar a una mayor escorrentía dentro del área

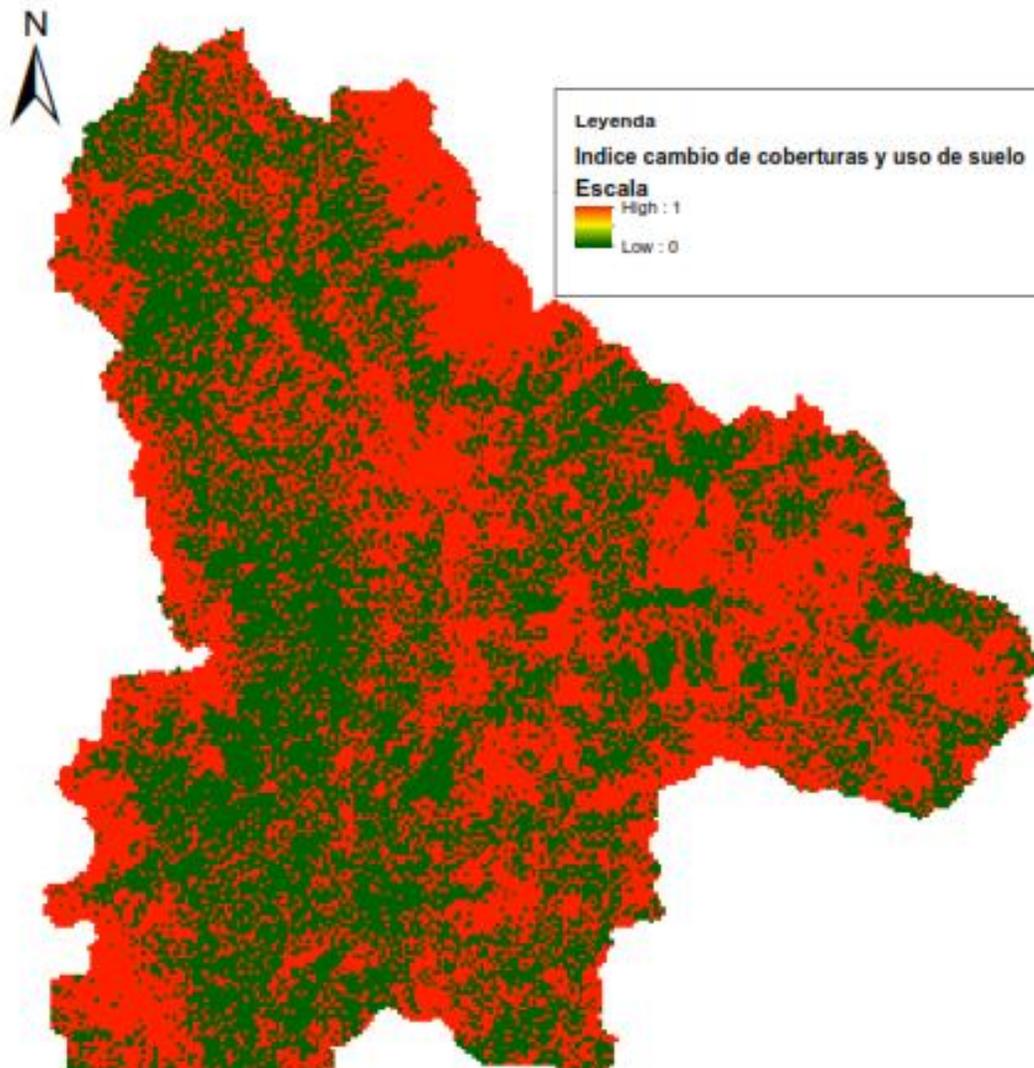


Figura A 3. Índice de cambio de coberturas y uso de suelo normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

La Figura A.4 Muestra el índice de recarga hídrica para el primer horizonte climático 2015-2039 bajo el escenario RCP8.5.

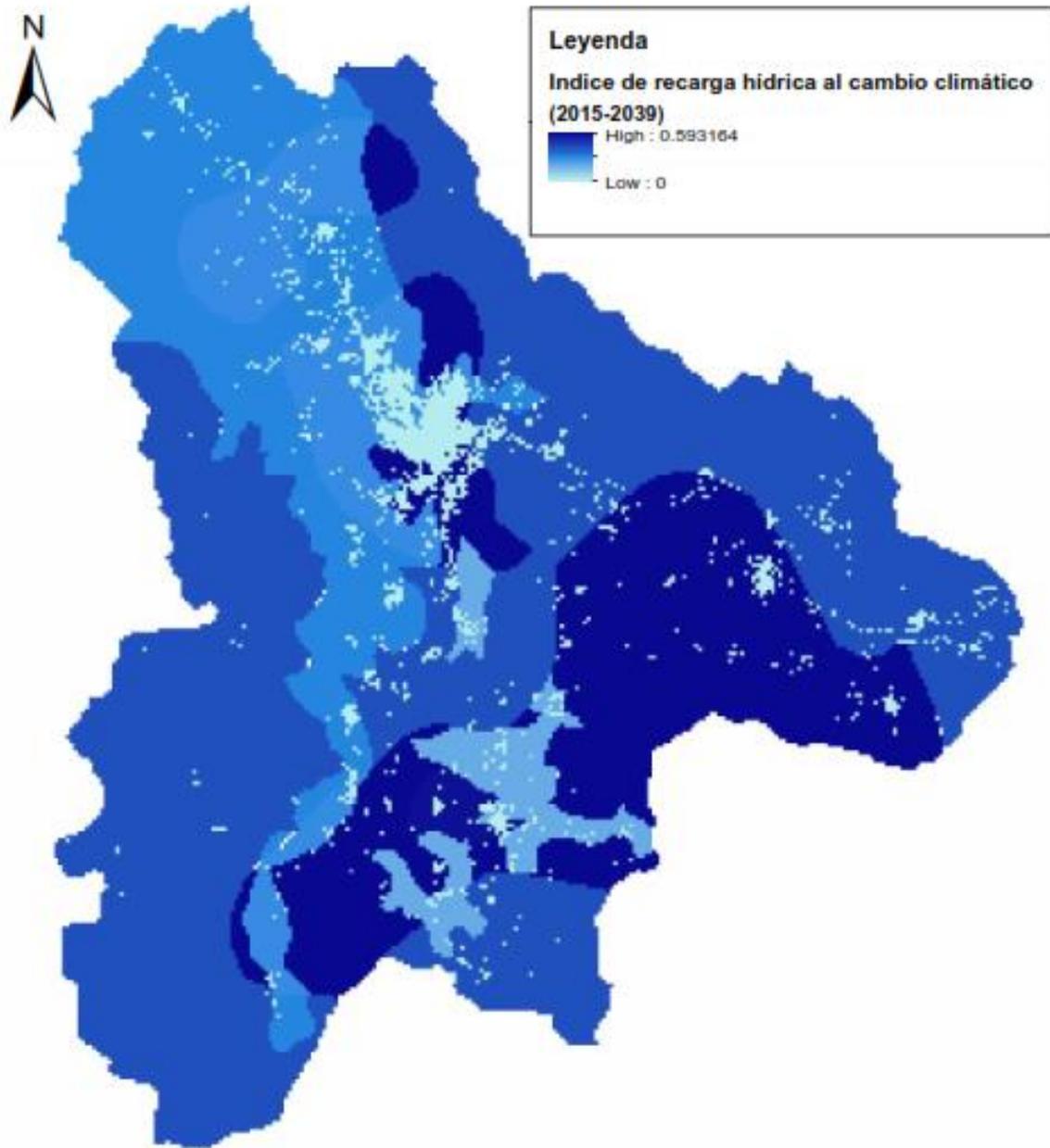


Figura A 4. Índice de recarga hídrica al CC, para el periodo 2015-2039, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

La figura A.5 Muestra el índice de recarga hídrica para el segundo horizonte climático 2075-2099 bajo el escenario RCP8.5.

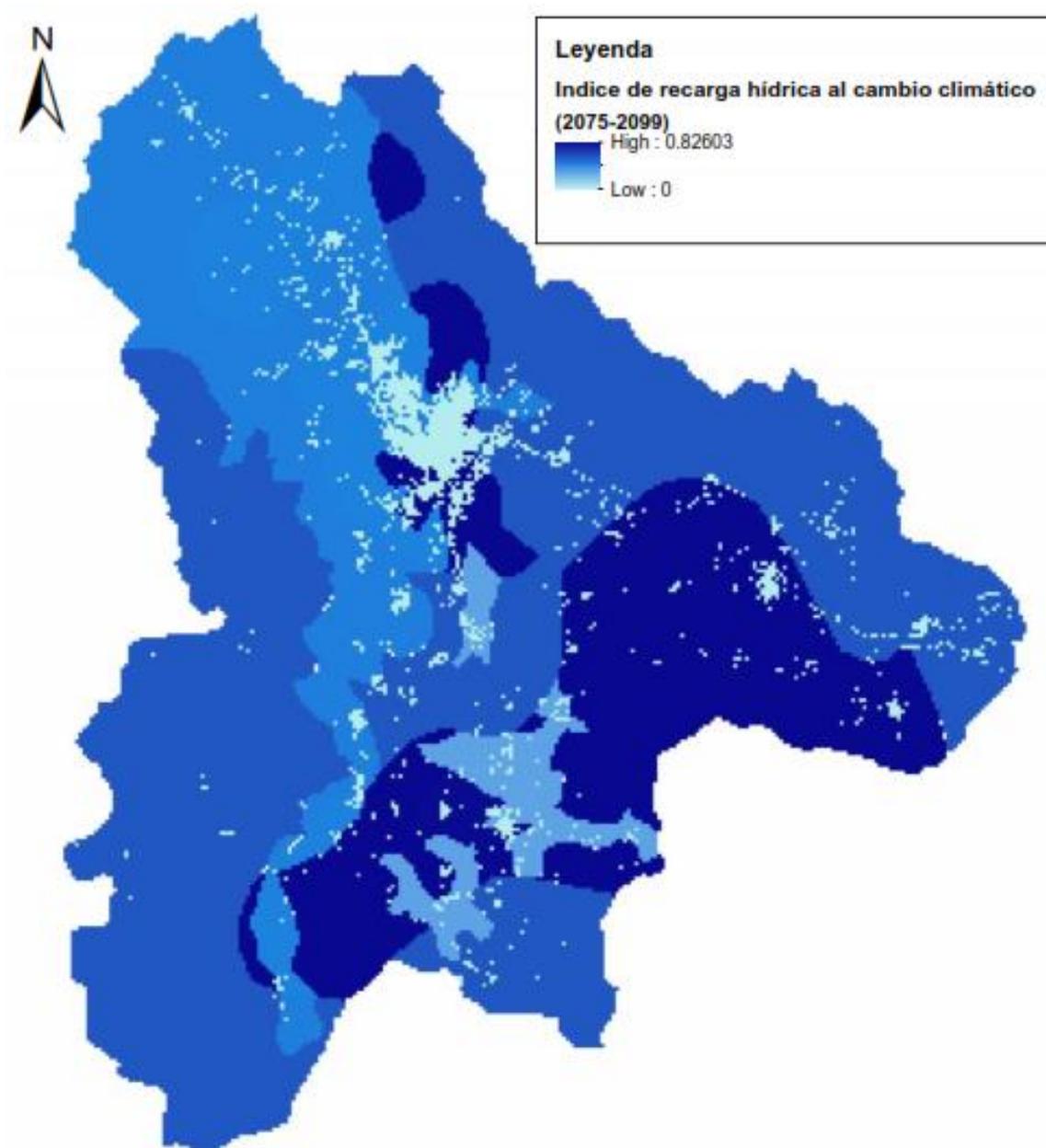


Figura A 5. Índice de recarga hídrica al CC, para el periodo 2075-2099, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

La Figura A.6 Muestra el índice escorrentía superficial al CC para el primer horizonte climático 2015-2039 bajo el escenario RCP8.5.

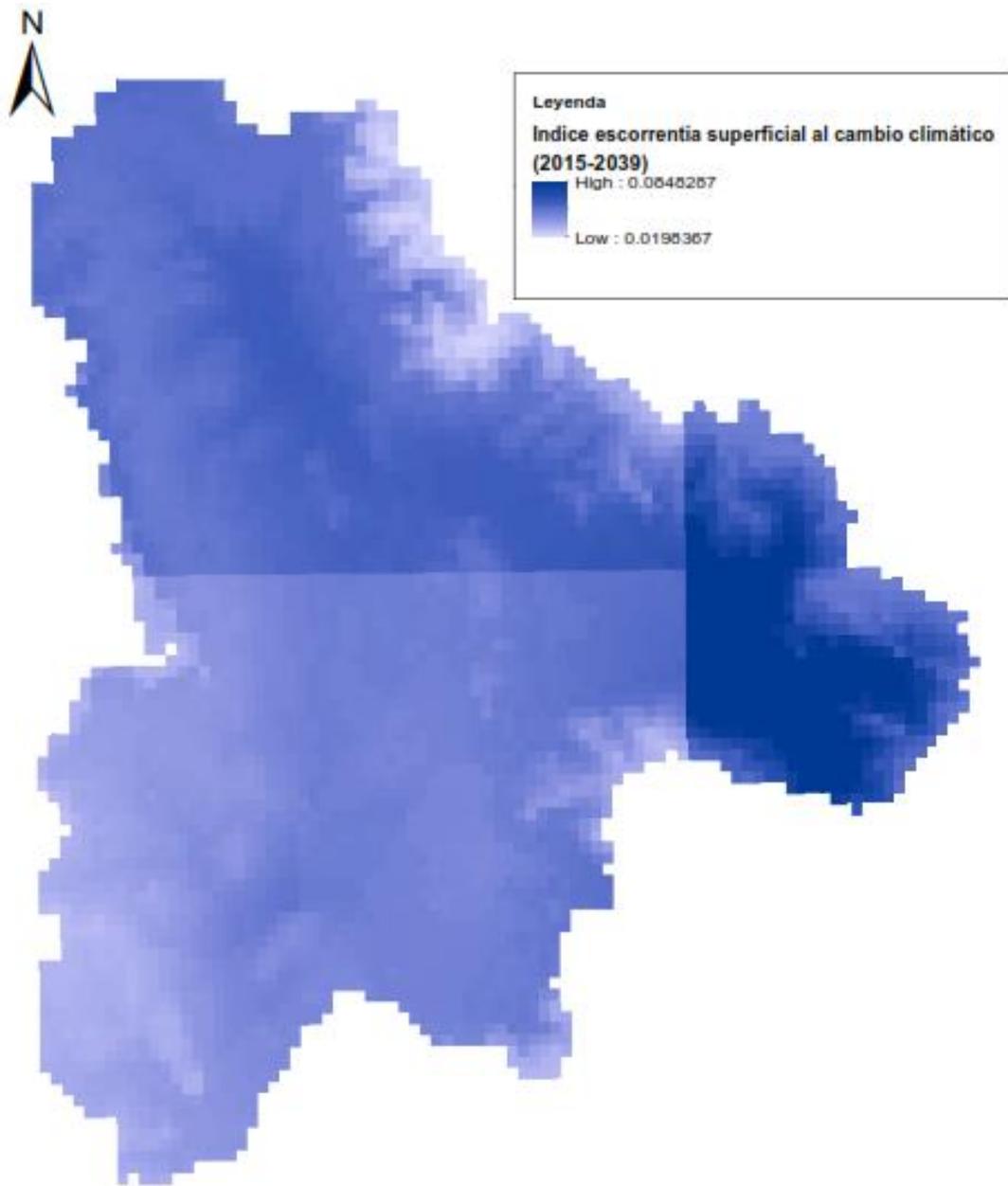


Figura A 6. Índice de escorrentía superficial hídrica al CC, para el periodo 2015-2039, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

La figura A.7 Muestra el índice de escorrentía superficial al CC para el segundo horizonte climático 2075-2099 bajo el escenario RCP8.5.

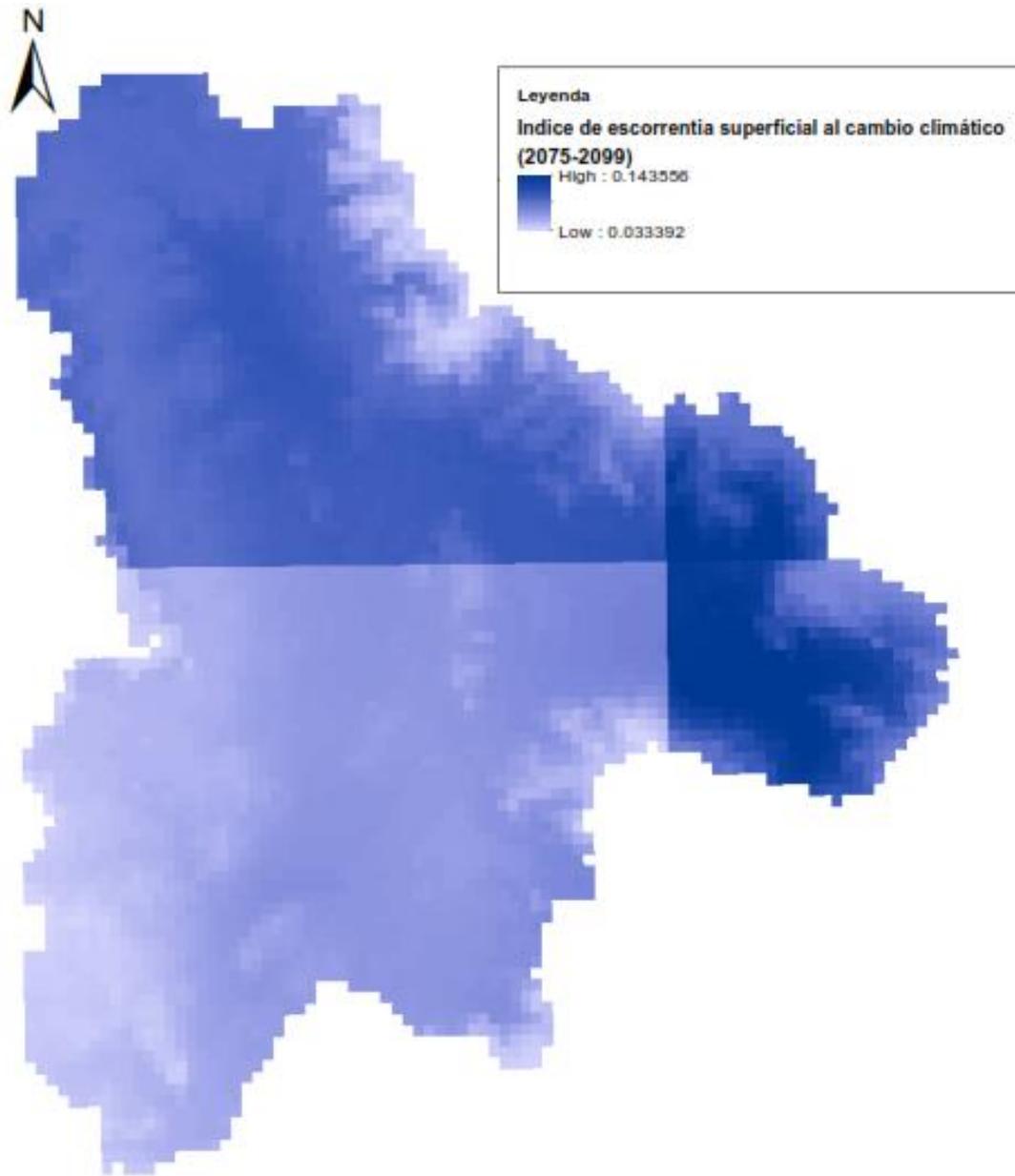


Figura A 7. Índice de escorrentía superficial hídrica al CC, para el periodo 2075-2099, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

En la figura A.8 se ve la distribución de nitratos por toda el área de estudio siendo las partes rojas las áreas con concentraciones por encima de los valores permisibles.

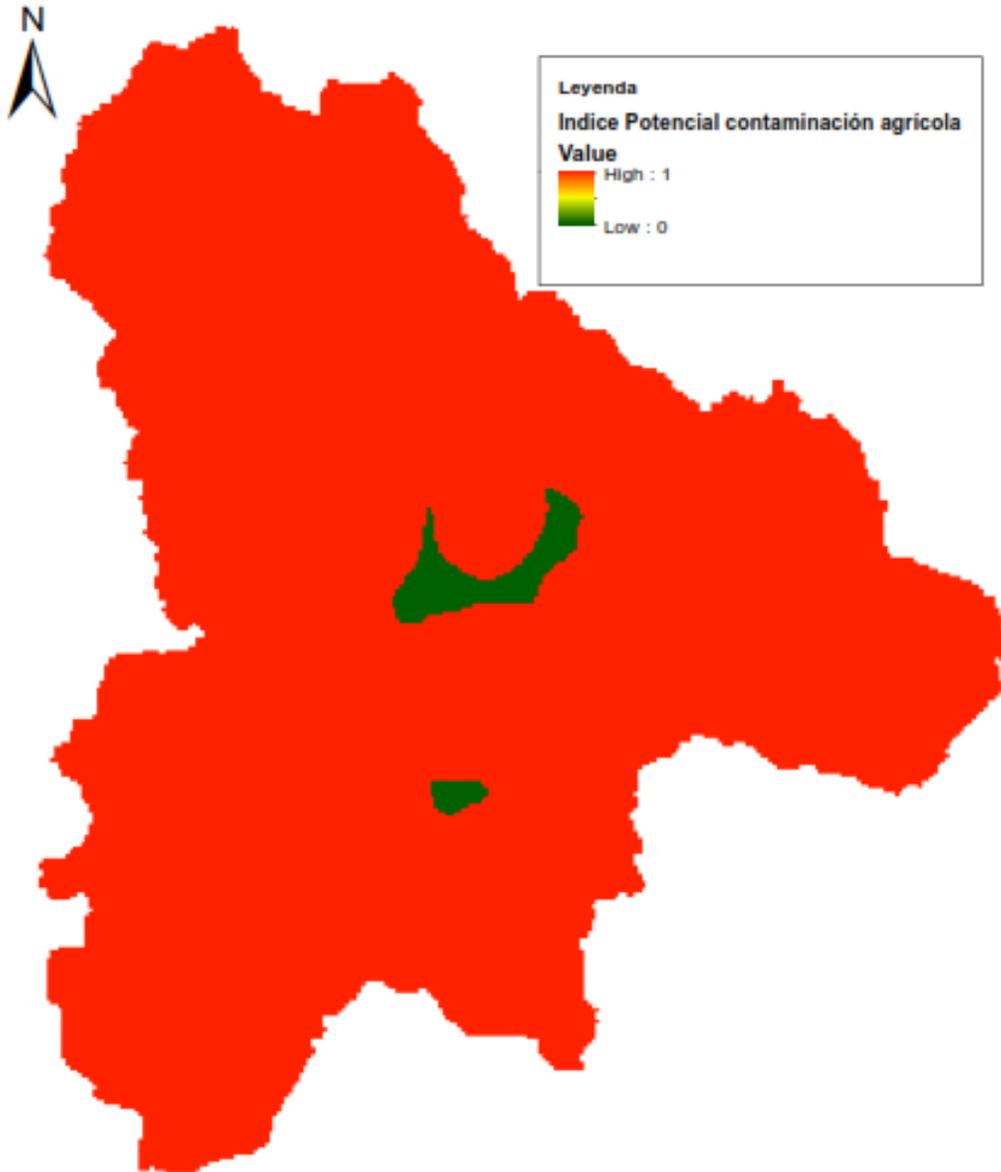


Figura A 8. Índice de potencial contaminación agrícola, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.

En la Figura A.9 se observa es estado del acuífero que según estudios recientes demuestran que el acuífero esta sobre explotado.

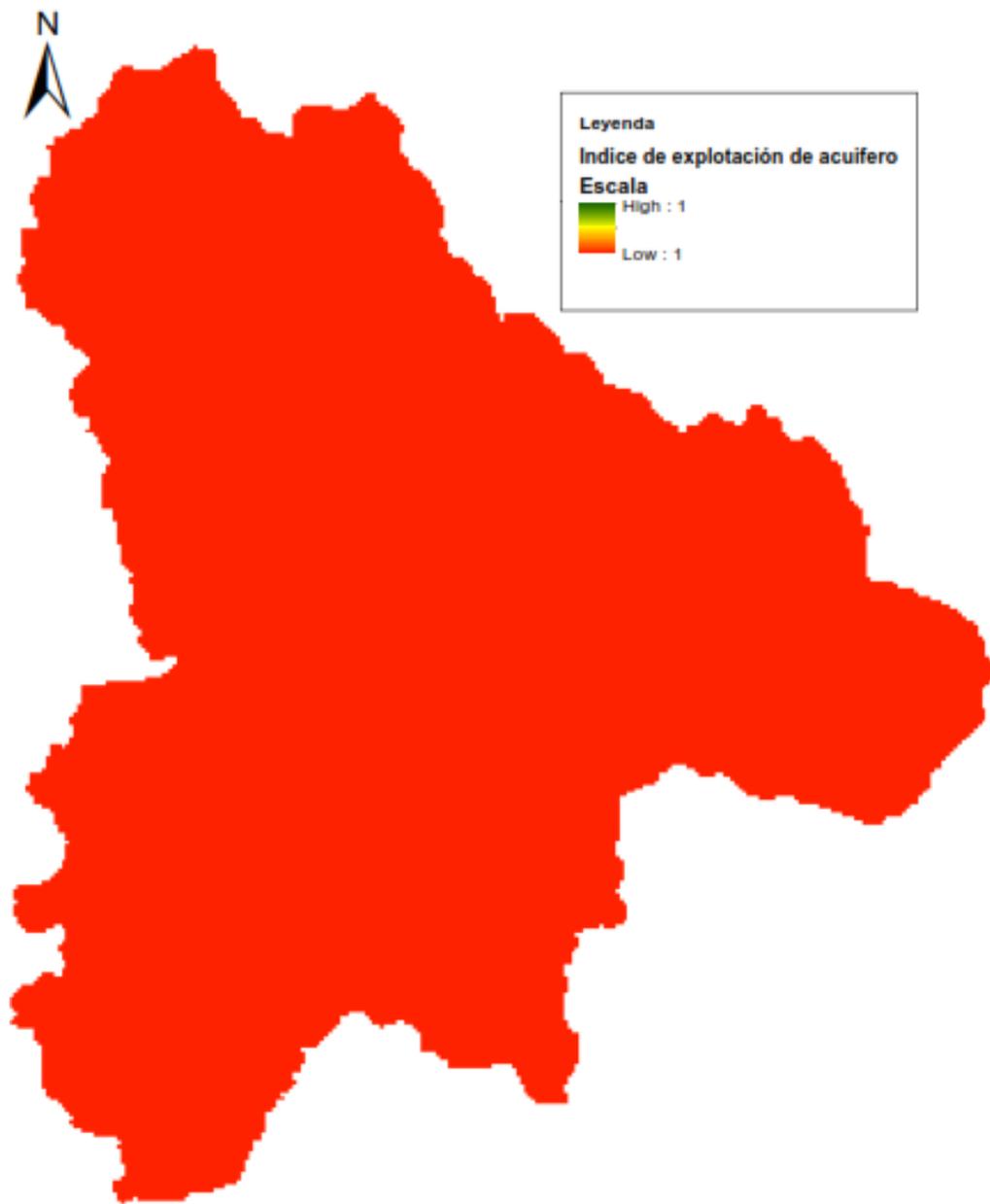


Figura A 9. Índice de explotación de acuíferos, normalizado entre 0 y 1. Utilizado para calcular la vulnerabilidad hídrica al CC de la subcuenca Alto Atoyac.